



TUGAS AKHIR - TF 181801

**OPTIMISASI KONDISI OPERASI BIOSURFAKTAN
*MICROBIAL ENHANCED OIL RECOVERY***

SYAMSUR RIJAL
NRP 0231 17 45000 040

Dosen Pembimbing
Hendra Cordova, ST., MT.

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



FINAL PROJECT - TF 181801

***OPTIMIZATION OF OPERATION CONDITION
BIOSURFACTANT MICROBIAL ENHANCED OIL
RECOVERY***

SYAMSUR RIJAL
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 PLAGIASI

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Syamsur Rijal

NRP : 02311745000040

Departemen : Teknik Fisika FTI-FFS

dengan ini menyatakan bahwa tugas akhir saya berjudul "Optimisasi Kondisi Operasi Biosurfaktan *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, 2 Juli 2019

Yang membuat pernyataan,



Syamsur Rijal

Halaman ini sengaja dikosongkan

LEMBAR PENGESAHAN

**OPTIMISASI KONDISI OPERASI BIOSURFAKTAN
MICROBIAL ENHANCED OIL RECOVERY**

TUGAS AKHIR

Oleh :

Syamsur Rijal

NRP : 0231 17 45000 040

**Surabaya, 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

Halaman ini sengaja dikosongkan

LEMBAR PENGESAHAN
OPTIMISASI KONDISI OPERASI BIOSURFAKTAN
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 :

SYAMSUR RIJAL
NRP. 0231 17 45000 040

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Hendra Cordova, S.T., M.T.....^P.....(Pembimbing)
2. Ir. Matradji, M.Sc.....^{AR&P}.....(Ketua Penguji)
3. Dyah Sawitri, S.T., M.T.....^{Wib}.....(Penguji 1)
4. Iwan Cony Setiadi, S.T., M.T.....^{Wib}.....(Penguji 2)

SURABAYA
JULI, 2019

Halaman ini sengaja dikosongkan

OPTIMISASI KONDISI OPERASI BIOSURFAKTAN *MICROBIAL ENHANCED OIL RECOVERY*

Nama Mahasiswa : Syamsur Rijal
NRP : 0231 17 45000 040
Departemen : Teknik Fisika FTI-ITS
Dosen Pembimbing : Hendra Cordova, ST., MT

Abstrak

Metode eksplorasi minyak terdapat tiga jenis yaitu primer, sekunder dan tersier recovery. Contoh primer recovery adalah artificial lift dan natural flow, sedangkan untuk sekunder recovery berupa waterflooding. Untuk tersier recovery contohnya berupa EOR (Enhanced Oil Recovery). Salah satu metode EOR yang lebih murah dan ramah lingkungan yaitu *Microbial Enhanced Oil Recovery*. Metode ini memanfaatkan mikroorganisme yang memiliki kemampuan untuk menghasilkan biosurfaktan, biopolimer, asam, gas dan pelarut untuk melakukan pekerjaan memulihkan minyak residu dengan memfermentasi bahan baku yang lebih murah, misalnya molase. Operasi Biosurfaktan MEOR dibagi menjadi 3 bagian yaitu *injection well*, reservoir dan *production well*. Pada *injection well* dan *production well* digunakan metode Beggs-Brill sedangkan pada reservoir menggunakan hukum Darcy. Berdasarkan analisa sensitifitas, profit akan meningkat ketika terjadi peningkatan terhadap variabel laju aliran massa injeksi dan tekanan injeksi. Optimisasi dilakukan dengan menggunakan *Genetic Algorithm* dan *Duelist Algorithm*. Hasil terbaik optimisasi menggunakan *Genetic Algorithm* yang terjadi peningkatan profit dari 50626,3 USD/hari menjadi 91292,26 USD/hari.

Kata Kunci: Biosurfaktan, *Microbial Enhanced Oil Recovery (MEOR)*, Optimisasi, *Stochastic Alogrithm*

Halaman ini sengaja dikosongkan

OPTIMIZATION OF OPERATION CONDITION BIOSURFACTANT MICROBIAL ENHANCED OIL RECOVERY

Name : Syamsur Rijal
NRP : 0231 17 45000 040
Department : *Engineering Physics FTI-ITS*
Supervisor : **Hendra Cordova, ST., MT**

Abstract

There are three types of oil exploration methods, i.e primary, secondary and tertiary recovery. Examples of primary recovery are artificial lift and natural flow, while secondary recovery is waterflooding. For tertiary recovery, for example in the form of EOR (Enhanced Oil Recovery). One of the cheaper and environmentally friendly EOR methods is Microbial Enhanced Oil Recovery. This method utilizes microorganisms that have the ability to produce biosurfactants, biopolymers, acids, gases and solvents to do the work of restoring residual oil by fermenting cheaper raw materials, such as molasses. The biosurfactant MEOR operation is divided into 3 parts, i.e injection well, reservoir and production well. In the injection well and production well, the Beggs-Brill method is used while the reservoir uses Darcy's law. Based on sensitivity analysis, profits will increase when there is an increase in the injection mass flow rate variables and injection pressure. Optimization is done using the Genetic Algorithm and Duelist Algorithm. The best results of optimization using Genetic Algorithm, which increased profit from 50626,3 USD/day to 91292,26 USD/day.

Keywords: Biosurfactant, Microbial Enhanced Oil Recovery (MEOR), Optimization, Stochastic Algorithm

Halaman ini sengaja dikosongkan

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 BIOSURFAKTAN *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 memberikan semangat dan motivasi.
2. Totok Ruki Biyanto, Ph.D. selaku dosen penguji tugas akhir ini, yang selalu memberikan bimbingan dan semangat pada penulis.
3. Agus M. Hatta, S.T., M.Si., Ph.D. selaku ketua Departemen Teknik Fisika – ITS sekaligus menjadi dosen wali dari penulis.
4. Sege nap Bapak/Ibu dosen pengajar di Departemen Teknik Fisika - ITS.
5. Orang tua penulis serta sege nap keluarga besar yang selalu memberikan doa dan dukungan.
6. 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, 2 Juli 2019

Penulis

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI.....	v
LEMBAR PENGESAHAN.....	vii
Abstrak	xi
<i>Abstract</i>	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	2
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 Permodelan Metode Begg's-Brill.....	7
2.4 Permeabilitas	9
2.5 Hukum Darcy	10
2.6 Persamaan Monod	11
2.7 Porositas	12
2.8 Pemodelan Transfer Panas pada <i>Injection</i> dan <i>Production Well</i>	13
2.9 Pemodelan Transfer Panas pada Reservoir	13
2.10 <i>Genetic Algorithm</i>	15
2.11 <i>Duelist Algorithm</i>	19
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	23
3.1 Penentuan Input Biosurfaktan MEOR dan Reservoir Properties.....	24
3.2 Penentuan Fungsi Objektif	24
3.3 Pemodelan Biosurfaktan MEOR <i>Operation</i>	25
3.4 Validasi Model dengan software PIPESIM dan COMSOL Multiphysics	25

3.5	Perhitungan Peningkatan Produksi Minyak dan Biaya Operasional Injeksi	26
3.6	Teknik Optimisasi	29
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....		31
4.1	Hasil Pemodelan pada <i>Injection Well</i>	31
4.2	Hasil Pemodelan pada Reservoir	33
4.3	Hasil Pemodelan pada <i>Production Well</i>	34
4.4	Hasil Perhitungan <i>Oil Recovery</i> dan Biaya Operasional	36
4.5	Analisa Sensitifitas	38
4.6	Teknik Optimisasi	41
BAB V PENUTUP		49
5.1	Kesimpulan.....	49
5.2	Saran	50
DAFTAR PUSTAKA.....		51
LAMPIRAN		
BIODATA PENULIS		

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Jenis-jenis EOR.....	5
Gambar 2.2	(a) Proses <i>waterflooding</i> (b) Proses injeksi mikroba dan nutrisi untuk menghasilkan biosurfaktan.....	7
Gambar 2.3	Diagram Blok Optimasi menggunakan <i>Genetic Algorithm</i>	17
Gambar 2.4	Mekanisme Crossover.....	18
Gambar 2.5	Mekanisme Mutasi.....	19
Gambar 2.6	<i>Duelist Alogrithm Flowchart</i>	21
Gambar 3.1	Diagram Alir Penelitian.....	23
Gambar 4.1	Grafik tekanan terhadap kedalaman pada <i>injection well</i>	32
Gambar 4.2	Grafik temperatur terhadap kedalaman pada <i>injection well</i>	33
Gambar 4.3	Grafik Tekanan pada Reservoir.....	35
Gambar 4.4	Grafik Temperatur pada Reservoir.....	35
Gambar 4.5	Grafik Tekanan pada <i>Production Well</i>	36
Gambar 4.6	Grafik Temperatur pada <i>Production Well</i>	37
Gambar 4.7	Grafik Analisa Sensitifitas perubahan laju aliran massa injeksi terhadap profit.....	38
Gambar 4.8	Grafik Analisa Sensitifitas perubahan tekanan injeksi dengan profit.....	39
Gambar 4.9	Grafik Analisa Sensitifitas perubahan temperatur injeksi terhadap profit.....	39
Gambar 4.10	Grafik Analisa Sensitifitas perubahan konsentrasi bakteri terhadap profit.....	40
Gambar 4.11	Grafik Analisa Sensitifitas perubahan konsentrasi nutrisi terhadap profit.....	40
Gambar 4.12	Plot fitness terbaik GA.....	43
Gambar 4.13	Grafik tekanan pada <i>injection well</i> setelah optimisasi.....	44

Gambar 4. 14	Grafik temperatur pada <i>injection well</i> setelah optimisasi	44
Gambar 4. 15	Grafik tekanan pada reservoir setelah optimisasi	45
Gambar 4. 16	Grafik temperatur pada reservoir setelah optimisasi	46
Gambar 4. 17	Grafik tekanan pada <i>production well</i> setelah optimisasi	46
Gambar 4. 18	Grafik temperatur pada <i>production well</i> setelah optimisasi	47

DAFTAR TABEL

Tabel 4.1 Parameter input untuk permodelan gradien tekanan dan temperatur.....	31
Tabel 4.2 Parameter Input Pemodelan Reservoir	34
Tabel 4.3 Perhitungan Profit Biosurfaktan MEOR	37
Tabel 4.4 Variabel Hasil Optimisasi	41
Tabel 4.5 Perhitungan profit Biosurfaktan MEOR setelah dioptimisasi dengan GA	42
Tabel 4.6 Perhitungan Profit Biosurfaktan MEOR setelah dioptimisasi dengan DA	42
Tabel 4.7 Hasil Profit setelah dioptimisasi.....	42

Halaman Ini Sengaja Dikosongkan

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dalam meningkatkan produksi minyak mentah, banyak cara yang dapat dilakukan. Salah satunya adalah dengan metode *Enhanced Oil Recovery* (EOR). Metode EOR ini biasanya dikenal sebagai tersier recovery. Ini termasuk dalam metode mengeksplorasi minyak yang terdapat tiga jenis yaitu primer, sekunder dan tersier recovery. Primer dan sekunder recovery dibedakan berdasarkan cara mengeksplorasi minyak, untuk primer recovery memanfaatkan tekanan yang berada di reservoir sebagai contoh seperti metode artificial lift dan natural flow. Sedangkan sekunder recovery menambahkan tekanan yang berada pada reservoir dengan contoh metode waterflooding dan pressure maintenance[1]. Untuk tersier recovery merupakan hasil pengembangan dari primer dan sekunder recovery. Jikalau metode primer dan sekunder dapat memulihkan sekitar sepertiga dari reservoir, maka metode tersier dalam hal ini EOR dapat memulihkan dua pertiga minyak dari reservoir [1].

EOR memiliki beberapa jenis proses diantaranya thermal recovery, chemical recovery, injeksi gas, dan bioteknologi [2]. Proses bioteknologi ini memanfaatkan mikroba asli yang hidup di reservoir dan lebih sering dikenal dengan *Microbial Enhanced Oil Recovery* (MEOR) yang lebih murah dan ramah lingkungan [3]. Bakteri yang ada bergantung pada kondisi reservoir seperti suhu, permeabilitas dan salinitas air tetapi jenis bakteri yang teridentifikasi sebanyak 80% pada ladang minyak adalah *Pseudomonas* dan *Bacillus* [4]. Mekanisme MEOR dilakukan dengan cara menginjeksikan bakteri dan nutrisi yang berupa molase (produk limbah murah dari pengolahan tebu) [5] ke dalam reservoir. Namun apabila sudah terdapat bakteri, maka dapat

diinjeksi dengan nutrisi saja [6]. Ketika bakteri tersebut menyerap nutrisi maka dapat menghasilkan produk metabolisme seperti biopolimer, gas, *acid* atau biosurfaktan.

Produk metabolisme tersebut memiliki fungsi masing-masing. Contohnya biosurfaktan memiliki fungsi untuk mengurangi tegangan antarmuka (IFT) antara minyak dan air. Pengurangan IFT ini menurunkan tekanan kapiler dalam inti yang dapat membantu mobilisasi minyak yang terperangkap pada pori-pori batuan [7]. Dimana konsentrasi biosurfaktan tersebut dipengaruhi oleh laju injeksi. Semakin tinggi laju injeksi maka akan meningkatkan pula konsentrasi mikroba. Semakin tinggi konsentrasi mikroba akan meningkatkan konsentrasi biosurfaktan. Semakin tinggi konsentrasi biosurfaktan maka akan semakin besar pula pemulihan minyak [8]. Namun, pada laju injeksi yang sangat tinggi waktu tinggal mikroba pada reservoir menjadi berkurang sehingga menyebabkan aktivitas metabolisme lebih rendah [8]. Karenanya diperlukan laju injeksi yang optimal agar menghasilkan biosurfaktan yang maksimal. Akan tetapi, dalam hal ini diperlukan biaya seperti biaya pengadaan nutrisi hingga biaya operasional.

Penelitian ini melakukan optimasi kondisi operasi biosurfaktan pada *microbial enhanced oil recovery* dengan mempertimbangkan biaya. Sehingga diharapkan dapat meminimalkan biaya produksi tapi menghasilkan keuntungan pada produksi minyak mentah dan kondisi operasi berjalan optimal.

1.2 Rumusan Masalah

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

- a. Dibutuhkan pemodelan operasi injeksi pada biosurfaktan *microbial enhanced oil recovery* mulai dari *injection well*, *reservoir*, dan *production well*.

- b. Dibutuhkan optimisasi peningkatan produksi *crude oil* dengan injeksi bakteri dan nutrisi pada biosurfaktan *microbial enhanced oil recovery*.

1.3 Tujuan

Tujuan dilakukannya tugas akhir ini antara lain

- a. Memodelkan operasi injeksi pada biosurfaktan *microbial enhanced oil recovery* mulai dari *injection well* hingga *production well*.
- b. Mengoptimalkan produksi *crude oil* pada *microbial enhanced oil recovery*.

1.4 Lingkup Kajian

Adapun lingkup kajian pada tugas akhir ini antara lain melakukan pemodelan *pressure drop* menggunakan metode Beggs 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 konsentrasi bakteri, konsentrasi nutrisi, laju massa injeksi, *temperature* injeksi dan tekanan injeksi. Teknik optimisasi menggunakan beberapa jenis *stochastic alogrithm* yaitu *Genetic Algorithm* dan *Duelist Algorithm*.

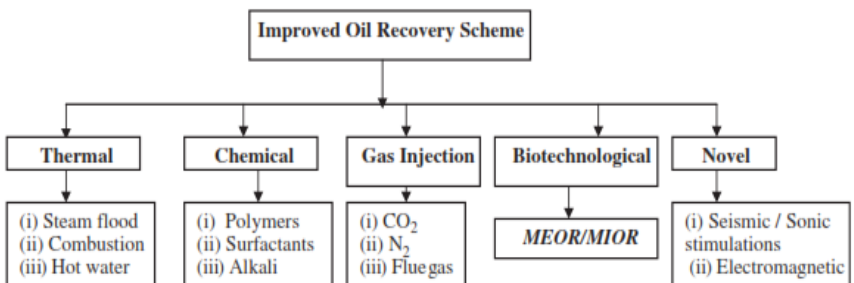
Halaman Ini Sengaja Dikosongkan

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 *Enhanced Oil Recovery (EOR)*

Enhanced oil recovery merupakan salah satu metode peningkatan produksi minyak yang termasuk *tertiary recovery* (dapat memulihkan dua pertiga minyak dari reservoir). 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.

Ada banyak jenis proses EOR yang digunakan di industri minyak seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.1 [2].



Gambar 2.1 Jenis-jenis EOR

Thermal recovery menginjeksi panas ke dalam formasi batuan minyak bumi, meliputi *steamflooding*, injeksi uap siklik, dan *in situ combustion*. *Solvent flooding (gas injecton)* menginjeksi bahan terlarut ke formasi batuan baik itu *miscible* maupun *immiscible*.

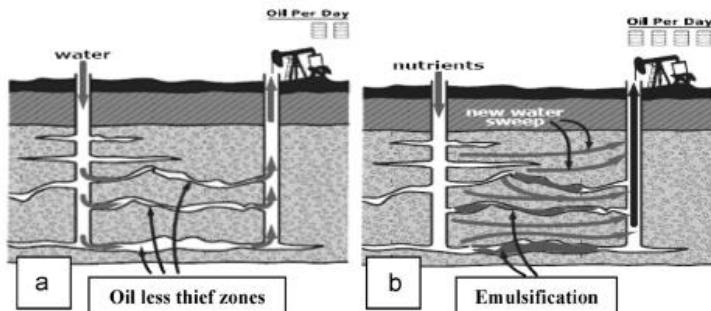
Bahan yang biasanya digunakan karbon dioksida, hidrokarbon, dan nitrogen. *Chemical flooding* menginjeksikan air bercampur bahan kimia yang ditambahkan ke dalam formasi batuan, meliputi *surfactant flooding*, *polymer flooding*, dan *alkaline flooding* [1]. Sedangkan untuk bioteknologi menginjeksikan mikroba dan nutrisi ke dalam reservoir.

2.2 *Microbial Enhanced Oil Recovery (MEOR)*

Setelah dilakukannya metode sekunder recovery seperti *chemical flooding* yang menggunakan bahan kimia seperti surfaktan dan polimer, para ilmuwan mencari metode alternatif dikarenakan metode CEOR (*Chemical Enhanced Oil Recovery*) ternyata tidak cocok secara ekonomi karena produk jadi digunakan untuk pemulihan bahan baku. Dikembangkan sebuah metode yang mengeksplorasi mikroorganisme untuk produksi bahan kimia seperti disebutkan di atas, meskipun pada tingkat lebih lambat dan dengan hasil lebih rendah. Mikroorganisme tersebut memiliki kemampuan untuk menghasilkan biosurfaktan, biopolimer, asam, gas dan pelarut untuk melakukan pekerjaan memulihkan minyak residu dengan memfermentasi bahan baku yang lebih murah, misalnya molase [2].

Dalam proses MEOR, kondisi untuk metabolisme mikroba didukung melalui injeksi nutrisi. Dalam beberapa proses, ini melibatkan menyuntikkan karbohidrat yang dapat difermentasi termasuk molase ke dalam reservoir. Metode yang dipatenkan melibatkan menyuntikkan air yang mengandung sumber vitamin, fosfat, dan akseptor elektron seperti nitrat ke dalam formasi dan memungkinkan bakteri anaerob, baik yang sudah ada atau dimasukkan ke dalam formasi untuk berkembang biak menggunakan minyak sebagai sumber karbon utama.

Ada dua cara utama di mana mikroba dapat berkontribusi pada EOR. Pertama mikroba tumbuh di batuan dalam reservoir untuk menghasilkan gas, biosurfaktan, biopolimer dan biokimia tidak beracun lainnya untuk memulihkan minyak yang terperangkap dan yang kedua mikroba secara selektif dapat menyumbat saluran permeabilitas tinggi sehingga *sweep efficiency* proses *recovery* dapat ditingkatkan [2]. Perbandingan mekanisme MEOR dengan waterflooding dapat dilihat pada gambar 2.2.



Gambar 2.2 (a) Proses *waterflooding* (b) Proses injeksi mikroba dan nutrisi untuk menghasilkan biosurfaktan. [2]

Pada penelitian ini digunakan bakteri dengan jenis *Bacillus Subtilis*, dimana bakteri ini merupakan salah satu bakteri penghasil biosurfaktan. Bakteri ini dipilih karena dapat menghasilkan konsentrasi biosurfaktan yang lebih banyak ketimbang jenis bakteri penghasil biosurfaktan yang lainnya. [9]

2.3 Permodelan Metode Begg's-Brill

Pada tahun 1973 Begg's-Brill melakukan eksperimen yang menghasilkan persamaan gradien tekanan pada aliran multifase dengan analisa kesetimbangan energi dan mengasumsikan tidak ada gaya eksternal dari atau terhadap fluida alir. [10]

$$\frac{dp}{dz} = \left(\frac{\partial p}{\partial z}\right)_{friction} + \left(\frac{\partial p}{\partial z}\right)_{elevation} + \left(\frac{\partial p}{\partial z}\right)_{acceleration} \quad (2.1)$$

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 2.2

$$\left(\frac{\partial p}{\partial z}\right)_{friction} = \frac{f_{tp} \cdot G_m \cdot v_m}{2 \cdot g_c \cdot d} \quad (2.2)$$

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)

Rugi elevasi adalah berkurangnya tekanan fluida dikarenakan fluida kehilangan tekanan hidrostatik dan dipengaruhi oleh densitas fluida serta tinggi kolom fluida. Menurut Beggs-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 2.3 [10]

$$\left(\frac{\partial p}{\partial z}\right)_{elevation} = \frac{g}{g_c} [\rho_L H_L + \rho_g (1 - H_L)] x \sin\theta \quad (2.3)$$

Dimana :

- g = Percepatan gravitasi (m/s²)

- ρ_L = Massa jenis liquid (kg/m³)
 H_L = Fraksi *holdup*
 ρ_g = Massa jenis gas (kg/m³)
 θ = Sudut kemiringan dari horizontal

Pada penelitian ini, aliran yang digunakan adalah aliran pipa vertikal ke atas, sehingga sudut kemiringan θ adalah 90. Sehingga dengan melakukan substitusi persamaan 2.2 dan persamaan 2.3 ke persamaan 2.1 dihasilkan persamaan *pressure drop* total pada persamaan 2.4

$$\left(\frac{\partial p}{\partial z}\right) = \frac{f_{tp} \cdot G_m \cdot v_m}{2 \cdot g_c \cdot d} + \frac{g}{g_c} [\rho_L H_L + \rho_g (1 - H_L)] \quad (2.4)$$

2.4 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 [13]

$$q = \frac{cA\Delta P}{L} \quad (2.5)$$

Dimana :

- q = laju volumetrik aliran fluida (m³/s)
 ΔP = Perbedaan tekanan dari titik awal hingga titik akhir (psi)
 A = Luas area yang dilalui fluida (m²)
 L = Panjang medium yang dilalui (m)

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

$$c = \frac{k}{\mu} \quad (2.6)$$

Dimana :

k = Nilai permeabilitas dari medium dengan dimensi cm^2

μ = Nilai viskositas fluida

Sehingga persamaan 2.6 dapat disubstitusi ke persamaan 2.5 menjadi persamaan berikut

$$\Delta P = \frac{q\mu L}{kA} \quad (2.7)$$

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.

2.5 Hukum Darcy

Hukum Darcy merupakan persamaan yang menghitung kecepatan makroskopik di media berpori. Kecepatan makroskopik ini penting karena struktur media berpori yang terlalu kecil dan sangat kompleks. Ini mewakili arah dan kecepatan dari fluida di media berpori, dimana aliran tersebut dipengaruhi oleh sifat fluida, permeabilitas batuan dan gravitasi. Kecepatan makroskopik dicari dari persamaan berikut [11]

$$\vec{u} = -\frac{1}{\eta} \mathbf{K}(\nabla p - \rho g \vec{e}_z) \quad (2.8)$$

Dimana :

η = Viskositas

\mathbf{K} = Permeabilitas batuan

p = Tekanan

g = Konstanta gravitasi

\vec{e}_z = basis vektor untuk axis vertikal

2.6 Persamaan Monod

Persamaan Monod ini digunakan untuk menghitung laju pertumbuhan bakteri berdasarkan rumus Michaelis-Menten Kinetics [11]. Persamaan ini cocok untuk karakteristik laju pertumbuhan bakteri seperti memiliki laju pertumbuhan maksimum, dan kinetika reaksi merupakan proses orde pertama pada saat konsentrasi substrat rendah [12]. Laju pertumbuhan bakteri dapat dicari dari persamaan berikut [11]

$$\mu = \mu_{max} \frac{N}{K+N} \quad (2.9)$$

Dimana :

- μ = laju pertumbuhan bakteri
- μ_{max} = laju maksimum pertumbuhan bakteri
- N = konsentrasi nutrisi (kg/m^3)
- K = konstanta setengah saturasi

Untuk memastikan agar nutrisi tidak digunakan dua kali yakni untuk reproduksi dan produksi metabolit maka digunakan koefisien yield (Y) dengan diberikan rasio $Y_b + Y_m = 1$. Sehingga reaksi bakteri dan reaksi metabolit ditentukan dengan persamaan 2.10 dan 2.11

$$R_b = \mu_b \cdot B \cdot Y_b \quad (2.10)$$

$$R_m = \mu_m \cdot M \cdot Y_m \quad (2.11)$$

Sehingga untuk menentukan reaksi nutrisi ditentukan dengan persamaan 2.12

$$R_n = -R_b - R_m \quad (2.12)$$

Dimana :

- R_b = reaksi bakteri
- R_m = reaksi metabolit
- R_n = reaksi nutrisi
- μ_b = laju pertumbuhan bakteri

- μ_m = laju produksi metabolit
 B = konsentrasi bakteri (kg/m^3)
 M = konsentrasi metabolit (kg/m^3)
 Y_b = hasil bakteri dari model monod
 Y_m = hasil metabolit dari model monod

Sedangkan untuk menentukan perkembangan bakteri, nutrisi dan metabolit dapat ditentukan dengan persamaan konservasi pada persamaan 2.13 hingga persamaan 2.15

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{S_w \phi B}{\beta_w} \right) + \nabla \cdot \left(\frac{\vec{u}_w B}{\beta_w} \right) - \tilde{q}_b - R_b = 0 \quad (2.13)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{S_w \phi M}{\beta_w} \right) + \nabla \cdot \left(\frac{\vec{u}_w M}{\beta_w} \right) - R_m = 0 \quad (2.14)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{S_w \phi N}{\beta_w} \right) + \nabla \cdot \left(\frac{\vec{u}_w N}{\beta_w} \right) - \tilde{q}_n - R_n = 0 \quad (2.15)$$

Dimana :

- S_w = saturasi air
 ϕ = porositas
 B = konsentrasi bakteri (kg/m^3)
 M = konsentrasi metabolit (kg/m^3)
 N = konsentrasi nutrisi (kg/m^3)
 β_w = faktor volume formasi dari air
 \vec{u}_w = kecepatan darcy dari air (m/s)
 \tilde{q}_b = persamaan konservasi dari bakteri
 \tilde{q}_n = persamaan konservasi dari nutrisi
 R_b = reaksi bakteri
 R_m = reaksi metabolit
 R_n = reaksi nutrisi

2.7 Porositas

Porositas merupakan karakteristik penting dari formasi batuan. Menurut T.D. Van Golf-Racht dalam bukunya

menyebutkan bahwa terdapat dua jenis porositas yakni porositas primer dan porositas sekunder. Porositas primer merupakan ruang dalam batuan yang dibentuk oleh butiran batuan contohnya seperti batuan pasir atau *limestone*. Porositas sekunder merupakan ruang dalam batuan yang dibentuk oleh patahan, sambungan dan pemisahan batuan oleh air yang bersirkulasi. [14]

Dalam formasi batuan di reservoir harus memiliki pori-pori yang besar sehingga fluida dapat mengalir melalui batuan tersebut. Sehingga dengan porositas ini dapat diketahui juga kandungan minyak yang ada pada batuan. Bentuk persamaan porositas dapat dinyatakan pada persamaan 2.9

$$\text{persen porositas} = \frac{\text{pore volume}}{\text{bulk volume}} \times 100 \quad (2.16)$$

2.8 Pemodelan Transfer Panas pada *Injection* dan *Production Well*

Kalor yang hilang tiap satuan kedalaman dipengaruhi oleh jari-jari tubing, suhu uap, suhu ambien dan *overall heat transfer coefficient* yang dapat dilihat pada persamaan 2.17 berikut

$$\frac{dQ}{dz} = 2\pi r_{to} U_{to} (T - T_h) \quad (2.17)$$

Dimana :

Q = heat quantity (kJ)

Z = distance (m)

r_{to} = tube ratio (m)

U_{to} = overall heat transfer coefficient (W/m²-K)

T = Suhu (C)

T_h = Suhu ambien (C)

2.9 Pemodelan Transfer Panas pada Reservoir

Perpindahan panas dari biosurfaktan ke reservoir menggunakan persamaan berikut [15]

$$Q_1 = Q_2 + Q_{total \ losses} \quad (2.18)$$

Dimana :

Q_1 = Energi panas pada keadaan awal

Q_2 = Energi panas setelah melalui reservoir

$Q_{total\ losses}$ = Energi panas yang hilang selama proses dalam reservoir

Untuk nilai Q_1 dan Q_2 didapatkan dari persamaan

$$Q_1 = m_{biosurf} C_{p1} T_1 \quad (2.19)$$

$$Q_2 = m_{biosurf} C_{p2} T_2 \quad (2.20)$$

Dimana :

$m_{biosurf}$ = massa biosurfaktan (kg)

C_{p1} = heat capacity sebelum reservoir (kJ/kg-C)

C_{p2} = heat capacity sesudah reservoir (kJ/kg-C)

T_1 = temperatur sebelum reservoir (C)

T_2 = temperatur sesudah reservoir (C)

Namun terdapat energi yang hilang selama perambatan baik secara konduksi maupun konveksi. Energi yang hilang tersebut dapat dicari menggunakan persamaan berikut [15]

$$Q_{total\ losses} = \frac{T_1 - T_\infty}{R_{konduksi} + R_{konveksi}} \quad (2.21)$$

Dimana :

T_1 = Temperatur fluida pada reservoir (C)

T_∞ = Temperatur reservoir (C)

$R_{konduksi}$ = Resistansi thermal konduksi (m²-K/W)

$R_{konveksi}$ = Resistansi thermal konveksi (m²-K/W)

Nilai R merupakan hambatan panas yang dapat dicari dengan persamaan berikut

$$R_{konduksi} = \frac{L_p}{k A_p} \quad (2.22)$$

$$R_{konveksi} = \frac{1}{h A_p} \quad (2.23)$$

Dimana :

L_p = Panjang karakteristik reservoir (m)

k = konduktivitas thermal reservoir (W/m-K)

A_p = Luas area reservoir (m²)

h = Koefisien perpindahan panas konveksi (W/m-K)

Nilai h didapat dari persamaan Nusselt Number yang merupakan koefisien perpindahan panas secara konveksi. Nusselt number diturunkan dari nilai Reynold Number dan Prandalt Number.

$$Nu = \frac{0.255}{\varphi} Re^{2/3} Pr^{1/3} = \frac{h L_p}{k} \quad (2.24)$$

Dimana :

Nu = Nusselt Number

Re = Reynold Number

Pr = Prandt Number

2.10 Genetic Algorithm

Genetic algorithm (GA) adalah salah satu jenis algoritma optimisasi yang digunakan untuk menemukan solusi paling optimal dari suatu permasalahan yang terinspirasi dari mekanisme seleksi alam, dimana individu yang paling kuat yang akan bertahan hidup.

Algoritma ini meniru proses biologi sehingga banyak istilah-istilah yang berkaitan dengan proses biologi. Dalam GA suatu potensi solusi dari suatu masalah adalah seorang individu yang dapat direpresentasikan dalam set parameter. Parameter itu dianggap sebuah genus dari kromosom, dimana semakin baik kualitas kromosom maka individu tersebut merupakan sebuah solusi dari permasalahan.

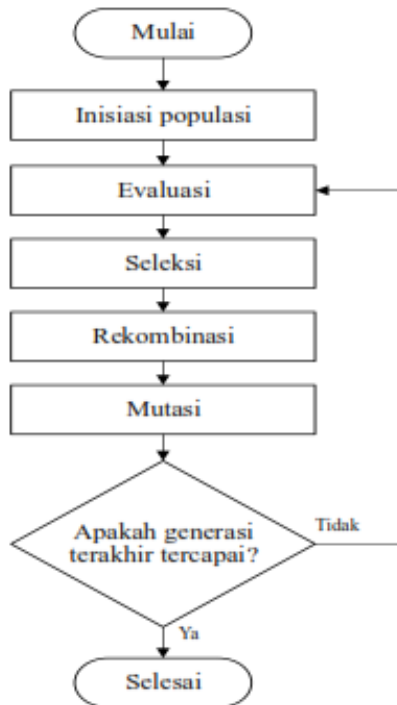
Suatu algoritma genetika (GA) standar membutuhkan dua hal dalam pendefinisianya, yaitu:

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

Representasi standar untuk solusinya ditentukan dalam sebuah *array of bit* (larik bit). Parameter utama yang membuat algoritma genetika ini baik adalah bagian-bagiannya yang dapat diakses dengan mudah karena ukurannya yang sudah pasti (*fixed*), sehingga memudahkan operasi persilangan sederhana. Pada algoritma ini digunakan representasi panjang variabel akan tetapi penerapan persilangan jauh lebih sulit.

Pada algoritma ini fungsi penghitung nilai kecocokan (*fitness*) direpresentasikan pada genetika yang digunakan untuk mengukur kualitas (*quality*) pada solusi yang telah direpresentasikan. Fungsi *fitness* ini tergantung pada masalah yang ada (*problem dependent*). Setelah memiliki representasi genetik dan fungsi *fitness* telah terdefinisi maka algoritma genetika akan melanjutkan untuk melakukan sampling populasi secara acak, kemudian meningkatkannya melalui tahapan yang berulang-ulang seperti mutasi, *crossover*, dan operator seleksi. [16]

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 Optimisasi menggunakan *Genetic Algorithm*

Tahapan-tahapan *gentic algorithm* diantaranya yaitu:

1. Inisiasi
Populasi awal dari kandidat solusi biasanya dicari secara acak dalam seluruh ruang pencarian.
2. Pengkodean kromosom
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

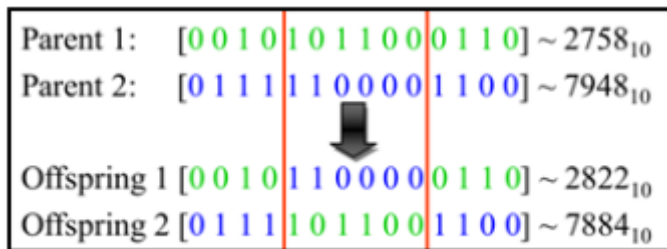
Ketika populasi yang telah diinisiasi atau populasi keturunan terbentuk, nilai fitness dari tiap individu dievaluasi. Nilai *fitness* merupakan nilai dari kemampuan solusi untuk bertahan.

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

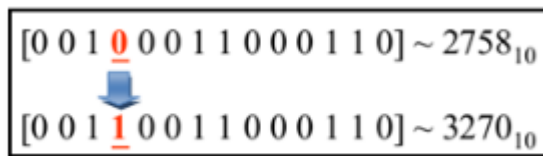
Tahap rekombinasi mengkombinasi bagian dari dua atau lebih solusi induk untuk membentuk individu baru dengan kemungkinan menjadi solusi yang lebih baik. Biasanya rekombinasi menggunakan mekanisme *crossover*. Pada gambar merupakan mekanisme *crossover* dimana pada kromosom induk dipotong oleh *crossover point* sehingga gen-gen pada tiap kromosom bertukar silang dan menghasilkan anak. [17]



Gambar 2.4 Mekanisme Crossover

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 2.5, salah satu gen pada kromosom awal dimutasi sehingga menghasilkan kromosom baru. [17]



Gambar 2.5 Mekanisme Mutasi

7. Penggantian

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

Pada tugas akhir ini parameter dari *Genetic Algorithm* ditentukan sebagai berikut

- Jumlah populasi : 100
- Jumlah iterasi : 200
- Elitism : 0,9
- Probabilitas *crossover* : 0,8
- Probabilitas mutasi : 0,01
- Jumlah bit : 20

2.11 *Duelist Algorithm*

Duelist Algorithm merupakan suatu metode optimisasi yang terinspirasi dari kemampuan seorang petarung dan cara meningkatkan kemampuannya dalam bertarung. Pada algoritma ini

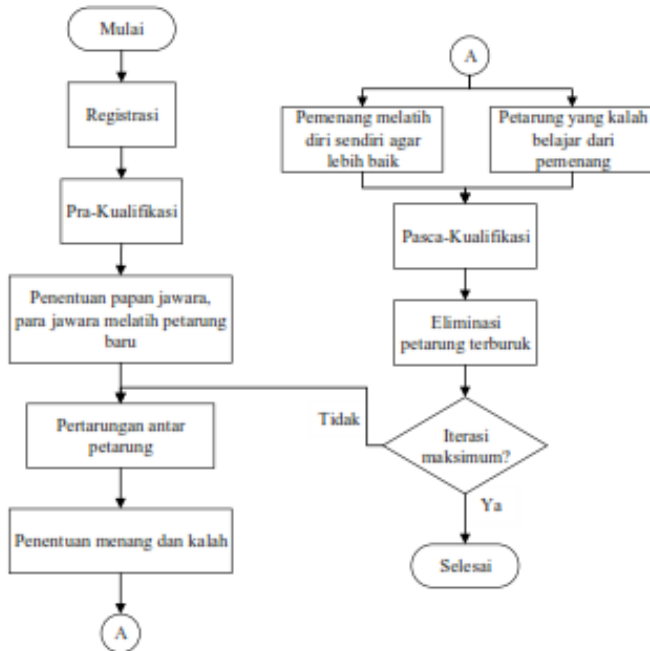
setiap individu dalam populasi disebut *duelist*. Dimana *duelist* ini akan saling bertarung dengan tujuan untuk menentukan pemenang dan yang kalah. Sang pemenang merupakan individu terkuat dan akan melakukan inovasi teknik agar dapat meningkatkan kemampuan bertarungnya. Sementara yang kalah dapat juga memenangkan pertarungan apabila mempunyai faktor keberuntungan.

Pertarungan dari setiap *duelist* ini layaknya *duel gladiator* dimana yang lebih kuat tidak selalu menang. Setiap pertarungan tentu menghasilkan pemenang dan yang kalah, namun yang kalah juga memiliki kesempatan untuk meningkatkan kemampuan bertarungnya dengan cara belajar dari lawan mereka. Sang pemenang pun juga akan melakukan inovasi untuk meningkatkan kemampuan bertarungnya.

Para pemenang ini juga akan melatih para *duelist* baru sampai *duelist* baru ini memiliki kemampuan seperti nya. Kemudian akan terjadi pertarungan lagi dimana *duelist* yang kalah akan dieliminasi karena telah terdapat para *duelist* baru. [18] Diagram blok dari DA dapat dilihat pada Gambar 2.6.

Parameter yang digunakan pada *duelist algorithm* ditentukan sebagai berikut

- Jumlah populasi : 100
- Maksimum generasi/iterasi : 150
- Kemampuan bertarung : 50
- Persentase juara : 0,1
- Probabilitas belajar : 0,8
- Probabilitas berinovasi : 0,1
- Koefisien keberuntungan : 0,01

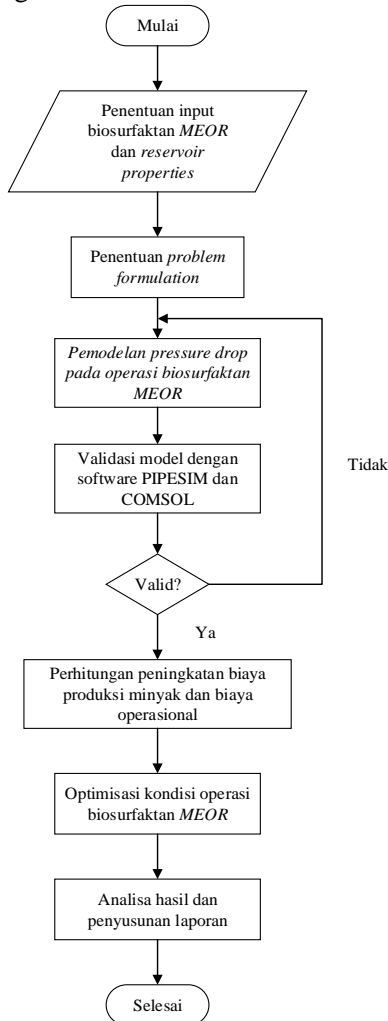


Gambar 2.6 *Duelist Alogrithm Flowchart*

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini dirancang dengan beberapa tahapan yang ditunjukkan pada diagram alir dibawah



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

3.1 Penentuan Input Biosurfaktan MEOR dan Reservoir Properties

Studi kasus untuk kondisi Biosurfaktan *Microbial Enhanced Oil Recovery* menggunakan data dari Morrow Consolidated Oil Field, Ohio, USA. Kondisi tekanan injeksi sebesar 1087 psia dan laju injeksi sebesar 0,3044 kg/s serta laju injeksi konsentrasi bakteri dan nutrisi masing-masing sebesar 0,2 kg/m³ dan 0,4 kg/m³ dengan porositas formasi batuan 0,07 dan permeabilitas 18,10 mD. Bentuk reservoir diasumsikan berbentuk silinder, dengan tidak ada aliran fluida yang keluar atau masuk ke *control volume* (reservoir).

3.2 Penentuan Fungsi Objektif

Fungsi objektif dibutuhkan untuk mengetahui tujuan dari optimisasi yang akan dilakukan. Tujuan dari optimisasi biosurfaktan MEOR adalah memaksimalkan laju produksi minyak pada *production well* untuk meningkatkan profit. Minyak yang dapat dihasilkan sebanding dengan jumlah nutrisi dan mikroba yang diinjeksikan, dan membutuhkan energi yang besar sehingga biaya operasional pun akan meningkat. Selain itu diperlukan pula biaya untuk *recovery* mikroba dan nutrisi yang akan digunakan kembali sebagai injeksi pada *injection well*. Maka dari itu pemodelan keuntungan yang akan dimaksimalkan adalah sebagai berikut

$$\begin{aligned}
 \textit{Profit} &= \textit{Pendapatan minyak mentah} \\
 &\quad - \textit{biaya mikroba} \\
 &\quad - \textit{biaya nutrisi} \\
 &\quad - \textit{biaya operasional pompa}
 \end{aligned}
 \tag{3.1}$$

Dimana variabel-variabel tersebut didapatkan dengan persamaan berikut

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

$$\begin{aligned} \text{Biaya pembelian mikroba} = \\ \text{Volume mikroba} \times \text{Biaya mikroba per satuan massa} \end{aligned} \quad (3.3)$$

$$\begin{aligned} \text{Biaya pembelian nutrisi} = \\ \text{Volume molase} \times \text{Biaya molase per satuan massa} \end{aligned} \quad (3.4)$$

$$\begin{aligned} \text{Biaya Operasional Pompa} = \\ \text{Daya pompa} \times \text{Lama operasi} \times \text{harga listrik} \end{aligned} \quad (3.5)$$

3.3 Pemodelan Biosurfaktan MEOR Operation

Operasi Biosurfaktan MEOR dimodelkan menjadi tiga bagian yaitu keadaan awal injeksi mikroba dan nutrisi pada *injection well*, keadaan kedua pada *reservoir formation*, serta keadaan akhir pada *production well*. Pada *injection well* mengalami perubahan tekanan dan temperatur yang diikuti oleh perubahan sifat dari fluida tersebut. Sehingga pada *injection well* dan *production well* dilakukan pemodelan *pressure drop* menggunakan persamaan Beggs-Brill, sedangkan untuk reservoir menggunakan persamaan Darcy. Pemodelan heat transfer pada *injection well* dan *production well* menggunakan persamaan 2.17 sedangkan untuk reservoir menggunakan persamaan 2.18.

3.4 Validasi Model dengan software PIPESIM dan COMSOL Multiphysics

Untuk mengetahui kebenaran model yang digunakan maka dilakukan validasi menggunakan perangkat lunak PIPESIM dan COMSOL *Multiphysics*. Untuk *injection well* dan *production well* divalidasi menggunakan PIPESIM karena cukup mensimulasikan fluida yang mengalir. Sedangkan untuk reservoir menggunakan

COMSOL untuk mensimulasikan reaksi pada media berpori dengan *setpoint* error <5%.

3.5 Perhitungan Peningkatan Produksi Minyak dan Biaya Operasional Injeksi

Laju produksi minyak mentah dihitung melalui nilai *additional recovery*, *cummulative production*, laju aliran massa. Selain itu, besarnya volume *original oil in place* 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.

$$Pt = Vpd \times Po \quad (3.6)$$

$$Vpd = Npc / t \quad (3.7)$$

$$Npc = \frac{A_p \times h \times \phi \times E_{vm}}{B_o} \times (S_{orw} - S_{of}) \quad (3.8)$$

$$E_{vm} = \frac{\frac{N_p}{N} + \frac{B_{oi}}{B_o} - 1}{\frac{B_{oi}}{B_o} (1 - \frac{S_{orw}}{S_{of}})} \quad (3.9)$$

$$B_o = 1 + \alpha (T_R - 60) \quad (3.10)$$

$$\alpha = 0.000288 + 8.04111 \times 10^{-6} API - (1.89 \times 10^{-7} (API)^2) \quad (3.11)$$

$$t = \frac{Vob}{v_{injeksi}} \quad (3.12)$$

$$Vob = VR \times \phi \quad (3.13)$$

$$v_{injeksi} = \frac{m_{injeksi}}{\rho_{biosurf}} \quad (3.14)$$

$$m_{injeksi} = M_{Biosurf} \times 3600 \times 24 \quad (3.15)$$

dimana:

- Vpd = laju produksi minyak (bbl/hari)
 Po = harga jual minyak (USD/bbl)
 Npc = minyak yang dipindah oleh surfaktan (bbl)
 A_p = luas penampang reservoir (m^2)
 h = ketebalan reservoir (m)
 E_{vm} = fraksi volume reservoir berkontak dengan surfaktan
 B_o = Rasio volume minyak pada tekanan dan temperatur reservoir terhadap volume yang *te-recover*
 S_{orw} = saturasi minyak pada reservoir setelah waterflooding
 S_{of} = saturasi minyak pada reservoir oleh biosurfaktan
 Np = total *recovery* minyak pada fase sebelumnya (STB)
 N = Estimasi jumlah minyak awal pada *reservoir* (STB)
 Boi = Rasio volume minyak awal yang terdapat pada *reservoir* terhadap volume minyak yang terproduksi
 Soi = Saturasi minyak awal
 API = derajat API dari minyak
 VR = volume *reservoir* (bbl)
 ϕ = porositas *reservoir* (%)
 t = lama waktu injeksi (hari)
 $M_{Biosurf}$ = konsentrasi biosurfaktan (wt%)
 $Vinjeksi$ = volume injeksi biosurfaktan (m^3 /hari)
 $minjeksi$ = massa injeksi biosurfaktan (kg/hari)
 Vob = volume *original oil in place/OOIP* (bbl)
 VR = volume *reservoir* (bbl)

Untuk mendapatkan biaya pengadaan *MEOR* maka dicari besar laju aliran massa dari setiap komponen *MEOR* dan harga satuan

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

$$B_{MEOR} = m_i N \times B_N + m_B \times B_B \quad (3.16)$$

dimana:

B_{MEOR} = biaya *MEOR* (USD/hari)

$m_i N$ = laju aliran massa *nutrisi* (bbl/hari)

m_B = laju aliran massa *bakteri* (bbl/hari)

B_N = harga satuan *nutrisi* (USD/bbl)

B_B = harga satuan *bakteri* (USD/bbl)

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.

$$W_p = (q \times \Delta P) / \eta \quad (3.17)$$

$$B_{OP} = W_p \times Y \times K \quad (3.18)$$

Dimana:

W_p = Besar usaha pompa persatuan waktu/ daya (Watt)

ΔP = *pressure drop* (Pa)

q = laju aliran massa fluida (m³/s)

η = efisiensi pompa (%)

B_{OP} = biaya operasional pompa (USD/hr)

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

3.6 Teknik Optimisasi

Optimisasi dilakukan untuk mendapatkan keadaan operasi yang maksimal pada Biosurfaktan MEOR sehingga fungsi objektif dapat maksimal. Teknik optimisasi menggunakan metode *stochastic algorithm* yakni Algoritma Genetika dan *Duelist Algorithm*. Variabel yang dioptimisasi yaitu konsentrasi bakteri, konsentrasi nutrisi, laju massa injeksi, *temperature* injeksi dan tekanan injeksi. Dengan *constrain* dari kelima variabel tersebut adalah

- Konsentrasi bakteri : $0,1 - 0,5 \text{ kg/m}^3$
- Konsentrasi nutrisi : $0,4 - 0,9 \text{ kg/m}^3$
- Laju massa injeksi : $0,3044 - 0,6044 \text{ kg/s}$
- *Temperature* injeksi : $30 - 40 \text{ }^\circ\text{C}$
- Tekanan injeksi : $1087 - 1100 \text{ psia}$

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Pemodelan pada *Injection Well*

Permodelaan tekanan pada *injection well* menggunakan metode Beggs-Brill sedangkan permodelan temperatur menggunakan persamaan perpindahan panas. Parameter input yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 4.1

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
Laju massa injeksi	0.3044	kg/s
Konsentrasi Molase	0,4	kg/m ³
Konsentrasi bakteri	0,2	kg/m ³
Temperatur injeksi	30	°C
Tebal tubing	0.005385	m
<i>Absolute roughness</i>	0.0001	m

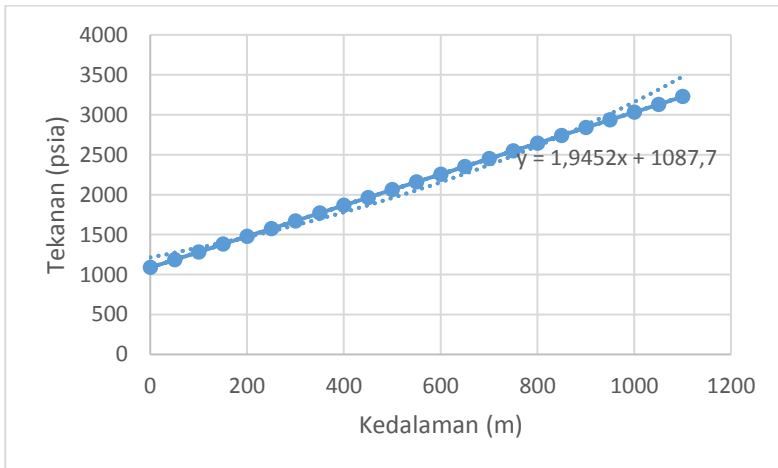
Pemodelan gradien tekanan dan temperatur pada *injection well* menggunakan persamaan Begg's-Brill telah divalidasi dengan perangkat lunak PIPESIM, didapatkan hasil rata-rata error untuk tekanan sebesar 0,19% dan temperatur sebesar 2,35%

Nilai error ini dikarenakan adanya perbedaan perhitungan properties pada software PIPESIM dan pemodelan dalam tugas akhir ini. Pada tugas akhir ini, perhitungan properties molase menggunakan regresi multivariable dari tekanan, temperatur dan

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

Hasil kurva tekanan injeksi pada *injection well* menggunakan persamaan Beggs-Brill dengan fungsi kedalaman sumur ditunjukkan pada Gambar 4.1. Gambar 4.1 menunjukkan bahwa tekanan injeksi mengalami kenaikan seiring dengan bertambahnya kedalaman dari *injection well*.

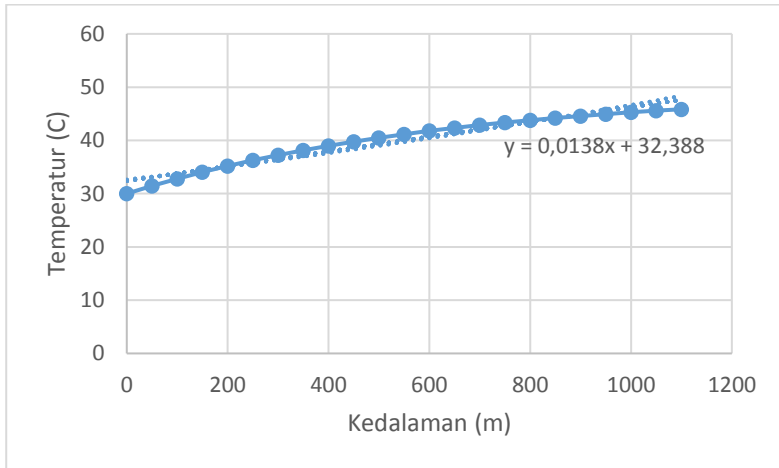
Faktor yang mempengaruhi besarnya *pressure loss* diantara perubahan elevasi karena kedalaman dari *injection well* adalah diakibatkan karena kekasaran pipa, panjang *tubing*, massa jenis dan viskositas dari fluida yang diinjeksikan.



Gambar 4. 1 Grafik tekanan terhadap kedalaman pada *injection well*

Sedangkan hasil kurva temperatur injeksi pada *injection well* menggunakan persamaan Beggs-Brill dengan fungsi kedalaman sumur ditunjukkan pada Gambar 4.2. Pada Gambar 4.2 menunjukkan bahwa temperatur 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.



Gambar 4.2 Grafik temperatur terhadap kedalaman pada *injection well*

4.2 Hasil Pemodelan pada Reservoir

Setelah melalui *injection well*, hasil metabolisme dari mikroba yang berupa biosurfaktan akan menuju ke reservoir dan mendorong minyak yang ada dalam formasi batuan. Pemodelan pada reservoir ini menggunakan persamaan Darcy dan persamaan perpindahan panas.

Parameter input untuk pemodelan pada reservoir dapat dilihat pada Tabel 4.2. Reservoir dalam penelitian ini diasumsikan berbentuk silinder dengan diameter silinder sama dengan tebal formasi reservoir yang sesuai dengan data sedangkan untuk temperatur silinder sama dengan temperatur reservoir mulai dari *injection well* hingga *production well*.

Pemodelan tekanan dan temperatur pada reservoir divalidasi menggunakan perangkat lunak COMSOL *Multiphysics*,

didapatkan rata-rata error untuk tekanan dan temperatur masing-masing sebesar 0,05% dan 0,371%. *Error* ini diakibatkan oleh perbedaan perhitungan *properties* dari surfaktan pada tugas akhir ini dengan perhitungan yang dilakukan oleh perangkat lunak COMSOL *Multiphysics*.

Tabel 4.2 Parameter Input Pemodelan Reservoir

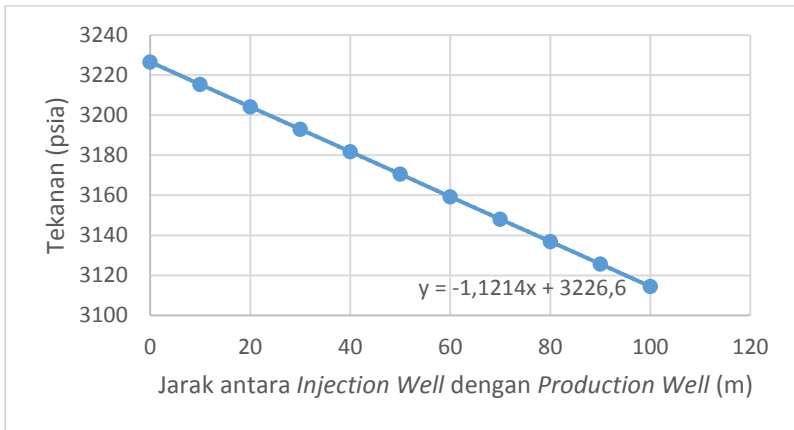
Parameter	Nilai	Satuan
Jarak <i>injection well</i> menuju <i>production well</i>	100	m
Temperatur Reservoir	31	°C
Tekanan Reservoir	1087	Psia
Permeabilitas	18,10	mD
Porositas	0.07	-
°API	41	°API

Tekanan surfaktan mengalami penurunan seiring bertambahnya jarak dari *injection well*. Hal ini terjadi karena selama melewati *reservoir*, tekanan fluida akan mengalami penurunan karena melewati media berpori. Besar *pressure drop* ini ditentukan oleh nilai permeabilitas batuan. Sedangkan untuk temperatur juga mengalami penurunan seiring bertambahnya jarak dari *injection well*, karena perubahan panas yang terjadi antara *reservoir* dan surfaktan. Grafik tekanan dan temperatur pada reservoir dapat dilihat pada Gambar 4.3 dan Gambar 4.4.

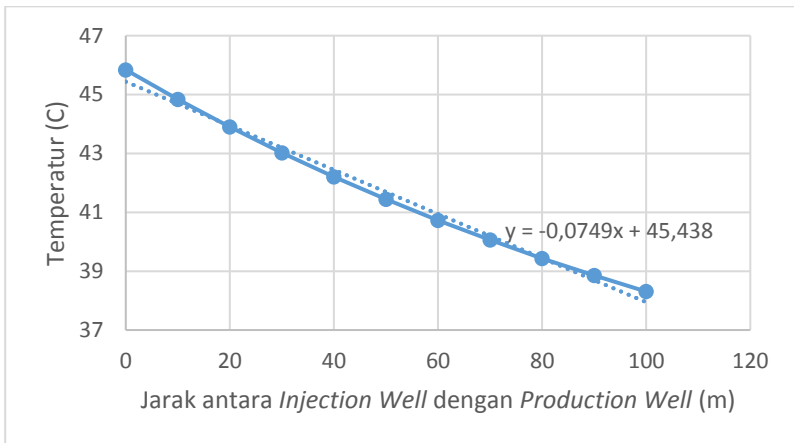
4.3 Hasil Pemodelan pada *Production Well*

Untuk pemodelan pada *production well* menggunakan parameter input dari hasil pemodelan pada *reservoir*, dimana pada *production well* ini pemodelan menggunakan metode Beggs-Brill. Hasil pemodelan divalidasi menggunakan software PIPESIM didapatkan rata-rata error untuk tekanan dan temperatur masing-

masing sebesar 0,13% dan 1,81% yang ditunjukkan pada Gambar 4.5 dan Gambar 4.6.



Gambar 4. 3 Grafik Tekanan pada Reservoir



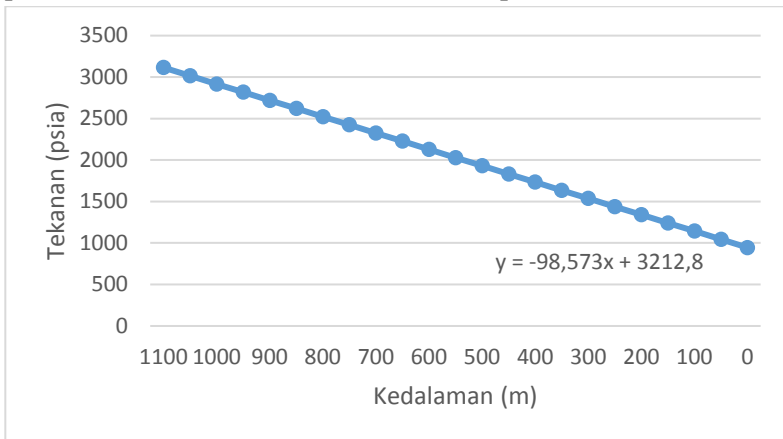
Gambar 4. 4 Grafik Temperatur pada Reservoir

Dari Gambar 4.5 dan 4.6 dapat dilihat bahwa tekanan dan temperatur mengalami penurunan seiring mendekatnya ke permukaan bumi. Hal ini dikarenakan perubahan elevasi setelah dari reservoir, yang menyebabkan tekanan hidrostatik berkurang

pada arah aliran fluida campuran. Penurunan tekanan juga disebabkan oleh rugi gesekan antara fluida dengan dinding-dinding pipa. Seiring dengan menurunnya tekanan maka temperatur pun mengalami penurunan.

4.4 Hasil Perhitungan *Oil Recovery* dan Biaya Operasional

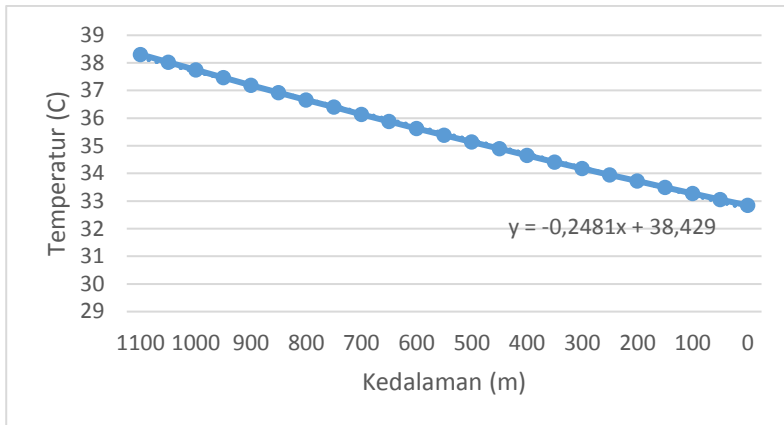
Oil recovery merupakan jumlah *crude oil* yang terproduksi setelah penginjeksian mikroba dan nutrisi dimana mikroba tersebut menghasilkan surfaktan yang menuju ke *reservoir*. Berdasarkan kondisi input yang ditunjukkan pada Tabel 4.1 diperoleh nilai laju produksi *crude oil* sebesar 1040,05 barrel per hari.



Gambar 4. 5 Grafik Tekanan pada *Production Well*

Pendapatan merupakan hasil penjualan minyak per hari, dan dinyatakan dalam persamaan (3.6). Dengan laju produksi minyak 1040,05 barrel per hari, dan harga jual minyak yang digunakan sebagai acuan adalah harga minyak mentah jenis *West Texas Intermediate* (WTI) pada jangka 15 April 2019 hingga Mei 2019, yakni 63.10 USD/bbl, maka didapatkan nilai pendapatan sebesar 65627,3202 USD/hari.

Volume bakteri dan nutrisi yang terbawa ke production line masing-masing sebesar $0,2 \text{ kg/m}^3$ dan $0,4 \text{ kg/m}^3$ sehingga didapatkan biaya sebesar 14872,27 USD/hari. Sedangkan biaya operasional kompresor dapat dihitung menggunakan persamaan (3.17) dan (3.18), sehingga didapatkan biaya operasional pompa sebesar 128,751 USD/hari.



Gambar 4. 6 Grafik Temperatur pada *Production Well*

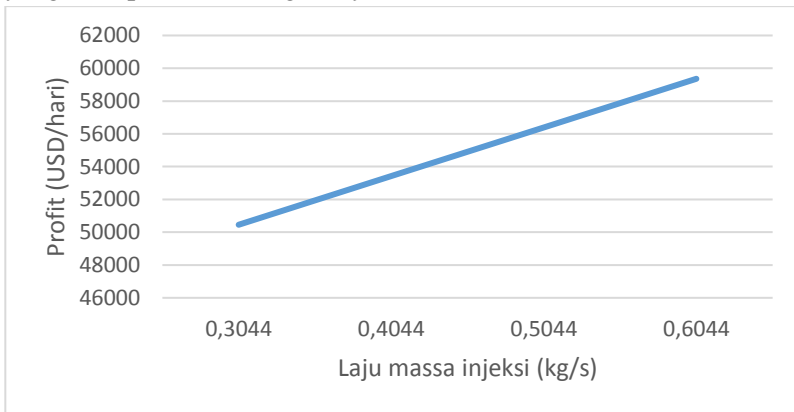
Perhitungan nilai profit merupakan total pendapatan dikurangi dengan biaya pengadaan bakteri dan nutrisi, dan biaya operasional pompa pada kondisi operasi parameter input sesuai dengan Tabel 4.1, dan didapatkan hasil perhitungan ditunjukkan pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3 Perhitungan Profit Biosurfaktan MEOR

Parameter	Nilai	Satuan
Pendapatan	65627,3202	USD/hari
Biaya Bakteri dan Nutrisi	14872,27	USD/hari
Biaya Operasional Pompa	128,751	USD/hari
Profit	50626,3	USD/hari

4.5 Analisa Sensitifitas

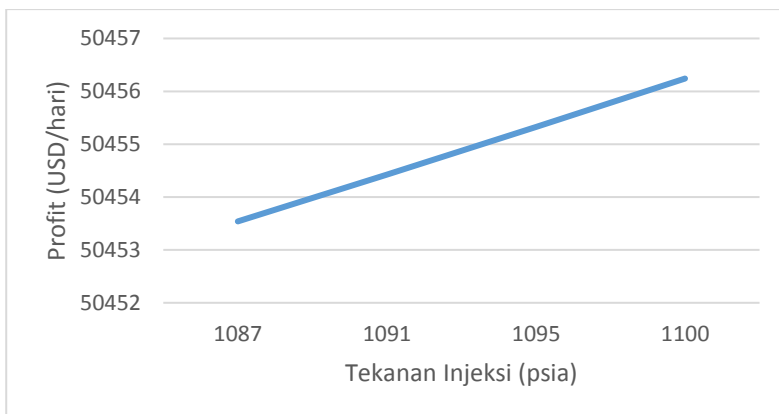
Analisa sensitifitas ini digunakan untuk mengetahui pengaruh perubahan variabel yang dioptimisasi terhadap nilai *objective function* dalam hal ini merupakan profit. Pada Gambar 4.7 menampilkan pengaruh perubahan laju aliran massa injeksi terhadap profit. Berdasarkan gambar tersebut menunjukkan bahwa semakin besar laju injeksi maka akan menyebabkan profit semakin meningkat. Hal ini disebabkan karena laju aliran massa injeksi dapat mempengaruhi biosurfaktan yang dihasilkan oleh bakteri yang mampu mendorong minyak.



Gambar 4.7 Grafik Analisa Sensitifitas perubahan laju aliran massa injeksi terhadap profit

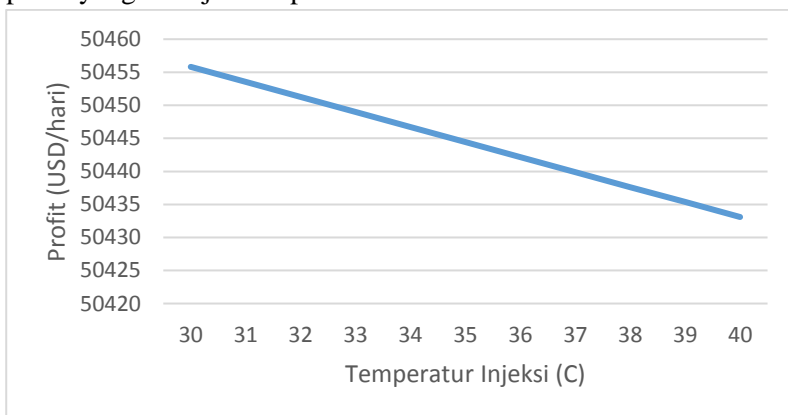
Pada Gambar 4.8 menunjukkan hubungan antara tekanan injeksi dengan profit. Berdasarkan grafik tersebut dapat diketahui bahwa semakin besar tekanan injeksi maka profit yang dihasilkan juga akan semakin besar.

Sedangkan pada Gambar 4.9 menunjukkan hubungan antara temperatur injeksi dengan profit. Berdasarkan grafik tersebut dapat diketahui bahwa semakin besar temperatur injeksi akan membuat penurunan profit yang dihasilkan.

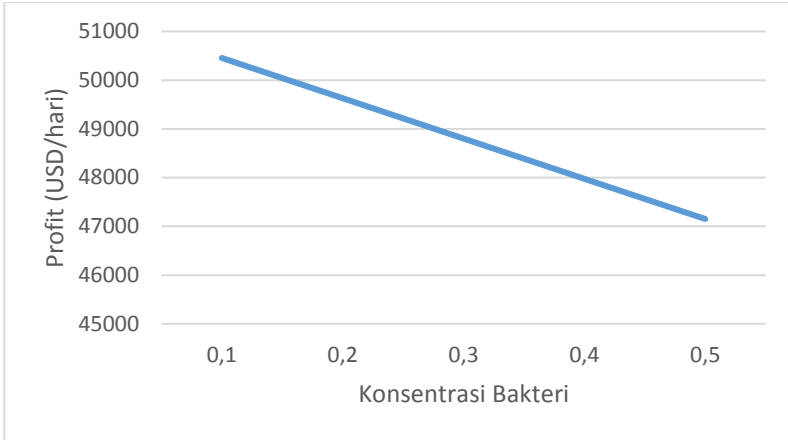


Gambar 4.8 Grafik Analisa Sensitifitas perubahan tekanan injeksi dengan profit

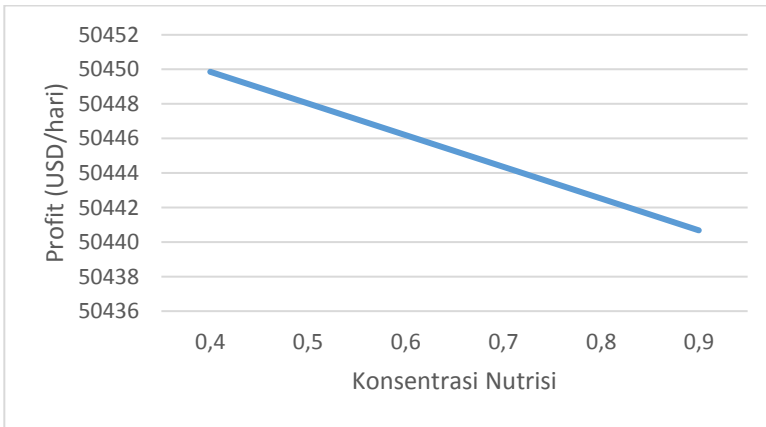
Analisa sensitifitas selanjutnya yakni hubungan antara perubahan konsentrasi mikroba dan konsentrasi bakteri terhadap profit yang ditunjukkan pada Gambar 4.10 dan Gambar 4.11.



Gambar 4.9 Grafik Analisa Sensitifitas perubahan temperatur injeksi terhadap profit



Gambar 4. 10 Grafik Analisa Sensitifitas perubahan konsentrasi bakteri terhadap profit



Gambar 4. 11 Grafik Analisa Sensitifitas perubahan konsentrasi nutrisi terhadap profit

Dari beberapa variabel tersebut yang dapat meningkatkan profit yaitu laju aliran massa injeksi dan tekanan injeksi. Semakin besar laju aliran massa maka semakin besar pula massa yang diperlukan, dalam hal ini konsentrasi bakteri dan nutrisi. Namun,

semakin banyak konsentrasi bakteri dan nutrisi menyebabkan penurunan profit. Sehingga diperlukan penentuan kombinasi yang tepat antar variabel yaitu laju aliran massa, temperatur injeksi, tekanan injeksi dan konsentrasi mikroba dan nutrisi agar profit yang dihasilkan dapat maksimal.

4.6 Teknik Optimisasi

Optimisasi dilakukan untuk mencari nilai optimum dari variabel yang dioptimisasi yaitu laju aliran massa, tekanan, temperatur, dan konsentrasi bakteri dan nutrisi. Dengan didapatkan nilai optimum dari setiap variabel tersebut maka fungsi objektif dalam hal ini profit yang dihasilkan juga maksimal. Profit merupakan pendapatan total yang dikurangi dengan biaya operasi yang meliputi biaya pengadaan dan biaya operasional pompa.

Teknik optimisasi yang digunakan pada tugas akhir ini adalah *stochastics algorithm* yang berupa GA dan DA. Hasil variabel yang dioptimisasi dapat dilihat pada Tabel 4.4 sedangkan hasil perhitungan profit setelah dioptimisasi dapat dilihat pada Tabel 4.5 dan Tabel 4.6.

Tabel 4.4 Variabel Hasil Optimisasi

Variabel yang dioptimisasi	Teknik Optimisasi	
	GA	DA
Konsentrasi Bakteri	0,2	0,2
Konsentrasi Nutrisi	0,9	0,8
Laju aliran massa	0,6044	0,6
Tekanan Injeksi	1100	1098
Temperatur Injeksi	30	30

Perbandingan hasil profit dari kedua teknik optimisasi dengan sebelum dioptimisasi dapat dilihat pada Tabel 4.7. Pada tabel

tersebut ditunjukkan pula peningkatan profit dari profit awal sebelum dioptimisasi.

Tabel 4.5 Perhitungan profit Biosurfaktan MEOR setelah dioptimisasi dengan GA

Parameter	Nilai	Satuan
Pendapatan	208420	USD/hari
Biaya Pengadaan Bakteri dan Nutrisi	23108,28	USD/hari
Biaya Operasional Pompa	1059,46	USD/hari
Profit	91292,26	USD/hari

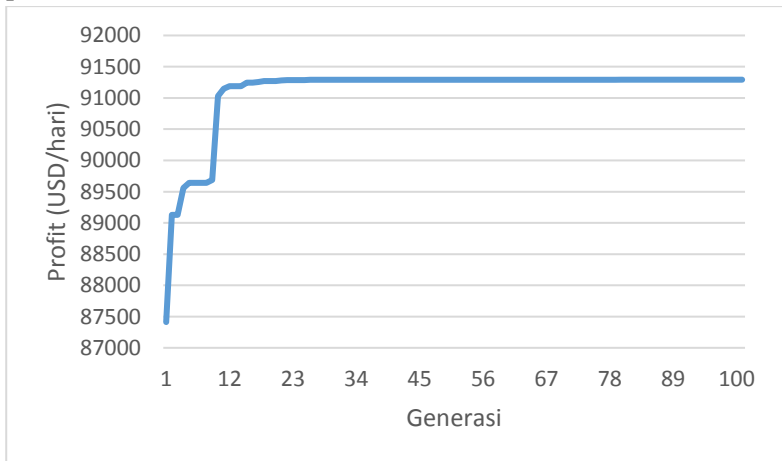
Tabel 4.6 Perhitungan Profit Biosurfaktan MEOR setelah dioptimisasi dengan DA

Parameter	Nilai	Satuan
Pendapatan	109010	USD/hari
Biaya Pengadaan Bakteri dan Nutrisi	21932,99	USD/hari
Biaya Operasional Pompa	826,01	USD/hari
Profit	86251	USD/hari

Tabel 4.7 Hasil Profit setelah dioptimisasi

Teknik Optimisasi	Profit	Satuan	Peningkatan
GA	91292,26	USD/hari	80,32%
DA	86251	USD/hari	70,36%

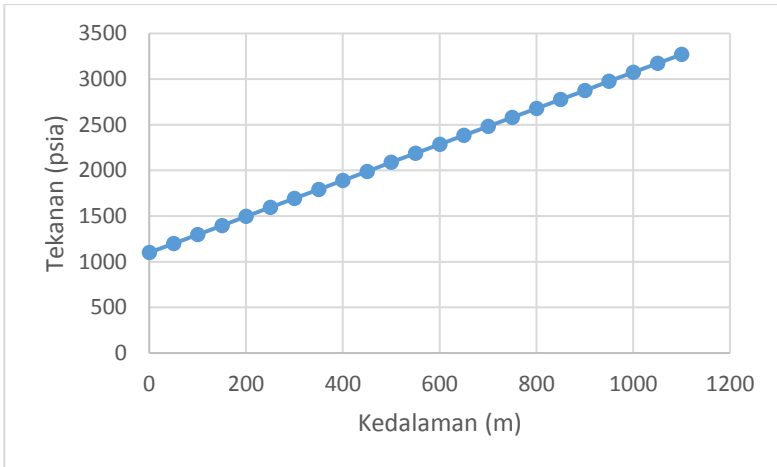
Berdasarkan profit yang dihasilkan, diperoleh hasil optimisasi terbaik menggunakan teknik optimisasi GA yang menghasilkan profit sebesar 91292,26 USD/hari dengan peningkatan sebesar 80,32%. Hasil plot fitness terbaik pada optimisasi dapat dilihat pada Gambar 4.12.



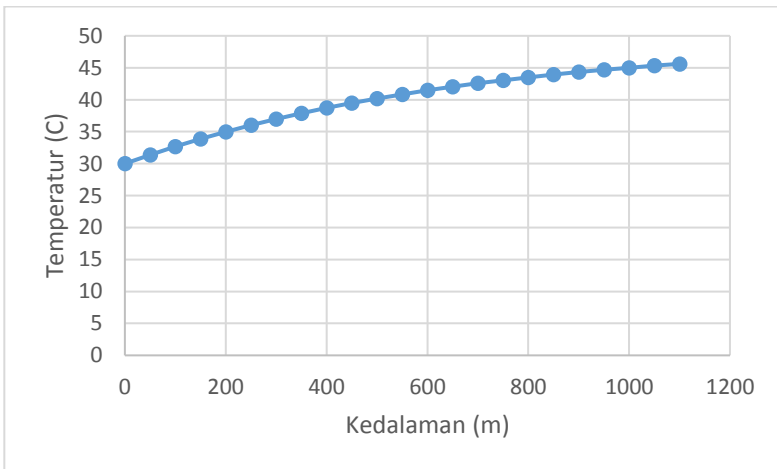
Gambar 4. 12 Plot fitness terbaik GA

Dengan parameter input dari hasil optimisasi GA yang sesuai dengan Tabel 4.5 maka grafik tekanan dan temperatur kondisi operasi biosurfaktan MEOR mulai *injection well* hingga *production well* ditunjukkan pada Gambar 4.13 hingga 4.18.

Kondisi operasi setelah dioptimisasi tidak jauh beda dengan sebelum dioptimisasi. Pada *injection well* dikarenakan laju massa injeksi lebih besar maka dihasilkan tekanan yang besar seiring semakin bertambahnya kedalaman. Ketika tekanan yang besar maka dihasilkan pula temperatur yang besar seiring bertambahnya kedalaman. Grafik gradien tekanan dan temperatur pada *injection well* setelah dioptimisasi dapat dilihat pada gambar 4.13 dan gambar 4.14.



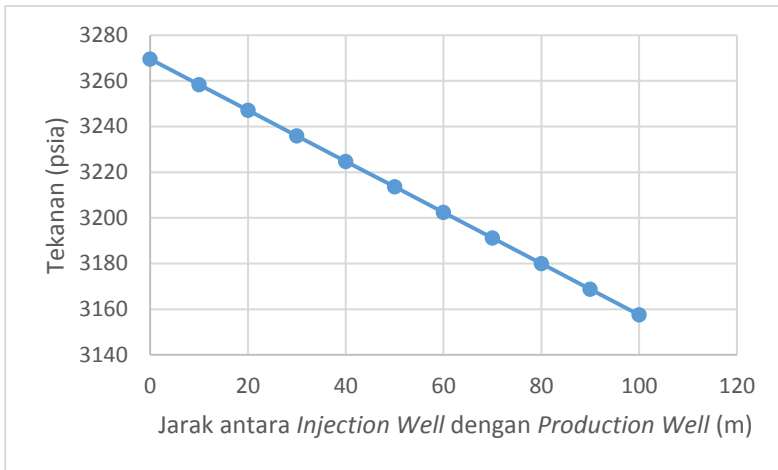
Gambar 4. 13 Grafik tekanan pada *injection well* setelah optimisasi



Gambar 4. 14 Grafik temperatur pada *injection well* setelah optimisasi

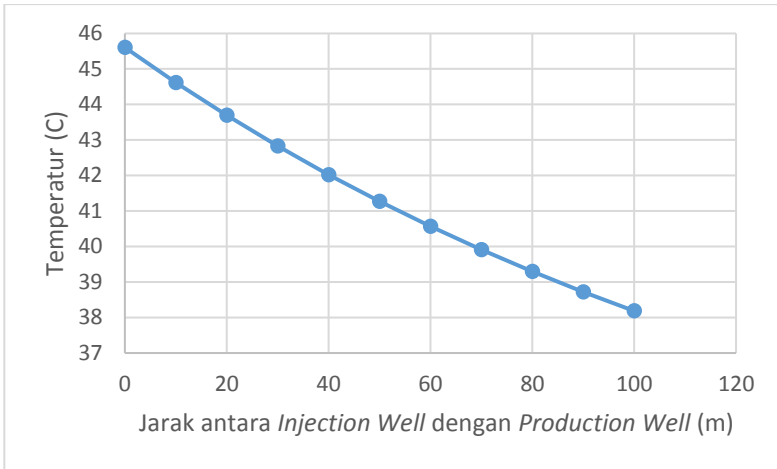
Pada reservoir juga terjadi penurunan tekanan dan temperatur yang disebabkan oleh media berpori. Hal ini juga tidak jauh

berbeda dengan kondisi sebelum dioptimisasi, namun setelah dioptimisasi tekanan yang dihasilkan pada reservoir lebih besar dikarenakan tekanan injeksi dan laju massa injeksi yang besar. Grafik gradien temperatur dan tekanan pada reservoir dapat dilihat pada gambar 4.15 dan gambar 4.16.

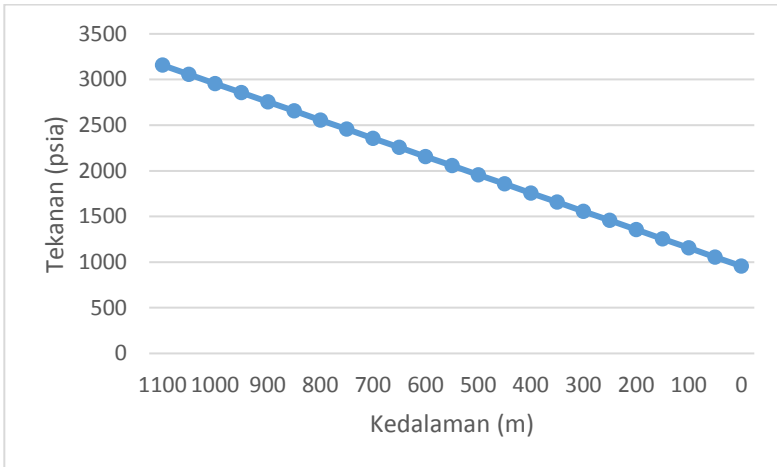


Gambar 4. 15 Grafik tekanan pada reservoir setelah optimisasi

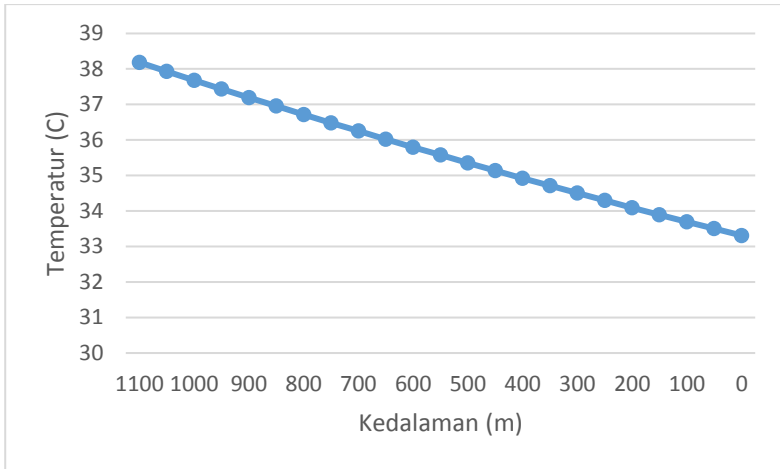
Pada *production well* juga tidak jauh berbeda dengan sebelum dioptimisasi. Tekanan dan temperatur mengalami penurunan seiring mendekatnya ke permukaan bumi. Tekanan *outlet* dari *production well* sedikit lebih tinggi setelah dilakukan optimisasi karena tekanan dari reservoir yang lebih tinggi. Grafik gradien tekanan dan temperatur pada *production well* dapat dilihat pada gambar 4.17 dan gambar 4.18.



Gambar 4. 16 Grafik temperatur pada reservoir setelah optimisasi



Gambar 4. 17 Grafik tekanan pada *production well* setelah optimisasi



Gambar 4. 18 Grafik temperatur pada *production well* setelah optimisasi

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Adapun kesimpulan yang didapat dari hasil Tugas Akhir mengenai optimisasi kondisi operasi biosurfaktan *Mircobial Enhanced Oil Recovery* adalah

1. Biosurfaktan *Microbial Enhanced Oil Recovery* dapat dimodelkan dengan baik yang terbagi menjadi 3 bagian yakni *injection well*, reservoir dan *production well*. Pemodelan pada *injection well* untuk tekanan dan temperatur masing-masing dihasilkan model $y = 1,9452x + 1087,7$ dan $y = 0,0138x + 32,388$ yang menunjukkan rata-rata *error* untuk *pressure* dan *temperature* masing-masing sebesar 0,19% dan 2,35%. Pemodelan *production well* untuk tekanan dan temperatur masing-masing dihasilkan model $y = -98,573x + 3212,8$ dan $y = -0.2481x + 38,429$ yang menunjukkan rata-rata *error* untuk *pressure* dan *temperature* masing-masing sebesar 0,13% dan 1,81%. Kedua pemodelan ini dibandingkan dengan simulasi dari *software* PIPESIM. Sedangkan pemodelan pada reservoir untuk tekanan dan temperatur masing-masing dihasilkan model $y = -1,1214x + 3226,6$ dan $y = -0,0749x + 45,438$ dimana *pressure* dan *temperature* memiliki rata-rata *error* masing-masing sebesar 0,05% dan 0,371% yang dibandingkan dengan *software* COMSOL *Multiphysics*.
2. Berdasarkan analisis sensitifitas, profit akan meningkat ketika variabel laju aliran massa injeksi dan tekanan injeksi juga ditingkatkan. Dengan melakukan optimisasi menggunakan *Genetic Algorithm* (GA) dan *Duelist Algorithm* (DA) terjadi peningkatan profit dimana paling optimum menggunakan GA.

Terjadi peningkatan profit sebesar 80,32% dari 50626,3 USD/hari menjadi 91292,26 USD/hari.

5.2 Saran

Hal yang dapat penulis sarankan untuk penelitian selanjutnya adalah

1. Melakukan penelitian MEOR dengan menggunakan jenis bakteri yang lainnya.
2. Mendapatkan karakteristik (properties) MEOR yang sesuai dengan kondisi sesungguhnya agar hasil permodelan lebih akurat.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] B. Y. S. Kokal, A. Al-kaabi, E. Advanced, and S. Aramco, "Worldwide EOR oil production," pp. 64–69, 2010.
- [2] R. Sen, "Biotechnology in petroleum recovery: The microbial EOR," *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 34, no. 6, pp. 714–724, 2008.
- [3] P. Sivasankar, A. Rajesh Kanna, G. Suresh Kumar, and S. N. Gummadi, "Numerical modelling of biophysicochemical effects on multispecies reactive transport in porous media involving *Pseudomonas putida* for potential microbial enhanced oil recovery application," *Bioresour. Technol.*, vol. 211, pp. 348–359, 2016.
- [4] J. Lin *et al.*, "A study on the microbial community structure in oil reservoirs developed by water flooding," *J. Pet. Sci. Eng.*, vol. 122, pp. 354–359, 2014.
- [5] S. M. Nielsen, I. Nesterov, and A. A. Shapiro, "Microbial enhanced oil recovery—a modeling study of the potential of spore-forming bacteria," *Comput. Geosci.*, vol. 20, no. 3, pp. 567–580, 2016.
- [6] C. H. Gao, "Microbial Enhanced Oil Recovery in Carbonate Reservoir : An Experimental Study," *SPE EOR Conf.*, pp. 1–8, 2011.
- [7] P. Sivasankar and S. K. Govindarajan, "Numerical modelling of microbial enhanced oil recovery process under the effect of reservoir temperature, pH and microbial sorption kinetics," *Soc. Pet. Eng. - SPE Asia Pacific Enhanc. Oil Recover. Conf. EORC 2015*, 2015.
- [8] P. Sivasankar and S. K. Govindarajan, "Modelling the coupled effects of temperature, injection rate and microbial kinetic parameters on oil recovery by microbial flooding," *Soc. Pet. Eng. - SPE Kingdom Saudi Arab. Annu. Tech. Symp. Exhib.*, 2016.
- [9] H. Amani, M. Hossein, M. Haghghi, and M. Reza, "Journal of Petroleum Science and Engineering Comparative study of biosurfactant producing bacteria in MEOR applications," *J. Pet. Sci. Eng.*, vol. 75, no. 1–2, pp. 209–214, 2010.

- [10] H. D. Beggs and J. P. Brill, “130069859-Beggs-Brill-A-Study-of-Two-Phase-Flow-in-Inclined-Pipes-1973-JPT.pdf.” 1973.
- [11] A. Amundsen, S. Marie Nielsen, and X. Raynaud, “Microbial Enhanced Oil Recovery: Modeling and Numerical Simulations,” no. July, 2015.
- [12] S. M. Nielsen, *Microbial Enhanced Oil Recovery - Advanced Reservoir Simulation*, no. July. 2010.
- [13] L. Dake, *Fundamentals of Reservoir Engineering*, 1978.
- [14] T. V. Golf-Racht, *Fundamentals of Fractured Reservoir Engineering*, Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company, 1982.
- [15] F. P. Incropera, D. P. Dewitt, T. L. Bergman and A. S. Lavine, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2005.
- [16] M. Mitchell, *Genetic Algorithm : An Overview, Complexity*, 1995.
- [17] C. G. Gutiérrez-Arriaga, M. Serna-González, J. M. PonceOrtega, 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.
- [18] 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.

LAMPIRAN

Lampiran A Validasi pada *Injection Well*

Validasi model pada *Injection Well* ini menggunakan software PIPESIM dengan membandingkan hasil permodelan dengan hasil simulasi. Pada Tabel A1 yang divariasikan adalah nilai laju aliran massa injeksi dengan nilai berada diantara 0,3 hingga 0,6 kg/s. Untuk tekanan dan temperatur pada *injection well* dihasilkan rata-rata error masing-masing sebesar 0,19% dan 2,35%.

Tabel A1 Validasi model dengan variasi laju aliran massa injeksi

m	Elevasi	PIPESIM		Model		Error P	Error T
		P	T	P	T		
0,3	0	1087	30	1087	30	0	0
0,3	50	1183,90	31,87	1184,42	31,45	0,04	1,33
0,3	100	1281,20	32,68	1281,83	32,79	0,05	0,34
0,3	150	1379,00	33,46	1379,23	34,03	0,02	1,72
0,3	200	1473,50	34,22	1476,63	35,18	0,21	2,80
0,3	250	1572,00	34,98	1574,01	36,25	0,13	3,61
0,3	300	1670,60	35,74	1671,38	37,23	0,05	4,18
0,3	350	1766,23	36,49	1768,74	38,15	0,14	4,53
0,3	400	1862,10	37,24	1866,08	38,99	0,21	4,69
0,3	450	1961,60	37,99	1963,40	39,77	0,09	4,67
0,3	500	2050,00	38,74	2060,71	40,49	0,52	4,51
0,3	550	2149,84	39,49	2158,00	41,16	0,38	4,21
0,3	600	2250,43	40,25	2255,26	41,77	0,21	3,79
0,3	650	2351,17	41,00	2352,51	42,34	0,06	3,27
0,3	700	2446,80	41,75	2449,73	42,87	0,12	2,67
0,3	750	2545,90	42,51	2546,93	43,35	0,04	1,99
0,3	800	2642,96	43,26	2644,10	43,80	0,04	1,25
0,3	850	2740,40	44,01	2741,25	44,21	0,03	0,47
0,3	900	2837,53	44,76	2838,37	44,59	0,03	0,37
0,3	950	2950,14	45,51	2935,47	44,94	0,50	1,24
0,3	1000	3031,29	46,26	3032,54	45,27	0,04	2,14

Tabel A1 lanjutan

m	Elevasi	PIPESIM		Model		Error	
		P	T	P	T	P	T
0,3	1050	3129,92	47,01	3129,59	45,57	0,01	3,08
0,3	1100	3222,32	47,77	3226,61	45,84	0,13	4,03
0,4	0	1087	30	1087	30	0	0
0,4	50	1184,80	31,77	1184,61	31,43	0,02	1,07
0,4	100	1282,10	32,68	1282,22	32,76	0,01	0,24
0,4	150	1379,90	33,66	1379,82	33,99	0,01	0,98
0,4	200	1474,40	34,02	1477,42	35,13	0,20	3,24
0,4	250	1572,90	34,98	1575,00	36,18	0,13	3,43
0,4	300	1671,50	35,74	1672,56	37,16	0,06	3,99
0,4	350	1767,13	36,49	1770,11	38,07	0,17	4,33
0,4	400	1863,00	37,24	1867,65	38,91	0,25	4,48
0,4	450	1962,50	37,99	1965,17	39,69	0,14	4,46
0,4	500	2050,90	38,74	2062,67	40,41	0,57	4,29
0,4	550	2150,74	39,49	2160,15	41,07	0,44	4,00
0,4	600	2251,33	40,25	2257,61	41,69	0,28	3,58
0,4	650	2352,07	41,00	2355,05	42,26	0,13	3,06
0,4	700	2447,70	41,75	2452,47	42,78	0,19	2,47
0,4	750	2546,80	42,51	2549,86	43,27	0,12	1,80
0,4	800	2643,86	43,26	2647,23	43,72	0,13	1,07
0,4	850	2741,30	44,21	2744,58	44,13	0,12	0,16
0,4	900	2838,43	44,76	2841,90	44,52	0,12	0,54
0,4	950	2951,04	45,51	2939,19	44,87	0,40	1,40
0,4	1000	3032,19	46,26	3036,46	45,20	0,14	2,30
0,4	1050	3130,82	46,81	3133,70	45,50	0,09	2,81
0,4	1100	3223,22	47,37	3230,91	45,78	0,24	3,36
0,5	0	1087	30	1087	30	0	0
0,5	50	1184,40	31,87	1184,87	31,41	0,04	1,43
0,5	100	1281,70	32,98	1282,73	32,73	0,08	0,76
0,5	150	1379,50	33,76	1380,59	33,95	0,08	0,56
0,5	200	1474,00	34,52	1478,44	35,08	0,30	1,60

Tabel A1 Lanjutan

m	Elevasi	PIPESIM		Model		Error	Error
		P	T	P	T	P	T
0,5	250	1572,50	35,28	1576,27	36,13	0,24	2,39
0,5	300	1671,10	36,04	1674,09	37,10	0,18	2,94
0,5	350	1766,73	36,79	1771,90	38,00	0,29	3,29
0,5	400	1862,60	37,54	1869,69	38,84	0,38	3,45
0,5	450	1962,10	38,29	1967,46	39,61	0,27	3,44
0,5	500	2050,50	39,04	2065,22	40,33	0,72	3,29
0,5	550	2150,34	39,79	2162,95	40,99	0,59	3,01
0,5	600	2250,93	40,55	2260,67	41,61	0,43	2,62
0,5	650	2351,67	41,30	2358,36	42,18	0,28	2,13
0,5	700	2447,30	42,05	2456,03	42,71	0,36	1,55
0,5	750	2546,40	42,81	2553,68	43,19	0,29	0,91
0,5	800	2643,46	43,56	2651,30	43,64	0,30	0,20
0,5	850	2740,90	44,31	2748,90	44,06	0,29	0,56
0,5	900	2838,03	45,06	2846,47	44,45	0,30	1,36
0,5	950	2950,64	45,81	2944,02	44,80	0,22	2,20
0,5	1000	3031,79	46,56	3041,54	45,13	0,32	3,07
0,5	1050	3130,42	47,31	3139,03	45,43	0,28	3,97
0,5	1100	3222,82	48,07	3236,50	45,72	0,42	4,89
0,6	0	1087	30	1087	30	0	0
0,6	50	1184,10	31,99	1185,19	31,40	0,09	1,84
0,6	100	1281,20	32,80	1283,37	32,70	0,17	0,29
0,6	150	1379,00	33,58	1381,54	33,91	0,18	0,99
0,6	200	1475,91	34,34	1479,70	35,03	0,26	2,00
0,6	250	1574,41	35,10	1577,85	36,07	0,22	2,76
0,6	300	1673,01	35,86	1675,99	37,04	0,18	3,29
0,6	350	1768,64	36,61	1774,11	37,94	0,31	3,62
0,6	400	1864,51	37,36	1872,22	38,77	0,41	3,76
0,6	450	1964,01	38,11	1970,31	39,54	0,32	3,74
0,6	500	2052,41	38,86	2068,38	40,26	0,78	3,58
0,6	550	2152,25	39,61	2166,43	40,92	0,66	3,29

Tabel A1 Lanjutan

m	Elevasi	PIPESIM		Model		Error P	Error T
		P	T	P	T		
0,6	600	2252,84	40,37	2264,46	41,54	0,52	2,89
0,6	650	2353,58	41,12	2362,47	42,11	0,38	2,39
0,6	700	2449,21	41,87	2460,45	42,63	0,46	1,81
0,6	750	2548,31	42,63	2558,42	43,12	0,40	1,16
0,6	800	2645,37	43,38	2656,36	43,57	0,42	0,45
0,6	850	2742,81	44,13	2754,27	43,99	0,42	0,31
0,6	900	2839,94	44,88	2852,16	44,38	0,43	1,11
0,6	950	2952,55	45,63	2950,02	44,74	0,09	1,95
0,6	1000	3033,70	46,38	3047,85	45,07	0,47	2,83
0,6	1050	3132,33	47,13	3145,66	45,37	0,43	3,73
0,6	1100	3226,73	47,89	3243,44	45,66	0,52	4,66

Pada tabel A2 yang divariasikan adalah nilai pressure dengan nilai berada diantara 1087 hingga 1100 psia.

Tabel A2 Validasi model dengan variasi pressure

P	Elevasi	PIPESIM		Model		Error P	Error T
		P	T	P	T		
1087	0	1087	30	1087	30	0	0
1087	50	1183,90	31,87	1184,42	31,45	0,04	1,33
1087	100	1281,20	32,68	1281,83	32,79	0,05	0,34
1087	150	1379,00	33,46	1379,23	34,03	0,02	1,72
1087	200	1473,50	34,22	1476,63	35,18	0,21	2,80
1087	250	1572,00	34,98	1574,01	36,25	0,13	3,61
1087	300	1670,60	35,74	1671,38	37,23	0,05	4,18
1087	350	1766,23	36,49	1768,74	38,15	0,14	4,53
1087	400	1862,10	37,24	1866,08	38,99	0,21	4,69
1087	450	1961,60	37,99	1963,40	39,77	0,09	4,67
1087	500	2050,00	38,74	2060,71	40,49	0,52	4,51
1087	550	2149,84	39,49	2158,00	41,16	0,38	4,21
1087	600	2250,43	40,25	2255,26	41,77	0,21	3,79

Tabel A2 Lanjutan

P	Elevasi	PIPESIM		Model		Error P	Error T
		P	T	P	T		
1087	650	2351,17	41,00	2352,51	42,34	0,06	3,27
1087	700	2446,80	41,75	2449,73	42,87	0,12	2,67
1087	750	2545,90	42,51	2546,93	43,35	0,04	1,99
1087	800	2642,96	43,26	2644,10	43,80	0,04	1,25
1087	850	2740,40	44,01	2741,25	44,21	0,03	0,47
1087	900	2837,53	44,76	2838,37	44,59	0,03	0,37
1087	950	2950,14	45,51	2935,47	44,94	0,50	1,24
1087	1000	3031,29	46,26	3032,54	45,27	0,04	2,14
1087	1050	3129,92	47,01	3129,59	45,57	0,01	3,08
1087	1100	3222,32	47,77	3226,61	45,84	0,13	4,03
1091	0	1091	30	1091	30	0	0
1091	50	1185,90	31,64	1188,42	31,45	0,21	0,61
1091	100	1283,20	32,68	1285,83	32,79	0,20	0,34
1091	150	1381,00	33,46	1383,23	34,03	0,16	1,72
1091	200	1475,50	34,22	1480,62	35,18	0,35	2,80
1091	250	1574,00	34,98	1578,01	36,25	0,25	3,61
1091	300	1672,60	35,74	1675,38	37,23	0,17	4,19
1091	350	1768,23	36,49	1772,73	38,15	0,25	4,54
1091	400	1864,10	37,24	1870,07	38,99	0,32	4,69
1091	450	1963,60	37,99	1967,39	39,77	0,19	4,68
1091	500	2052,00	38,74	2064,70	40,49	0,62	4,51
1091	550	2151,84	39,49	2161,98	41,16	0,47	4,21
1091	600	2252,43	40,25	2259,25	41,77	0,30	3,79
1091	650	2353,17	41,00	2356,49	42,34	0,14	3,27
1091	700	2448,80	41,75	2453,71	42,87	0,20	2,67
1091	750	2547,90	42,51	2550,91	43,35	0,12	1,99
1091	800	2644,96	43,26	2648,08	43,80	0,12	1,26
1091	850	2742,40	44,01	2745,23	44,21	0,10	0,47
1091	900	2839,53	44,76	2842,35	44,59	0,10	0,37

Tabel A2 Lanjutan

P	Elevasi	PIPESIM		Model		Error	
		P	T	P	T	P	T
1091	950	2952,14	45,51	2939,45	44,94	0,43	1,24
1091	1000	3033,29	46,26	3036,52	45,27	0,11	2,14
1091	1050	3131,92	46,03	3133,56	45,57	0,05	1,00
1091	1100	3224,32	47,36	3230,58	45,84	0,19	3,21
1095	0	1095	30	1095	30	0	0
	50	1188,90	31,67	1192,41	31,45	0,30	0,70
	100	1286,20	32,68	1289,82	32,79	0,28	0,34
	150	1384,00	33,66	1387,23	34,03	0,23	1,11
	200	1478,50	34,42	1484,62	35,18	0,41	2,20
	250	1577,00	35,18	1582,00	36,25	0,32	3,03
	300	1675,60	36,04	1679,37	37,23	0,22	3,32
	350	1771,23	37,19	1776,72	38,15	0,31	2,57
	400	1867,10	38,04	1874,06	38,99	0,37	2,49
	450	1966,60	38,39	1971,38	39,77	0,24	3,59
	500	2055,00	39,74	2068,68	40,49	0,67	1,88
1095	550	2154,84	40,49	2165,97	41,16	0,52	1,64
	600	2255,43	40,65	2263,23	41,77	0,35	2,77
	650	2356,17	41,00	2360,47	42,34	0,18	3,27
	700	2451,80	41,75	2457,69	42,87	0,24	2,67
	750	2550,90	42,51	2554,88	43,35	0,16	2,00
	800	2647,96	43,26	2652,06	43,80	0,15	1,26
	850	2745,40	44,01	2749,20	44,21	0,14	0,47
	900	2842,53	44,76	2846,33	44,59	0,13	0,37
	950	2955,14	45,11	2943,42	44,95	0,40	0,36
	1000	3036,29	46,26	3040,49	45,27	0,14	2,14
	1050	3134,92	46,81	3137,53	45,57	0,08	2,66
	1100	3227,32	47,57	3234,55	45,84	0,22	3,63
1100	0	1100	30	1100	30	0	0

Tabel A2 lanjutan

P	Elevasi	PIPESIM		Model		Error	
		P	T	P	T	P	T
1100	50	1192,90	31,47	1197,41	31,45	0,38	0,07
	100	1290,20	32,68	1294,82	32,79	0,36	0,34
	150	1388,00	33,86	1392,22	34,03	0,30	0,52
	200	1482,50	34,22	1489,61	35,18	0,48	2,80
	250	1581,00	34,98	1586,99	36,25	0,38	3,62
	300	1679,60	35,74	1684,36	37,23	0,28	4,19
	350	1775,23	36,49	1781,71	38,15	0,36	4,54
	400	1871,10	37,24	1879,05	38,99	0,42	4,70
	450	1970,60	38,19	1976,36	39,77	0,29	4,13
	500	2059,00	38,94	2073,67	40,49	0,71	3,98
	550	2158,84	39,49	2170,95	41,16	0,56	4,21
	600	2259,43	40,57	2268,21	41,78	0,39	2,98
	650	2360,17	41,32	2365,45	42,34	0,22	2,48
	700	2455,80	41,65	2462,67	42,87	0,28	2,92
	750	2554,90	42,41	2559,86	43,35	0,19	2,24
	800	2651,96	43,26	2657,03	43,80	0,19	1,26
	850	2749,40	43,69	2754,17	44,21	0,17	1,21
	900	2846,53	44,76	2851,29	44,59	0,17	0,37
	950	2959,14	45,51	2948,39	44,95	0,36	1,24
	1000	3040,29	46,26	3045,46	45,27	0,17	2,14
	1050	3138,92	46,81	3142,50	45,57	0,11	2,66
1100	1100	3231,32	47,52	3239,51	45,84	0,25	3,52

Pada tabel A3 yang divariasikan adalah nilai temperatur dengan nilai berada diantara 30 hingga 33°C. Dengan rata-rata error untuk tekanan dan temperatur masing-masing sebesar 0,15% dan 2,6661%.

Tabel A3 Validasi model dengan variasi temperatur

T	Elevasi	PIPESIM		Model		Error P	Error T
		P	T	P	T		
30	0	1087	30	1087	30	0	0
	50	1183,90	31,87	1184,42	31,45	0,04	1,33
	100	1281,20	32,68	1281,83	32,79	0,05	0,34
	150	1379,00	33,46	1379,23	34,03	0,02	1,72
	200	1473,50	34,22	1476,63	35,18	0,21	2,80
	250	1572,00	34,98	1574,01	36,25	0,13	3,61
	300	1670,60	35,74	1671,38	37,23	0,05	4,18
	350	1766,23	36,49	1768,74	38,15	0,14	4,53
	400	1862,10	37,24	1866,08	38,99	0,21	4,69
	450	1961,60	37,99	1963,40	39,77	0,09	4,67
	500	2050,00	38,74	2060,71	40,49	0,52	4,51
	550	2149,84	39,49	2158,00	41,16	0,38	4,21
	600	2250,43	40,25	2255,26	41,77	0,21	3,79
	650	2351,17	41,00	2352,51	42,34	0,06	3,27
	700	2446,80	41,75	2449,73	42,87	0,12	2,67
	750	2545,90	42,51	2546,93	43,35	0,04	1,99
	800	2642,96	43,26	2644,10	43,80	0,04	1,25
	850	2740,40	44,01	2741,25	44,21	0,03	0,47
	900	2837,53	44,76	2838,37	44,59	0,03	0,37
	950	2950,14	45,51	2935,47	44,94	0,50	1,24
	1000	3031,29	46,26	3032,54	45,27	0,04	2,14
	1050	3129,92	47,01	3129,59	45,57	0,01	3,08
	1100	3222,32	47,77	3226,61	45,84	0,13	4,03
31	0	1087	31	1087	31	0	0
	50	1183,90	31,87	1184,44	32,37	0,05	1,57
	100	1281,20	32,68	1281,87	33,64	0,05	2,96
	150	1378,80	33,46	1379,29	34,82	0,04	4,08
	200	1473,50	34,22	1476,70	35,91	0,22	4,93
	250	1572,32	35,21	1574,10	36,92	0,11	4,85
	300	1670,17	36,09	1671,48	37,85	0,08	4,90
	350	1765,80	37,49	1768,85	38,72	0,17	3,28

Tabel A3 Lanjutan

T	Elevasi	PIPESIM		Model		Error	Error
		P	T	P	T	P	T
	400	1862,31	38,24	1866,20	39,52	0,21	3,34
31	450	1961,81	38,49	1963,53	40,26	0,09	4,58
	500	2050,21	39,24	2060,85	40,94	0,52	4,33
	550	2149,84	39,99	2158,14	41,57	0,39	3,95
	600	2250,43	40,25	2255,42	42,16	0,22	4,74
	650	2351,17	41,00	2352,67	42,70	0,06	4,13
	700	2446,80	41,75	2449,90	43,19	0,13	3,45
	750	2545,90	42,51	2547,10	43,65	0,05	2,70
	800	2642,70	43,26	2644,28	44,08	0,06	1,89
	850	2740,14	44,22	2741,44	44,47	0,05	0,56
	900	2837,27	44,97	2838,57	44,83	0,05	0,31
	950	2949,88	45,72	2935,67	45,16	0,48	1,22
	1000	3031,29	46,47	3032,75	45,47	0,05	2,16
	1050	3129,92	47,22	3129,79	45,75	0,00	3,12
	1100	3222,32	47,98	3226,81	46,01	0,14	4,10
32	0	1087	32	1087	32	0	0
	50	1183,90	32,69	1184,46	33,30	0,05	1,85
	100	1281,20	33,98	1281,90	34,50	0,05	1,53
	150	1379,00	35,06	1379,34	35,61	0,02	1,58
	200	1473,50	35,64	1476,77	36,64	0,22	2,79
	250	1572,00	36,40	1574,18	37,59	0,14	3,27
	300	1670,60	37,16	1671,58	38,48	0,06	3,55
	350	1766,23	37,91	1768,96	39,29	0,15	3,64
	400	1862,10	38,66	1866,32	40,05	0,23	3,58
	450	1961,60	39,41	1963,66	40,75	0,11	3,38
	500	2050,00	40,16	2060,99	41,39	0,54	3,06
	550	2149,84	40,91	2158,29	41,99	0,39	2,62
	600	2250,43	41,67	2255,57	42,54	0,23	2,09
	650	2351,17	42,42	2352,83	43,05	0,07	1,48
	700	2446,80	43,17	2450,07	43,52	0,13	0,80

Tabel A3 Lanjutan

T	Elevasi	PIPESIM		Model		Error P	Error T	
		P	T	P	T			
32	750	2545,90	43,93	2547,28	43,95	0,05	0,06	
	800	2642,96	44,16	2644,46	44,35	0,06	0,44	
	850	2740,40	44,27	2741,62	44,72	0,04	1,02	
	900	2837,53	44,76	2838,76	45,06	0,04	0,68	
	950	2950,14	45,51	2935,86	45,38	0,48	0,29	
	1000	3030,79	46,69	3032,94	45,66	0,07	2,19	
	1050	3129,92	46,91	3130,00	45,93	0,00	2,09	
	1100	3224,82	47,34	3227,02	46,18	0,07	2,45	
	33	0	1087	33	1087	33	0	0
		50	1183,90	34,52	1184,48	34,22	0,05	0,87
100		1281,20	35,33	1281,94	35,35	0,06	0,06	
150		1379,00	36,11	1379,39	36,40	0,03	0,80	
200		1473,50	36,87	1476,84	37,37	0,23	1,33	
250		1572,00	37,63	1574,26	38,26	0,14	1,68	
300		1669,90	38,39	1671,67	39,09	0,11	1,84	
350		1765,53	39,14	1769,06	39,86	0,20	1,85	
400		1867,10	39,89	1866,44	40,57	0,04	1,71	
450		1966,60	40,64	1963,79	41,23	0,14	1,45	
500		2055,73	41,39	2061,13	41,84	0,26	1,08	
550		2154,84	42,14	2158,44	42,40	0,17	0,61	
600		2255,43	42,90	2255,73	42,92	0,01	0,05	
650		2351,17	43,65	2352,99	43,40	0,08	0,58	
700		2446,80	44,40	2450,24	43,84	0,14	1,27	
750		2545,90	45,16	2547,45	44,25	0,06	2,01	
800	2642,96	45,91	2644,64	44,63	0,06	2,79		
850	2740,40	46,66	2741,81	44,97	0,05	3,61		
900	2837,53	47,41	2838,95	45,29	0,05	4,46		
950	2950,14	48,16	2936,06	45,59	0,48	5,33		
1000	3031,29	48,91	3033,14	45,86	0,06	6,23		
1050	3129,92	49,66	3130,20	46,11	0,01	7,15		

Tabel A3 lanjutan

T	Elevasi	PIPESIM		Model		Error	Error
		P	T	P	T	P	T
33	1100	3222,02	50,42	3227,23	46,34	0,16	8,08

Pada tabel A4 yang divariasikan adalah nilai konsentrasi molase dengan nilai berada diantara 0,4 hingga 0,7. Dengan rata-rata error untuk tekanan dan temperatur masing-masing sebesar 0,143% dan 2,09%.

Tabel A4 Validasi model dengan variasi konsentrasi

x	Elevasi	PIPESIM		Model		Error	Error
		P	T	P	T	P	T
0,4	0	1087	30	1087	30	0	0
	50	1183,90	31,87	1184,42	31,45	0,04	1,33
	100	1281,20	32,68	1281,83	32,79	0,05	0,34
	150	1379,00	33,46	1379,23	34,03	0,02	1,72
	200	1473,50	34,22	1476,63	35,18	0,21	2,80
	250	1572,00	34,98	1574,01	36,25	0,13	3,61
	300	1670,60	35,74	1671,38	37,23	0,05	4,18
	350	1766,23	36,49	1768,74	38,15	0,14	4,53
	400	1862,10	37,24	1866,08	38,99	0,21	4,69
	450	1961,60	37,99	1963,40	39,77	0,09	4,67
	500	2050,00	38,74	2060,71	40,49	0,52	4,51
	550	2149,84	39,49	2158,00	41,16	0,38	4,21
	600	2250,43	40,25	2255,26	41,77	0,21	3,79
	650	2351,17	41,00	2352,51	42,34	0,06	3,27
	700	2446,80	41,75	2449,73	42,87	0,12	2,67
	750	2545,90	42,51	2546,93	43,35	0,04	1,99
	800	2642,96	43,26	2644,10	43,80	0,04	1,25
	850	2740,40	44,01	2741,25	44,21	0,03	0,47
	900	2837,53	44,76	2838,37	44,59	0,03	0,37
	950	2950,14	45,51	2935,47	44,94	0,50	1,24
	1000	3031,29	46,26	3032,54	45,27	0,04	2,14

Tabel A4 Lanjutan

x	Elevasi	PIPESIM		Model		Error	
		P	T	P	T	P	T
	1050	3129,92	47,01	3129,59	45,57	0,01	3,08
	1100	3222,32	47,77	3226,61	45,84	0,13	4,03
0,5	0	1087	30	1087	30	0	0
	50	1183,39	31,62	1184,55	31,45	0,10	0,55
	100	1280,40	32,68	1282,09	32,79	0,13	0,33
	150	1377,60	33,61	1379,63	34,03	0,15	1,25
	200	1473,50	34,37	1477,16	35,18	0,25	2,33
	250	1572,00	35,34	1574,67	36,24	0,17	2,54
	300	1670,60	35,74	1672,17	37,23	0,09	4,16
	350	1766,23	36,90	1769,66	38,14	0,19	3,35
	400	1862,10	37,65	1867,13	38,98	0,27	3,53
	450	1961,60	37,99	1964,59	39,76	0,15	4,65
	500	2051,54	38,97	2062,02	40,48	0,51	3,87
	550	2151,38	39,60	2159,44	41,15	0,37	3,90
	600	2251,97	40,25	2256,84	41,77	0,22	3,77
	650	2351,17	41,00	2354,21	42,33	0,13	3,25
	700	2446,80	41,75	2451,56	42,86	0,19	2,65
	750	2545,90	42,51	2548,89	43,34	0,12	1,97
	800	2644,76	43,26	2646,19	43,79	0,05	1,24
	850	2740,40	44,01	2743,47	44,20	0,11	0,45
	900	2837,53	44,76	2840,73	44,59	0,11	0,39
	950	2950,14	45,51	2937,95	44,94	0,41	1,26
	1000	3031,09	46,26	3035,15	45,26	0,13	2,16
	1050	3128,42	46,68	3132,32	45,56	0,12	2,41
	1100	3224,52	47,14	3229,47	45,83	0,15	2,76
0,6	0	1087	30	1087	30	0	0
	50	1183,40	31,66	1184,34	31,44	0,08	0,68
	100	1281,20	32,83	1281,67	32,78	0,04	0,14
	150	1379,00	33,61	1379,00	34,02	0,00	1,24
	200	1474,00	34,47	1476,32	35,17	0,16	2,02

Tabel A4 Lanjutan

x	Elevasi	PIPESIM		Model		Error	Error
		P	T	P	T	P	T
0,6	250	1572,50	35,53	1573,62	36,23	0,07	1,97
	300	1671,10	35,99	1670,92	37,22	0,01	3,42
	350	1766,73	37,04	1768,19	38,13	0,08	2,94
	400	1862,60	37,39	1865,46	38,97	0,15	4,23
	450	1962,10	38,14	1962,70	39,75	0,03	4,22
	500	2052,50	38,89	2059,92	40,47	0,36	4,06
	550	2152,34	39,64	2157,13	41,14	0,22	3,77
	600	2252,93	40,40	2254,31	41,76	0,06	3,36
	650	2351,67	41,15	2351,48	42,33	0,01	2,85
	700	2447,30	41,90	2448,62	42,85	0,05	2,26
	750	2546,40	42,66	2545,73	43,34	0,03	1,60
	800	2643,46	43,41	2642,82	43,78	0,02	0,87
	850	2740,90	44,16	2739,89	44,20	0,04	0,09
	900	2838,03	44,91	2836,93	44,58	0,04	0,74
950	2950,64	45,56	2933,94	44,93	0,57	1,38	
0,7	0	1087	30	1087	30	0	0
	50	1183,90	31,73	1184,52	31,44	0,05	0,91
	100	1281,92	32,54	1282,04	32,78	0,01	0,74
	150	1379,00	33,87	1379,55	34,02	0,04	0,45
	200	1473,99	34,84	1477,05	35,17	0,21	0,92
	250	1572,52	35,60	1574,54	36,23	0,13	1,75
	300	1670,20	36,36	1672,02	37,21	0,11	2,35
	350	1766,03	37,11	1769,48	38,12	0,20	2,73
	400	1862,10	37,86	1866,93	38,97	0,26	2,91
	450	1961,60	38,61	1964,36	39,74	0,14	2,93
	500	2050,00	39,36	2061,77	40,47	0,57	2,80
	550	2149,84	40,11	2159,16	41,13	0,43	2,54

Tabel A4 lanjutan

x	Elevasi	PIPESIM		Model		Error P	Error T
		P	T	P	T		
0,7	600	2250,43	40,87	2256,54	41,75	0,27	2,15
	650	2351,17	41,62	2353,89	42,32	0,12	1,67
	700	2446,80	42,37	2451,22	42,84	0,18	1,11
	750	2545,90	43,13	2548,52	43,33	0,10	0,47
	800	2642,96	43,26	2645,80	43,78	0,11	1,20
	850	2740,40	44,01	2743,06	44,19	0,10	0,41
	900	2837,10	44,76	2840,29	44,57	0,11	0,42
	950	2950,02	45,51	2937,50	44,92	0,42	1,29
	1000	3030,96	46,26	3034,68	45,25	0,12	2,19
	1050	3129,39	46,79	3131,83	45,55	0,08	2,67
	1100	3223,05	47,31	3228,96	45,82	0,18	3,14

Lampiran B Validasi pada Reservoir

Validasi model pada Reservoir ini menggunakan software COMSOL Multiphysics dengan membandingkan hasil permodelan dengan hasil simulasi. Pada Tabel B1 yang divariasikan adalah nilai laju aliran massa injeksi dengan nilai berada diantara 0,3 hingga 0,6 kg/s. Untuk tekanan dan temperatur pada reservoir dihasilkan error masing-masing sebesar 0,05% dan 0,371%.

Tabel B1 Validasi dengan variasi laju aliran massa injeksi

m	Elevasi	PIPESIM		Model		Error P	Error T
		P	T	P	T		
0,3	0	3225,35	45,84	3226,61	45,84	0,04	0,00
0,3	10	3214,96	45,10	3215,40	44,84	0,01	0,59
0,3	20	3204,10	44,26	3204,19	43,90	0,00	0,82
0,3	30	3192,83	43,22	3192,98	43,02	0,00	0,46
0,3	40	3180,54	42,33	3181,77	42,20	0,04	0,30
0,3	50	3171,26	41,49	3170,56	41,44	0,02	0,12
0,3	60	3160,89	40,92	3159,34	40,72	0,05	0,48
0,3	70	3151,13	40,20	3148,12	40,06	0,10	0,36
0,3	80	3136,22	39,43	3136,91	39,43	0,02	0,00
0,3	90	3124,35	38,90	3125,69	38,85	0,04	0,12
0,3	100	3115,76	38,36	3114,47	38,31	0,04	0,14
0,4	0	3228,45	45,84	3230,91	45,78	0,08	0,14
	10	3218,06	44,90	3219,70	44,78	0,05	0,28
	20	3207,20	44,26	3208,50	43,84	0,04	0,95
	30	3195,93	43,22	3197,29	42,97	0,04	0,58
	40	3183,64	42,23	3186,07	42,15	0,08	0,18
	50	3174,36	41,39	3174,86	41,39	0,02	0,01
	60	3163,99	40,82	3163,65	40,68	0,01	0,34
	70	3154,23	40,20	3152,43	40,02	0,06	0,46
	80	3139,32	39,43	3141,21	39,40	0,06	0,10
	90	3127,45	38,90	3129,99	38,82	0,08	0,22
	100	3118,86	38,36	3118,77	38,27	0,00	0,23
0,5	0	3235,85	45,94	3236,50	45,72	0,02	0,49

Tabel B1 Lanjutan

m	Elevasi	PIPESIM		Model		Error P	Error T
		P	T	P	T		
0,5	10	3208,86	44,90	3225,29	44,72	0,51	0,40
	20	3214,30	44,06	3214,08	43,79	0,01	0,62
	30	3200,83	43,02	3202,87	42,92	0,06	0,23
	40	3180,54	42,13	3191,66	42,11	0,35	0,05
	50	3171,26	41,29	3180,45	41,35	0,29	0,14
	60	3167,89	40,72	3169,24	40,64	0,04	0,20
	70	3158,13	40,00	3158,02	39,98	0,00	0,06
	80	3143,22	39,23	3146,80	39,36	0,11	0,32
	90	3131,35	38,70	3135,59	38,78	0,14	0,21
	100	3122,76	38,16	3124,37	38,24	0,05	0,22
0,6	0	3242,35	45,84	3243,44	45,66	0,03	0,40
	10	3214,96	44,70	3232,24	44,66	0,54	0,08
	20	3219,10	43,86	3221,03	43,74	0,06	0,28
	30	3207,83	43,02	3209,82	42,87	0,06	0,34
	40	3195,54	42,33	3198,61	42,06	0,10	0,63
	50	3186,26	41,49	3187,40	41,31	0,04	0,44
	60	3175,89	40,62	3176,19	40,60	0,01	0,05
	70	3166,13	40,20	3164,97	39,94	0,04	0,64
	80	3151,22	39,43	3153,76	39,33	0,08	0,27
	90	3134,35	38,90	3142,54	38,75	0,26	0,38
100	3130,76	38,36	3131,32	38,21	0,02	0,38	

Pada tabel B2 yang divariasikan adalah nilai *pressure* dengan nilai berada diantara 1087 hingga 1100 psia.

Tabel B2 Validasi model dengan variasi *pressure*

P	Elevasi	PIPESIM		Model		Error P	Error T
		P	T	P	T		
1087	0	3225,35	45,84	3226,61	45,84	0,04	0,00
	10	3214,96	45,10	3215,40	44,84	0,01	0,59
	20	3204,10	44,26	3204,19	43,90	0,00	0,82

Tabel B2 Lanjutan

P	Elevasi	PIPESIM		Model		Error P	Error T	
		P	T	P	T			
1087	30	3192,83	43,22	3192,98	43,02	0,00	0,46	
	40	3180,54	42,33	3181,77	42,20	0,04	0,30	
	50	3171,26	41,49	3170,56	41,44	0,02	0,12	
	60	3160,89	40,92	3159,34	40,72	0,05	0,48	
	70	3151,13	40,20	3148,12	40,06	0,10	0,36	
	80	3136,22	39,43	3136,91	39,43	0,02	0,00	
	90	3124,35	38,90	3125,69	38,85	0,04	0,12	
	100	3115,76	38,36	3114,47	38,31	0,04	0,14	
	1091	0	3228,85	46,04	3230,58	45,84	0,05	0,43
		10	3218,46	45,10	3219,37	44,84	0,03	0,58
20		3207,60	44,26	3208,16	43,90	0,02	0,82	
30		3196,33	43,22	3196,95	43,02	0,02	0,46	
40		3184,04	42,33	3185,74	42,20	0,05	0,30	
50		3174,76	41,49	3174,53	41,44	0,01	0,12	
60		3164,39	40,92	3163,31	40,72	0,03	0,48	
70		3154,63	40,20	3152,10	40,06	0,08	0,36	
80		3139,72	39,43	3140,88	39,43	0,04	0,00	
90		3127,85	38,90	3129,66	38,85	0,06	0,12	
100	3119,26	38,36	3118,44	38,31	0,03	0,14		
1095	0	3234,66	45,84	3234,55	45,84	0,00	0,00	
	10	3224,27	45,10	3223,34	44,84	0,03	0,58	
	20	3213,41	44,26	3212,13	43,90	0,04	0,82	
	30	3202,14	43,22	3200,92	43,02	0,04	0,46	
	40	3189,85	42,33	3189,71	42,20	0,00	0,30	
	50	3180,57	41,49	3178,50	41,44	0,07	0,12	
	60	3170,20	40,82	3167,29	40,72	0,09	0,24	
	70	3160,44	40,21	3156,07	40,06	0,14	0,38	
	80	3145,53	39,44	3144,85	39,43	0,02	0,03	
	90	3133,66	38,91	3133,64	38,85	0,00	0,15	
100	3125,07	38,37	3122,42	38,31	0,08	0,17		

Tabel B2 Lanjutan

P	Elevasi	PIPESIM		Model		Error P	Error T
		P	T	P	T		
1100	0	3235,81	45,94	3239,51	45,84	0,11	0,21
	10	3225,42	44,90	3228,30	44,84	0,09	0,14
	20	3214,56	43,96	3217,10	43,90	0,08	0,14
	30	3203,29	43,22	3205,89	43,02	0,08	0,46
	40	3191,00	42,33	3194,68	42,20	0,12	0,30
	50	3181,72	41,49	3183,47	41,44	0,05	0,12
	60	3171,35	40,82	3172,25	40,72	0,03	0,24
	70	3161,59	40,20	3161,04	40,06	0,02	0,36
	80	3146,68	39,43	3149,82	39,43	0,10	0,00
	90	3134,81	38,90	3138,60	38,85	0,12	0,12
	100	3126,22	38,36	3127,38	38,31	0,04	0,14

Pada tabel B3 yang divariasikan adalah nilai *temperature* dengan nilai berada diantara 30 hingga 33 C.

Tabel B3 Validasi model dengan variasi temperature

T	Elevasi	PIPESIM		Model		Error P	Error T
		P	T	P	T		
30	0	3225,35	45,84	3226,61	45,84	0,04	0,00
	10	3214,96	44,90	3215,40	44,84	0,01	0,14
	20	3204,10	44,06	3204,19	43,90	0,00	0,37
	30	3192,83	43,01	3192,98	43,02	0,00	0,02
	40	3180,54	42,13	3181,77	42,20	0,04	0,17
	50	3171,26	41,49	3170,56	41,44	0,02	0,12
	60	3160,89	40,72	3159,34	40,72	0,05	0,01
	70	3151,13	40,20	3148,12	40,06	0,10	0,36
	80	3136,22	39,43	3136,91	39,43	0,02	0,00
	90	3124,35	38,88	3125,69	38,85	0,04	0,07
	100	3115,76	38,36	3114,47	38,31	0,04	0,14
31	0	3225,75	46,04	3226,81	46,01	0,03	0,07
	10	3215,36	45,10	3215,61	44,99	0,01	0,24

Tabel B3 Lanjutan

T	Elevasi	PIPESIM		Model		Error	Error
		P	T	P	T	P	T
31	20	3204,50	44,06	3204,40	44,05	0,00	0,03
	30	3192,63	43,06	3193,19	43,16	0,02	0,22
	40	3180,54	42,33	3181,98	42,33	0,05	0,00
	50	3171,26	41,49	3170,76	41,56	0,02	0,17
	60	3160,89	40,80	3159,55	40,84	0,04	0,09
	70	3151,13	40,20	3148,33	40,16	0,09	0,10
	80	3136,22	39,43	3137,11	39,53	0,03	0,25
	90	3123,85	38,88	3125,89	38,94	0,07	0,16
	100	3115,41	38,36	3114,67	38,39	0,02	0,08
	32	0	3226,35	46,14	3227,02	46,18	0,02
10		3210,96	45,20	3215,81	45,15	0,15	0,11
20		3204,10	44,36	3204,61	44,19	0,02	0,38
30		3192,83	43,31	3193,40	43,30	0,02	0,04
40		3180,54	42,43	3182,18	42,46	0,05	0,07
50		3171,26	41,79	3170,97	41,68	0,01	0,27
60		3160,89	41,02	3159,76	40,95	0,04	0,18
70		3151,13	40,30	3148,54	40,27	0,08	0,08
80		3135,22	39,73	3137,32	39,63	0,07	0,26
90		3121,35	39,18	3126,10	39,03	0,15	0,37
	100	3115,96	38,36	3114,88	38,48	0,03	0,31
33	0	3225,75	46,34	3227,23	46,34	0,05	0,01
	10	3215,36	45,30	3216,02	45,31	0,02	0,02
	20	3204,50	44,26	3204,81	44,34	0,01	0,18
	30	3193,23	43,21	3193,60	43,43	0,01	0,51
	40	3180,94	42,33	3182,39	42,59	0,05	0,61
	50	3171,66	41,69	3171,18	41,80	0,02	0,26
	60	3161,29	40,92	3159,96	41,06	0,04	0,34
	70	3151,53	40,40	3148,75	40,37	0,09	0,08
	80	3136,62	39,63	3137,53	39,73	0,03	0,23
	90	3123,95	39,08	3126,31	39,12	0,08	0,12

Tabel B3 Lanjutan

T	Elevasi	PIPESIM		Model		Error	Error
		P	T	P	T	P	T
33	100	3116,16	38,56	3115,09	38,56	0,03	0,01

Pada tabel B4 yang divariasikan adalah nilai konsentrasi nutrisi dengan nilai berada diantara 0,4 hingga 0,7 kg/m³.

Tabel B4 Validasi model dengan variasi konsentrasi

x	Elevasi	PIPESIM		Model		Error	Error
		P	T	P	T	P	T
0,4	0	3225,35	45,84	3226,61	45,84	0,04	0,00
	10	3214,96	45,10	3215,40	44,84	0,01	0,59
	20	3204,10	44,26	3204,19	43,90	0,00	0,82
	30	3192,83	43,22	3192,98	43,02	0,00	0,46
	40	3180,54	42,33	3181,77	42,20	0,04	0,30
	50	3171,26	41,49	3170,56	41,44	0,02	0,12
	60	3160,89	40,92	3159,34	40,72	0,05	0,48
	70	3151,13	40,20	3148,12	40,06	0,10	0,36
	80	3136,22	39,43	3136,91	39,43	0,02	0,00
	90	3124,35	38,90	3125,69	38,85	0,04	0,12
0,5	100	3115,76	38,36	3114,47	38,31	0,04	0,14
	0	3227,85	46,09	3229,47	45,83	0,05	0,56
	10	3217,46	45,15	3218,26	44,83	0,02	0,71
	20	3206,60	44,51	3207,05	43,89	0,01	1,39
	30	3195,33	43,47	3195,84	43,02	0,02	1,04
	40	3183,04	42,58	3184,63	42,20	0,05	0,90
	50	3173,76	41,74	3173,42	41,43	0,01	0,73
	60	3163,39	41,17	3162,21	40,72	0,04	1,09
	70	3153,63	40,45	3150,99	40,05	0,08	0,98
	80	3138,72	39,68	3139,77	39,43	0,03	0,64
0,6	90	3126,85	39,15	3128,55	38,85	0,05	0,77
	100	3118,26	38,61	3117,33	38,30	0,03	0,79
	0	3224,89	46,11	3224,82	45,83	0,00	0,61

Tabel B4 Lanjutan

x	Elevasi	PIPESIM		Model		Error	
		P	T	P	T	P	T
0,6	10	3214,50	45,37	3213,61	44,82	0,03	1,20
	20	3203,64	43,99	3202,40	43,89	0,04	0,24
	30	3192,37	43,49	3191,19	43,01	0,04	1,10
	40	3180,08	42,60	3179,98	42,19	0,00	0,96
	50	3170,80	41,76	3168,77	41,43	0,06	0,79
	60	3160,43	41,19	3157,55	40,72	0,09	1,15
	70	3150,67	40,47	3146,34	40,05	0,14	1,04
	80	3135,76	39,70	3135,12	39,43	0,02	0,70
	90	3123,89	39,17	3123,90	38,84	0,00	0,83
	100	3115,30	38,63	3112,68	38,30	0,08	0,85
0,7	0	3226,75	46,15	3228,96	45,82	0,07	0,71
	10	3216,36	45,41	3217,75	44,82	0,04	1,30
	20	3205,50	44,57	3206,54	43,88	0,03	1,55
	30	3194,23	43,53	3195,33	43,01	0,03	1,20
	40	3181,94	42,64	3184,12	42,19	0,07	1,06
	50	3172,66	41,80	3172,91	41,42	0,01	0,90
	60	3162,29	41,23	3161,69	40,71	0,02	1,26
	70	3152,53	40,51	3150,48	40,04	0,07	1,15
	80	3137,62	39,74	3139,26	39,42	0,05	0,81
	90	3125,75	39,21	3128,04	38,84	0,07	0,94
100	3117,16	38,67	3116,82	38,30	0,01	0,97	

Halaman ini sengaja dikosongkan

Lampiran C Validasi pada Production Well

Validasi model pada Production Well ini menggunakan software PIPESIM dengan membandingkan hasil permodelan dengan hasil simulasi. Pada Tabel C1 yang divariasikan adalah nilai laju aliran massa injeksi dengan nilai berada diantara 0,3 hingga 0,6 kg/s. Untuk tekanan dan temperatur pada *production well* dihasilkan error masing-masing sebesar 0,13% dan 1,81%.

Tabel C1 Validasi model dengan variasi laju aliran massa

m	Elevasi	PIPESIM		Model		Error	
		P	T	P	T	P	T
0,3	1100	3113,84	38,39	3114,47	38,31	0,02	0,22
0,3	1050	3015,53	38,10	3015,84	38,02	0,01	0,20
0,3	1000	2918,34	37,26	2917,22	37,74	0,04	1,30
0,3	950	2818,20	37,15	2818,60	37,47	0,01	0,85
0,3	900	2719,54	36,90	2719,98	37,20	0,02	0,81
0,3	850	2621,10	36,45	2621,38	36,93	0,01	1,30
0,3	800	2521,85	36,19	2522,77	36,66	0,04	1,30
0,3	750	2423,73	35,74	2424,17	36,40	0,02	1,85
0,3	700	2325,12	35,60	2325,58	36,14	0,02	1,52
0,3	650	2225,61	35,32	2226,99	35,88	0,06	1,60
0,3	600	2128,31	34,95	2128,41	35,63	0,00	1,95
0,3	550	2029,41	34,69	2029,83	35,38	0,02	2,01
0,3	500	1930,63	34,32	1931,26	35,14	0,03	2,38
0,3	450	1831,31	34,20	1832,69	34,89	0,08	2,04
0,3	400	1733,52	33,90	1734,13	34,65	0,04	2,22
0,3	350	1634,90	33,86	1635,58	34,42	0,04	1,63
0,3	300	1536,64	33,41	1537,03	34,18	0,03	2,31
0,3	250	1438,10	33,12	1438,49	33,95	0,03	2,52
0,3	200	1339,40	32,67	1339,96	33,72	0,04	3,22
0,3	150	1240,65	32,34	1241,43	33,50	0,06	3,59
0,3	100	1140,49	32,13	1142,91	33,28	0,21	3,59
	50	1042,74	31,80	1044,40	33,06	0,16	3,95
	0	946,47	31,55	945,89	32,84	0,06	4,09

Tabel C1 Lanjutan

m	Elevasi	PIPESIM		Model		Error	
		P	T	P	T	P	T
0,4	1100	3117,94	38,37	3118,77	38,27	0,03	0,25
	1050	3019,63	38,08	3019,95	38,00	0,01	0,21
	1000	2922,44	37,24	2921,13	37,73	0,04	1,32
	950	2822,3	37,13	2822,31	37,46	0,00	0,89
	900	2723,64	36,88	2723,50	37,20	0,01	0,87
	850	2625,204	36,43	2624,69	36,94	0,02	1,38
	800	2525,95	36,17	2525,89	36,68	0,00	1,41
	750	2427,831	35,72	2427,10	36,42	0,03	1,98
	700	2329,22	35,58	2328,31	36,17	0,04	1,68
	650	2229,705	35,30	2229,52	35,93	0,01	1,77
	600	2132,41	34,93	2130,74	35,68	0,08	2,15
	550	2033,51	34,67	2031,97	35,44	0,08	2,24
	500	1934,73	34,30	1933,20	35,20	0,08	2,63
	450	1835,41	34,18	1834,44	34,97	0,05	2,31
	400	1737,62	33,88	1735,69	34,73	0,11	2,52
	350	1639	33,84	1636,95	34,50	0,13	1,95
	300	1540,74	33,39	1538,21	34,28	0,16	2,66
	250	1442,202	33,10	1439,47	34,05	0,19	2,89
	200	1343,5	32,65	1340,75	33,83	0,20	3,61
	150	1244,75	32,32	1242,03	33,62	0,22	4,01
100	1144,59	32,11	1143,32	33,40	0,11	4,03	
50	1046,84	31,78	1044,62	33,19	0,21	4,42	
0	950,57	31,53	945,92	32,98	0,49	4,59	
0,5	1100	3123,94	38,36	3124,37	38,24	0,01	0,31
	1050	3025,63	38,07	3025,28	37,98	0,01	0,25
	1000	2928,44	37,23	2926,20	37,71	0,08	1,30
	950	2828,30	37,12	2827,13	37,45	0,04	0,89
	900	2729,64	36,87	2728,06	37,20	0,06	0,90
	850	2631,20	36,42	2629,00	36,94	0,08	1,43
800	2531,95	36,16	2529,94	36,69	0,08	1,48	

Tabel C1 Lanjutan

m	Elevasi	PIPESIM		Model		Error P	Error T
		P	T	P	T		
	750	2433,83	35,71	2430,89	36,45	0,12	2,07
	700	2335,22	35,57	2331,85	36,20	0,14	1,79
	650	2235,71	35,29	2232,81	35,96	0,13	1,91
	600	2138,41	34,92	2133,78	35,72	0,22	2,30
	550	2039,51	34,66	2034,75	35,49	0,23	2,41
	500	1940,73	34,29	1935,73	35,26	0,26	2,83
	450	1841,41	34,17	1836,72	35,03	0,25	2,53
	400	1743,62	33,87	1737,71	34,80	0,34	2,76
	350	1645,00	33,83	1638,72	34,58	0,38	2,21
	300	1546,74	33,38	1539,72	34,36	0,45	2,94
	250	1448,20	33,09	1440,74	34,14	0,52	3,19
	200	1349,50	32,64	1341,76	33,93	0,57	3,94
	150	1250,75	32,31	1242,80	33,72	0,64	4,36
	100	1150,59	32,10	1143,84	33,51	0,59	4,41
	50	1052,84	31,77	1044,88	33,30	0,76	4,82
0,5	0	956,57	31,52	945,94	33,10	1,11	5,01
0,6	1100	3130,85	38,34	3131,32	38,21	0,02	0,33
	1050	3032,54	38,05	3031,92	37,95	0,02	0,25
	1000	2935,35	37,21	2932,52	37,70	0,10	1,32
	950	2835,21	37,10	2833,13	37,45	0,07	0,92
	900	2736,55	36,85	2733,75	37,20	0,10	0,95
	850	2638,11	36,40	2634,37	36,95	0,14	1,50
	800	2538,86	36,14	2534,99	36,71	0,15	1,57
	750	2440,74	35,69	2435,62	36,47	0,21	2,18
	700	2342,13	35,55	2336,26	36,23	0,25	1,91
	650	2242,62	35,27	2236,91	35,99	0,25	2,05
	600	2145,32	34,90	2137,56	35,76	0,36	2,47
	550	2046,42	34,64	2038,22	35,53	0,40	2,60
	500	1947,64	34,27	1938,89	35,31	0,45	3,03
	450	1848,32	34,15	1839,56	35,09	0,47	2,75

Tabel C1 Lanjutan

m	Elevasi	PIPESIM		Model		Error P	Error T
		P	T	P	T		
	400	1750,53	33,85	1740,24	34,87	0,59	3,00
	350	1651,91	33,81	1640,93	34,65	0,66	2,47
	300	1553,65	33,36	1541,62	34,44	0,77	3,22
	250	1455,11	33,07	1442,33	34,22	0,88	3,50
	200	1356,41	32,62	1343,04	34,02	0,99	4,27
	150	1257,66	32,29	1243,76	33,81	1,11	4,71
	100	1157,50	32,08	1144,48	33,61	1,12	4,78
	50	1059,75	31,75	1045,22	33,41	1,37	5,21
	0	963,48	31,50	945,96	33,21	1,82	5,43

Pada tabel C2 yang divariasikan adalah nilai *pressure* dengan nilai berada diantara 1087 hingga 1100 psia.

Tabel C2 Validasi model dengan variasi *pressure*

P	Elevasi	PIPESIM		Model		Error P	Error T
		P	T	P	T		
1087	1100	3113,84	38,39	3114,47	38,31	0,02	0,22
	1050	3015,53	38,10	3015,84	38,02	0,01	0,20
	1000	2918,34	37,26	2917,22	37,74	0,04	1,30
	950	2818,20	37,15	2818,60	37,47	0,01	0,85
	900	2719,54	36,90	2719,98	37,20	0,02	0,81
	850	2621,10	36,45	2621,38	36,93	0,01	1,30
	800	2521,85	36,19	2522,77	36,66	0,04	1,30
	750	2423,73	35,74	2424,17	36,40	0,02	1,85
	700	2325,12	35,60	2325,58	36,14	0,02	1,52
	650	2225,61	35,32	2226,99	35,88	0,06	1,60
	600	2128,31	34,95	2128,41	35,63	0,00	1,95
	550	2029,41	34,69	2029,83	35,38	0,02	2,01
	500	1930,63	34,32	1931,26	35,14	0,03	2,38
	450	1831,31	34,20	1832,69	34,89	0,08	2,04
	400	1733,52	33,90	1734,13	34,65	0,04	2,22

Tabel C2 Lanjutan

P	Elevasi	PIPESIM		Model		Error	Error
		P	T	P	T	P	T
	350	1634,90	33,86	1635,58	34,42	0,04	1,63
	300	1536,64	33,41	1537,03	34,18	0,03	2,31
	250	1438,10	33,12	1438,49	33,95	0,03	2,52
	200	1339,40	32,67	1339,96	33,72	0,04	3,22
	150	1240,65	32,34	1241,43	33,50	0,06	3,59
	100	1140,49	32,13	1142,91	33,28	0,21	3,59
	50	1042,74	31,80	1044,40	33,06	0,16	3,95
	0	946,47	31,55	945,89	32,84	0,06	4,09
1091	1100	3118,09	38,34	3118,44	38,31	0,01	0,09
	1050	3019,78	38,05	3019,81	38,02	0,00	0,07
	1000	2922,59	37,29	2921,19	37,74	0,05	1,22
	950	2822,45	37,18	2822,57	37,47	0,00	0,77
	900	2723,79	36,90	2723,96	37,20	0,01	0,81
	850	2625,35	36,45	2625,35	36,93	0,00	1,30
	800	2526,10	36,19	2526,74	36,66	0,03	1,30
	750	2427,98	35,74	2428,14	36,40	0,01	1,84
	700	2329,37	35,60	2329,55	36,14	0,01	1,52
	650	2229,86	35,32	2230,96	35,88	0,05	1,60
	600	2132,56	34,95	2132,37	35,63	0,01	1,95
	550	2033,66	34,69	2033,79	35,38	0,01	2,01
	500	1934,88	34,32	1935,22	35,14	0,02	2,38
	450	1835,56	35,20	1836,66	34,89	0,06	0,86
	400	1737,77	34,90	1738,10	34,65	0,02	0,71
	350	1639,15	34,86	1639,54	34,42	0,02	1,28
	300	1540,89	34,41	1540,99	34,18	0,01	0,66
	250	1442,35	34,12	1442,45	33,95	0,01	0,48
	200	1343,65	33,67	1343,92	33,72	0,02	0,15
	150	1244,90	33,34	1245,39	33,50	0,04	0,48
	100	1144,74	33,13	1146,87	33,28	0,19	0,46
	50	1046,99	32,80	1048,36	33,06	0,13	0,78

Tabel C2 Lanjutan

P	Elevasi	PIPESIM		Model		Error P	Error T
		P	T	P	T		
	0	950,72	32,55	949,85	32,84	0,09	0,89
1095	1100	3123,15	38,33	3122,42	38,31	0,02	0,06
	1050	3024,84	38,04	3023,79	38,02	0,03	0,04
	1000	2927,65	37,26	2925,16	37,74	0,08	1,30
	950	2827,51	37,15	2826,54	37,47	0,03	0,85
	900	2728,85	36,90	2727,93	37,20	0,03	0,81
	850	2630,41	36,45	2629,32	36,93	0,04	1,30
	800	2531,16	36,19	2530,71	36,66	0,02	1,30
	750	2433,04	35,74	2432,11	36,40	0,04	1,84
	700	2334,43	35,60	2333,52	36,14	0,04	1,52
	650	2234,92	35,32	2234,93	35,88	0,00	1,60
	600	2137,62	34,95	2136,34	35,63	0,06	1,95
	550	2038,72	34,69	2037,76	35,38	0,05	2,01
	500	1939,94	34,32	1939,19	35,14	0,04	2,38
	450	1840,62	34,20	1840,62	34,89	0,00	2,04
	400	1742,83	33,90	1742,06	34,65	0,04	2,22
	350	1644,21	33,86	1643,50	34,42	0,04	1,63
	300	1545,95	33,41	1544,96	34,18	0,06	2,31
250	1447,41	33,75	1446,41	33,95	0,07	0,60	
200	1348,71	32,67	1347,88	33,72	0,06	3,22	
150	1249,96	32,34	1249,35	33,50	0,05	3,59	
100	1149,80	32,13	1150,83	33,28	0,09	3,58	
50	1052,05	31,96	1052,32	33,06	0,03	3,42	
0	955,78	31,70	953,81	32,84	0,21	3,62	
1100	1100	3125,25	38,36	3127,38	38,31	0,07	0,14
	1050	3026,94	38,07	3028,76	38,02	0,06	0,12
	1000	2929,75	37,49	2930,13	37,74	0,01	0,68
	950	2829,61	37,15	2831,51	37,47	0,07	0,85
	900	2730,95	36,91	2732,89	37,20	0,07	0,78
850	2632,51	36,45	2634,28	36,93	0,07	1,30	

Tabel C2 Lanjutan

P	Elevasi	PIPESIM		Model		Error P	Error T
		P	T	P	T		
	800	2533,26	36,19	2535,68	36,66	0,10	1,30
	750	2435,14	35,74	2437,07	36,40	0,08	1,84
	700	2336,53	35,60	2338,48	36,14	0,08	1,52
	650	2237,02	35,32	2239,89	35,88	0,13	1,60
	600	2139,72	35,45	2141,30	35,63	0,07	0,51
	550	2040,82	35,19	2042,72	35,38	0,09	0,56
	500	1942,04	34,82	1944,15	35,14	0,11	0,91
	450	1842,72	34,70	1845,58	34,89	0,16	0,57
	400	1744,93	34,40	1747,02	34,65	0,12	0,74
	350	1646,31	34,36	1648,46	34,42	0,13	0,15
	300	1548,05	33,91	1549,91	34,18	0,12	0,80
	250	1449,51	33,62	1451,37	33,95	0,13	1,00
	200	1350,81	33,17	1352,83	33,72	0,15	1,66
	150	1252,06	32,84	1254,30	33,50	0,18	2,01
	100	1151,90	32,63	1155,78	33,28	0,34	2,00
	50	1054,15	32,30	1057,27	33,06	0,30	2,33
1100	0	957,88	32,05	958,76	32,84	0,09	2,47

Pada tabel C3 yang divariasikan adalah nilai *temperature* dengan nilai berada diantara 30 hingga 33 C.

Tabel C3 Validasi model dengan variasi *temperature*

T	Elevasi	PIPESIM		Model		Error P	Error T
		P	T	P	T		
30	1100	3113,84	38,39	3114,47	38,31	0,02	0,22
	1050	3015,53	38,10	3015,84	38,02	0,01	0,20
	1000	2918,34	37,26	2917,22	37,74	0,04	1,30
	950	2818,20	37,15	2818,60	37,47	0,01	0,85
	900	2719,54	36,90	2719,98	37,20	0,02	0,81
	850	2621,10	36,45	2621,38	36,93	0,01	1,30
	800	2521,85	36,19	2522,77	36,66	0,04	1,30

Tabel C3 Lanjutan

T	Elevasi	PIPESIM		Model		Error	
		P	T	P	T	P	T
	750	2423,73	35,74	2424,17	36,40	0,02	1,85
	700	2325,12	35,60	2325,58	36,14	0,02	1,52
	650	2225,61	35,32	2226,99	35,88	0,06	1,60
	600	2128,31	34,95	2128,41	35,63	0,00	1,95
	550	2029,41	34,69	2029,83	35,38	0,02	2,01
	500	1930,63	34,32	1931,26	35,14	0,03	2,38
	450	1831,31	34,20	1832,69	34,89	0,08	2,04
	400	1733,52	33,90	1734,13	34,65	0,04	2,22
	350	1634,90	33,86	1635,58	34,42	0,04	1,63
	300	1536,64	33,41	1537,03	34,18	0,03	2,31
	250	1438,10	33,12	1438,49	33,95	0,03	2,52
	200	1339,40	32,67	1339,96	33,72	0,04	3,22
	150	1240,65	32,34	1241,43	33,50	0,06	3,59
	100	1140,49	32,13	1142,91	33,28	0,21	3,59
	50	1042,74	31,80	1044,40	33,06	0,16	3,95
	0	946,47	31,55	945,89	32,84	0,06	4,09
31	1100	3113,58	38,39	3114,67	38,39	0,04	0,01
	1050	3015,27	38,10	3016,05	38,11	0,03	0,02
	1000	2918,08	37,26	2917,43	37,83	0,02	1,53
	950	2817,94	37,15	2818,82	37,55	0,03	1,07
	900	2719,28	36,90	2720,21	37,28	0,03	1,03
	850	2620,84	36,45	2621,60	37,01	0,03	1,52
	800	2521,59	36,19	2523,00	36,74	0,06	1,52
	750	2423,47	35,74	2424,41	36,48	0,04	2,06
	700	2324,86	35,60	2325,82	36,22	0,04	1,74
	650	2225,35	35,32	2227,23	35,96	0,08	1,81
	600	2128,05	34,95	2128,65	35,71	0,03	2,16
	550	2029,15	34,69	2030,08	35,46	0,05	2,22
	500	1930,37	34,32	1931,51	35,21	0,06	2,59
	450	1831,05	34,20	1832,95	34,97	0,10	2,25

Tabel C3 Lanjutan

T	Elevasi	PIPESIM		Model		Error	Error
		P	T	P	T	P	T
	400	1733,26	33,90	1734,39	34,72	0,07	2,43
	350	1634,64	33,86	1635,85	34,49	0,07	1,84
	300	1536,38	33,41	1537,30	34,25	0,06	2,52
	250	1437,84	33,12	1438,77	34,02	0,06	2,73
	200	1339,14	32,67	1340,24	33,79	0,08	3,43
	150	1240,39	32,34	1241,71	33,57	0,11	3,80
	100	1140,23	32,13	1143,20	33,34	0,26	3,79
	50	1042,48	31,80	1044,69	33,12	0,21	4,15
	0	946,21	31,55	946,19	32,91	0,00	4,30
32	1100	3114,04	38,49	3114,88	38,48	0,03	0,03
	1050	3015,73	38,20	3016,26	38,19	0,02	0,02
	1000	2918,54	37,36	2917,65	37,91	0,03	1,48
	950	2818,40	37,25	2819,04	37,63	0,02	1,02
	900	2719,74	37,00	2720,43	37,36	0,03	0,97
	850	2621,30	36,55	2621,83	37,09	0,02	1,46
	800	2541,85	36,29	2523,24	36,82	0,73	1,46
	750	2423,93	35,84	2424,65	36,55	0,03	2,00
	700	2325,32	35,70	2326,06	36,29	0,03	1,67
	650	2225,81	35,42	2227,48	36,04	0,08	1,74
	600	2128,51	35,05	2128,90	35,78	0,02	2,08
	550	2029,61	34,79	2030,33	35,53	0,04	2,14
	500	1930,83	34,42	1931,77	35,28	0,05	2,51
	450	1831,51	34,30	1833,21	35,04	0,09	2,16
	400	1733,72	34,00	1734,66	34,80	0,05	2,34
	350	1640,10	33,96	1636,11	34,56	0,24	1,75
	300	1536,84	33,51	1537,57	34,32	0,05	2,42
	250	1438,30	33,22	1439,04	34,09	0,05	2,63
	200	1339,60	32,77	1340,51	33,86	0,07	3,32
	150	1246,65	32,44	1241,99	33,63	0,37	3,68
	100	1140,69	32,23	1143,48	33,41	0,24	3,68

Tabel C3 Lanjutan

T	Elevasi	PIPESIM		Model		Error	
		P	T	P	T	P	T
	50	1042,94	31,90	1044,98	33,19	0,20	4,03
	0	950,67	31,65	946,48	32,97	0,44	4,17
33	1100	3114,14	38,59	3115,09	38,56	0,03	0,07
	1050	3015,83	38,30	3016,47	38,28	0,02	0,06
	1000	2918,64	37,46	2917,87	37,99	0,03	1,43
	950	2818,50	37,35	2819,26	37,71	0,03	0,97
	900	2719,84	37,10	2720,66	37,44	0,03	0,92
	850	2621,40	36,65	2622,06	37,17	0,03	1,40
	800	2522,15	36,39	2523,47	36,90	0,05	1,40
	750	2424,03	35,94	2424,88	36,63	0,04	1,93
	700	2325,42	35,80	2326,30	36,37	0,04	1,60
	650	2225,91	35,52	2227,72	36,11	0,08	1,66
	600	2128,61	35,15	2129,15	35,86	0,03	2,01
	550	2029,71	34,89	2030,59	35,60	0,04	2,06
	500	1930,93	34,52	1932,02	35,36	0,06	2,42
	450	1831,61	34,40	1833,47	35,11	0,10	2,07
	400	1733,82	34,10	1734,92	34,87	0,06	2,25
	350	1635,20	34,06	1636,38	34,63	0,07	1,66
	300	1536,94	33,61	1537,84	34,39	0,06	2,33
	250	1438,40	33,32	1439,31	34,16	0,06	2,53
	200	1339,70	32,87	1340,79	33,93	0,08	3,21
	150	1250,65	32,54	1242,27	33,70	0,67	3,57
	100	1140,79	32,33	1143,76	33,48	0,26	3,56
	50	1043,04	32,00	1045,26	33,26	0,21	3,91
	0	946,77	31,75	946,77	33,04	0,00	4,05

Pada tabel C4 yang divariasikan adalah nilai konsentrasi nutrisi dengan nilai berada diantara 0,4 hingga 0,7 kg/m³.

Tabel C4 Validasi model dengan variasi konsentrasi

x	Elevasi	PIPESIM		Model		Error	Error
		P	T	P	T	P	T
0,4	1100	3113,84	38,39	3114,47	38,31	0,02	0,22
	1050	3015,53	38,10	3015,84	38,02	0,01	0,20
	1000	2918,34	37,26	2917,22	37,74	0,04	1,30
	950	2818,20	37,15	2818,60	37,47	0,01	0,85
	900	2719,54	36,90	2719,98	37,20	0,02	0,81
	850	2621,10	36,45	2621,38	36,93	0,01	1,30
	800	2521,85	36,19	2522,77	36,66	0,04	1,30
	750	2423,73	35,74	2424,17	36,40	0,02	1,85
	700	2325,12	35,60	2325,58	36,14	0,02	1,52
	650	2225,61	35,32	2226,99	35,88	0,06	1,60
	600	2128,31	34,95	2128,41	35,63	0,00	1,95
	550	2029,41	34,69	2029,83	35,38	0,02	2,01
	500	1930,63	34,32	1931,26	35,14	0,03	2,38
	450	1831,31	34,20	1832,69	34,89	0,08	2,04
	400	1733,52	33,90	1734,13	34,65	0,04	2,22
	350	1634,90	33,86	1635,58	34,42	0,04	1,63
	300	1536,64	33,41	1537,03	34,18	0,03	2,31
	250	1438,10	33,12	1438,49	33,95	0,03	2,52
	200	1339,40	32,67	1339,96	33,72	0,04	3,22
	150	1240,65	32,34	1241,43	33,50	0,06	3,59
100	1140,49	32,13	1142,91	33,28	0,21	3,59	
50	1042,74	31,80	1044,40	33,06	0,16	3,95	
0	946,47	31,55	945,89	32,84	0,06	4,09	
0,5	1100	3116,96	38,39	3117,33	38,30	0,01	0,23
	1050	3018,65	38,10	3018,55	38,02	0,00	0,21
	1000	2921,46	37,26	2919,77	37,74	0,06	1,30
	950	2821,32	37,15	2820,99	37,47	0,01	0,85
	900	2722,66	37,70	2722,22	37,20	0,02	1,33
	850	2624,22	37,25	2623,45	36,93	0,03	0,87
	800	2524,97	36,99	2524,69	36,66	0,01	0,88
750	2426,85	36,54	2425,93	36,40	0,04	0,38	
700	2328,24	36,40	2327,18	36,14	0,05	0,70	

Tabel C4 Lanjutan

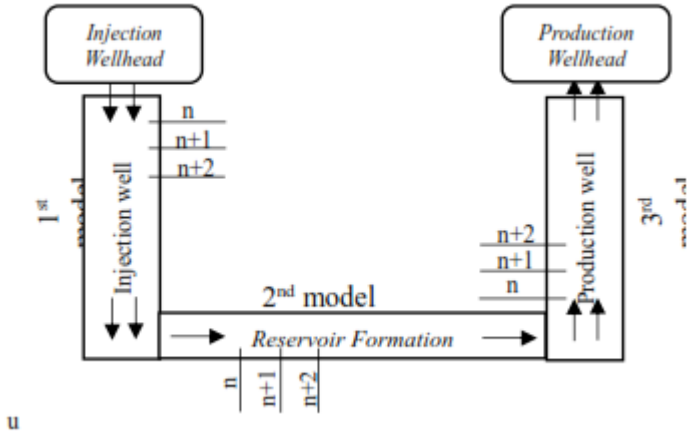
x	Elevasi	PIPESIM		Model		Error	
		P	T	P	T	P	T
	650	2228,73	36,12	2228,43	35,89	0,01	0,64
	600	2131,43	35,75	2129,69	35,64	0,08	0,32
	550	2032,53	35,49	2030,96	35,39	0,08	0,27
	500	1933,75	35,12	1932,23	35,14	0,08	0,07
	450	1834,43	35,00	1833,50	34,90	0,05	0,27
	400	1736,64	34,70	1734,79	34,66	0,11	0,11
	350	1638,02	34,66	1636,08	34,43	0,12	0,69
	300	1539,76	34,21	1537,37	34,19	0,16	0,05
	250	1441,22	33,92	1438,67	33,96	0,18	0,14
	200	1342,52	33,47	1339,98	33,74	0,19	0,79
	150	1243,77	33,14	1241,30	33,51	0,20	1,13
	100	1143,61	32,93	1142,62	33,29	0,09	1,11
	50	1045,86	32,60	1043,96	33,07	0,18	1,44
	0	949,59	32,35	945,29	32,86	0,45	1,56
0,6	1100	3111,33	38,39	3112,68	38,30	0,04	0,23
	1050	3013,02	38,10	3014,07	38,02	0,03	0,21
	1000	2915,83	37,46	2915,46	37,74	0,01	0,76
	950	2815,69	37,35	2816,86	37,47	0,04	0,31
	900	2717,03	37,10	2718,27	37,20	0,05	0,27
	850	2618,59	36,65	2619,68	36,93	0,04	0,76
	800	2519,34	36,39	2521,09	36,67	0,07	0,76
	750	2421,22	35,94	2422,51	36,40	0,05	1,30
	700	2322,61	35,80	2323,94	36,15	0,06	0,98
	650	2223,10	35,52	2225,37	35,89	0,10	1,05
	600	2125,80	35,15	2126,81	35,64	0,05	1,40
	550	2026,90	34,89	2028,25	35,40	0,07	1,46
	500	1928,12	34,52	1929,70	35,15	0,08	1,83
	450	1828,80	34,40	1831,15	34,91	0,13	1,49
	400	1731,01	34,10	1732,61	34,67	0,09	1,67
	350	1632,39	34,06	1634,08	34,44	0,10	1,09

Tabel C4 Lanjutan

x	Elevasi	PIPESIM		Model		Error	Error
		P	T	P	T	P	T
	300	1534,13	33,61	1535,55	34,20	0,09	1,77
	250	1435,59	33,32	1437,03	33,97	0,10	1,97
	200	1336,89	32,87	1338,52	33,75	0,12	2,66
	150	1238,14	32,54	1240,02	33,52	0,15	3,03
	100	1137,98	32,33	1141,52	33,30	0,31	3,03
	50	1040,23	32,00	1043,03	33,09	0,27	3,38
	0	943,96	31,75	944,55	32,87	0,06	3,53
0,7	1100	3114,09	38,39	3116,82	38,30	0,09	0,24
	1050	3015,78	38,34	3018,05	38,02	0,08	0,84
	1000	2918,59	37,50	2919,29	37,74	0,02	0,64
	950	2818,45	37,39	2820,54	37,47	0,07	0,20
	900	2719,79	37,10	2721,78	37,20	0,07	0,27
	850	2621,35	36,65	2623,03	36,93	0,06	0,76
	800	2522,10	36,39	2524,29	36,67	0,09	0,76
	750	2423,98	35,94	2425,55	36,41	0,06	1,30
	700	2325,37	35,80	2326,82	36,15	0,06	0,99
	650	2225,86	35,32	2228,09	35,90	0,10	1,64
	600	2128,56	34,95	2129,37	35,65	0,04	1,99
	550	2029,66	34,69	2030,66	35,40	0,05	2,06
	500	1930,88	34,32	1931,95	35,16	0,06	2,44
	450	1831,56	34,20	1833,24	34,92	0,09	2,11
	400	1733,77	33,90	1734,54	34,68	0,04	2,30
	350	1635,15	33,86	1635,85	34,44	0,04	1,72
	300	1536,89	33,41	1537,17	34,21	0,02	2,40
	250	1438,35	33,12	1438,49	33,99	0,01	2,62
	200	1339,65	33,17	1339,82	33,76	0,01	1,77
	150	1240,90	32,84	1241,16	33,54	0,02	2,13
	100	1140,74	32,63	1142,50	33,32	0,15	2,12
	50	1042,99	32,30	1043,85	33,10	0,08	2,47
	0	946,72	32,05	945,21	32,89	0,16	2,61

Halaman ini sengaja dikosongkan

Lampiran D Perhitungan Pressure Drop pada Injection Well menggunakan Pemodelan Beggs-Brill



Gambar D.1 Segmentasi model

Pemodelan operasi Biosurfaktan *Microbial Enhanced Oil Recovery* dilakukan seperti pada gambar. Dimana terbagi menjadi 3 bagian yakni *injection well*, reservoir dan *production well*. Pada *injection well* dan *production well* dilakukan perhitungan model gradien tekanan dan temperatur untuk setiap kedalaman (n) 50 m. Untuk input yang digunakan dapat dilihat pada tabel berikut

Tabel D.1 Parameter input pemodelan

Parameter	Nilai	Satuan
Gravitasi	9.8	m/s ²
Diameter aliran	0.127	m
Kedalaman sumur	1100	m
Tekanan injeksi	1087	psia
Laju massa injeksi	0.3044	kg/s
Konsentrasi Molase	0,4	wt%
Temperatur injeksi	30	°C
Tebal tubing	0.005385	m
<i>Absolute roughness</i>	0.0001	m

Rumus yang digunakan untuk menghitung *pressure drop* adalah sebagai berikut:

$$\frac{\partial p}{\partial z} = \frac{f_{tp} \cdot \rho \cdot v^2}{g_c \cdot d} + \frac{g}{g_c} \rho$$

Untuk nilai pada metode Beggs-Brill didapatkan melalui persamaan berikut

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

Akan tetapi diperlukan nilai bilangan Reynold melalui persamaan

$$N_{RE} = \frac{[\rho \cdot v \cdot d]}{\mu}$$

- Menghitung N_{Re}

$$N_{Re} = \frac{1365,004 \times 0,0411 \times 0,089}{0,03026} = 165,271$$

- Menghitung f_{tp}

$$\frac{1}{\sqrt{f_{tp}}} = 1.14 - 2 \log \left(\frac{0,0000254}{0,089} + \frac{21,25}{165,271^{0.9}} \right) = 1,5811$$

- Menghitung *Pressure Drop*

$$\begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial z} &= \frac{1,5811 \times 1365,004 \times 0,0411^2}{1 \times 0,089} + \frac{1365,004 \times 9,8}{1} \\ &= 13418,144 \frac{Pa}{m} \end{aligned}$$

Sehingga apabila tekanan injeksi adalah 1087 psia dan *pressure* didapatkan sebesar $13418,144 \frac{Pa}{m}$ maka tekanan pada segment selanjutnya sebesar $13417,222 \frac{Pa}{m}$

Lampiran E Perhitungan Pressure Drop pada Reservoir menggunakan metode Darcy

Parameter input yang digunakan pada reservoir dapat dilihat pada tabel berikut

Tabel E.1 Parameter input reservoir

Parameter	Nilai	Satuan
Jarak <i>injection well</i> menuju <i>production well</i>	100	m
Temperatur Reservoir	31	°C
Tekanan Reservoir	1087	Psia
Permeabilitas	18,10	mD
Porositas	0.07	-
°API	41	°API

Persamaan Darcy mengenai permeabilitas dapat dilihat pada persamaan (2.7)

$$\Delta P = \frac{\mu q L}{k A}$$

- Menghitung μ pada $P = 3602.08$ psia dan $T = 46.038^\circ\text{C}$
 $\mu = 0,00218445 \text{ Kg/ms}$ berdasarkan tekanan dan temperatur di reservoir
- Menghitung q

$$q = \frac{m}{\rho} = \frac{0.3044 \text{ kg/s}}{1066.956 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 0.0000295232 \text{ m}^3/\text{s}$$
- Menghitung L
 L merupakan panjang segment pada reservoir yang ditentukan yakni 10 m. Dengan jarak total segmen yakni 100 m. $L = 10$
- Menghitung k

$$k = 100 \text{ mD}$$

$$k = 100 \text{ mD} \times 9.86e - 9 \text{ cm}^2$$

$$k = 9.8665e - 14 \text{ m}^2$$

- Menghitung A

$$A = \frac{\pi d^2}{4}$$

$$A = \frac{\pi 10.4^2}{4}$$

$$A = 84.9056 \text{ m}^2$$

- Menghitung ΔP

$$\Delta P = \frac{0,00218445 \times 0.0000295232 \times 10 \times 0.000145038}{9.8665e - 14 \times 84.9056}$$

$$\Delta P = 11.16 \text{ psi}$$

Lampiran F Perhitungan Pressure Drop pada Production Well menggunakan metode Beggs-Brill

Untuk mendapatkan nilai *pressure drop* pada *production well* digunakan persamaan berikut

$$\frac{\partial p}{\partial z} = \frac{f_{tp} \cdot \rho \cdot v^2}{g_c \cdot d} - \frac{g}{g_c} \rho$$

Sebelumnya diperlukan perhitungan untuk menghitung variabel lain terlebih dahulu

- Menghitung q

$$q = \frac{m}{\rho}$$

$$q = \frac{0.3044}{1384,495}$$

$$q = 0.00021986 \text{ m}^3/\text{s}$$

- Menghitung A

$$A = \frac{\pi d^2}{4}$$

$$A = \frac{\pi 0.089^2}{4}$$

$$A = 0.0062179 \text{ m}^2$$

- Menghitung v

$$v = \frac{q}{A}$$

$$v = \frac{0.00013191}{0.0062179}$$

$$v = 0.021216 \text{ m/s}$$

- Menghitung σ

$$\sigma = 0.07275 x (1 - 0.002x(T - 291))$$

$$\sigma = 0.07275 x (1 - 0.002 x (311.377 - 291))$$

$$\sigma = 0.06978$$

- Menghitung N_{LV}

$$N_{LV} = v \left(\frac{\rho}{g\sigma} \right)^{0.25}$$

$$N_{LV} = 0.02126 \left(\frac{1384,495}{9.8 \times 0.06978} \right)^{0.25}$$

$$N_{LV} = 0.1423084$$

- Menghitung N_{FR}

$$Fr = \frac{v^2}{gd}$$

$$Fr = \frac{0.040858^2}{9.8 \times 0.089}$$

$$Fr = 0.001914$$

- Menghitung HL(0)
 - Jika $N_{FR} < L_1$ maka pola aliran segregated
 - 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 intermitten
 - L_1 dan L_2 dinyatakan dalam persamaan :

Dimana:

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

$$X = \ln(1)$$

$$X = 0$$

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

$$L_1 = \exp(-4.62 - 3.757 \times (1) - 0.481 \times (1)^2 - 0.0207 \times (1)^3)$$

$$L_1 = 0.009852796$$

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

$$L_2 = \exp(1.061 - 4.602 \times (1) - 1.609(1)^2 - 0.179(1)^3 + 0.635 \times 10^{-3}(1)^5)$$

$$L_2 = 2.889258804$$

Nilai $N_{FR} < L_1$ sehingga pola alirannya adalah segregated.

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

$$H_L(0) = \frac{0.98 (1)^{0.4846}}{(0.00287)^{0.0868}}$$

$$H_L(0) = 1.62886$$

- Menghitung Ψ

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

$$C = (1 - 1) \ln \left[\frac{4.7 \cdot 0.3104^{0.1244}}{1^{0.3692} \cdot 0.00287^{0.5056}} \right]$$

$$C = 0$$

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

$$\Psi = 1 + 2.3691x(\sin \theta - 1/3(\sin \theta)^3)$$

$$\Psi = 1$$

Dengan nilai $\emptyset = 1,8\theta$ pada kasus ini nilai θ adalah -
 90° karena aliran vertikal kebawah

- Menghitung $H_L(\theta)$

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

$$H_L(\theta) = \Psi \times H_L(0)$$

$$H_L(\theta) = 1 \times 1.62886$$

$$H_L(\theta) = 1.62886$$

- Menghitung S

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

$$y = \frac{1}{[1.62886]^2}$$

$$y = 0.37699$$

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

$$S = 0.245727189$$

- Menghitung f_{ns}

Diperlukan nilai reynold number untuk menghitung variabel ini, nilai reynold number untuk aliran dua fasa didapatkan melalui persamaan berikut ini

$$N_{RE} = \frac{[\rho \cdot v \cdot d]}{\mu}$$

$$N_{RE} = \frac{[720.091 \times 0.06798 \times 0.089]}{0.003998786}$$

$$N_{RE} = 1089.574153$$

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

$$f_{ns}$$

$$= \left[2 \log \left(\frac{1089.574153}{4.5223 \log(1721873.766 - 3.8215)} \right) \right]^{-2}$$

$$f_{ns} = 0.010632614$$

- Menghitung f_{tp}

Berdasarkan maka diperlukan nilai f_{ns} dan S

$$\frac{f_{tp}}{f_{ns}} = e^s$$

$$f_{tp} = f_{ns} \cdot e^s$$

$$f_{tp} = 0.010632614 \cdot e^{0.245727189}$$

$$f_{tp} = 0.509870689$$

- Menghitung dp/dz

$$\frac{\partial p}{\partial z} = \frac{f_{tp} \cdot \rho \cdot v^2}{g_c \cdot d} - \frac{g}{g_c} \rho$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = \frac{1.59333 \times 1384,495 \times 0.040858^2}{1 \times 0.09} + \frac{9.8}{1} 1384,495$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = 13609,431 \frac{Pa}{m}$$

Sehingga apabila tekanan campuran pada reservoir 3114,4654 psia, dengan *pressure drop* $13609,431 \frac{Pa}{m}$, maka output tekanan segment pertama (segment n) adalah 3015,83 psia. Dengan nilai tekanan ini, maka temperature juga akan berubah dari 38,02°C menjadi 37,74 °C. Perubahan tekanan dan suhu ini mengakibatkan perubahan pada semua *properties biosurfaktan MEOR*, maka dari itu output segment n, akan menjadi input untuk segment n+1 dan seterusnya.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BIODATA PENULIS



Penulis dilahirkan di kabupaten Sidoarjo, 3 Juli 1996. Penulis merupakan anak pertama dari dua bersaudara. Saat ini penulis tinggal di Desa Ponokawan RT 01 RW 01 Kecamatan Krian Kabupaten Sidoarjo. Pada tahun 2002 penulis menyelesaikan pendidikan di TK Dharma Wanita Ponokawan, Krian, Sidoarjo. Tahun 2008 lulus dari SDN Ponokawan, Krian. Tahun 2011 lulus dari SMPN 2 Krian Sidoarjo dan tahun 2014 lulus dari SMAN 1 Krian Sidoarjo. Di tahun yang sama penulis diterima di Departemen Teknik Instrumentasi Fakultas Vokasi ITS. Setelah lulus di tahun 2017, penulis melanjutkan ke Departemen Teknik Fisika FTI ITS dalam program lintas jalur. Selama kuliah penulis juga aktif berorganisasi yakni sebagai asisten laboratorium Rekayasa Instrumentasi dan Kontrol, serta menjadi staff Departemen Kesma HMTF ITS. Penulis berhasil menyelesaikan tugas akhir dengan judul **“Optimisasi Kondisi Operasi Biosurfaktan *Microbial Enhanced Oil Recovery*”**. Bagi pembaca yang memiliki kritik, saran, atau berdiskusi lebih lanjut mengenai tugas akhir ini dapat menghubungi penulis melalui email syamsurrijal08@gmail.com