Pemodelan Kondisi Operasi PVT Steam Injection pada Proses Enhanced Oil Recovery dengan Metode Lattice Boltzmann dan COMSOL Software

Andika Dwiparana Suherman Natawiria¹ Totok Ruki Biyanto, Ph.D² Jurusan Teknik Fisika, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya Indonesia 60111^{1, 2} email: andikadwiparana@gmail.com¹, trb@ep.its.ac.id²

eman. and kadwiparana@gman.com, no@ep.ns.ac.i

Abstrak-Pemodelan kondisi operasi PVT injeksi uap pada proses enhanced oil recovery diperlukan untuk memprediksi tekanan, temperatur, dan besaran lainnya. Pemodelan ini dilakukan agar dapat menentukan kualitas steam dan kesuksesan enhanced oil recovery dalam tingkat produktifitas minyak yang dapat di produksi kembali serta meminimalisir biaya. Pada tugas akhir ini, dilakukan pemodelan kondisi operasi pressure dan temperature menggunakan metode *lattice Boltzmann* dan perangkat lunak COMSOL. Pressure dan temperature outlet diprediksi untuk dapat mengetahui penurunan pressure atau temperature yang terjadi pada batuan. Langkah awal yang dilakukan adalah pemodelan dengan menggunakan lattice Boltzmann, dimana bentuk rectangle dipergunakan dan tiap node diberikan distribusi fungsi. Selanjutnya dilakukan pemodelan dengan menggunakan perangkat lunak COMSOL, perangkat lunak ini menggunakan hukum darcy yang terintegrasi di dalamnya. Langkah terakhir adalah memvalidasi pemodelan dengan eksperimen vang dilakukan di laboratoritum Universiti Teknologi PETRONAS dengan menggunakan steam injector dan batuan Berea sandstone, yang memiliki permeabilitas 1250mD dan porosity 0.22. Hasil yang didapatkan dari kedua metode ini yaitu besar pressure outlet dan temperature outlet yang dibandingkan dengan outlet eksperimen. Besar outlet dari metode dan eksperimen yang sudah didapat dicari nilai root mean square error (RMSE). RSME ini yang dijadikan patokan agar model ini dapat dikatakan valid atau tidak untuk proses steam injection.

Kata kunci— Steam injection, lattice boltzmann, PVT, COMSOL

I. PENDAHULUAN

Enhanced Oil Recovery (EOR) adalah suatu metode yang digunakan untuk meningkatkan produksi minyak pada suatu sumur dengan cara menurunkan viskositas minyak berat yang masih tertahan di dalam batuan atau *reservoir*. Metode EOR ini dapat dilaksanakan dengan menginjeksikan air, gas, uap panas, *surfactant*, alkali, polimer, atau dsb ke dalam batuan *reservoir* tersebut, tergantung dari properti minyak, properti batuan, dan sejarah sumur yang akan diproses oleh EOR. Injeksi uap merupakan salah satu metode yang sering digunakan untuk meningkatkan cadangan minyak di dalam tanah. Sekitar 70 % dari minyak yang dihasilkan melalui EOR dilaksanakan dengan menggunakan metode injeksi uap [1]. Manfaat utama dari injeksi uap adalah untuk mengurangi viskositas minyak dengan cara memberikan panas dari temperatur *steam injection* [2]. Pada properti batuan dan kondisi sumur yang sama, suhu yang tersimpan dan tertahan pada reservoir setelah proses *steam injection* tergantung pada tekanan dan suhu *inlet* yang akan di injeksikan [3].

Pemodelan merupakan salah satu tahapan agar proses EOR ini berhasil. Pembuatan model kondisi operasi *steam injection* bertujuan untuk memprediksi besarnya tekanan dan temperatur yang dibutuhkan untuk proses *steam injection* [4, 5]. Beberapa model injeksi uap pada *reservoir* atau *porous medium* telah dilakukan oleh beberapa peneliti dengan menggunakan metode analitis, *numerical, finite difference, computational fluid dynamic,* dll.

Pemodelan dalam tugas akhir ini menggunakaan *Lattice Boltzmann* dan *software* COMSOL yang difokuskan untuk membuat simulasi injeksi uap di dalam batuan. Proses injeksi uap pada proses pemulihan minyak (EOR) meninjau properti batuan dan data PVT injeksi uap. Persamaan *non-dimensional* seperti *reynold number, peclet number,* dll dihitung untuk mengetahui *pressure, volume,* dan *temperature* kondisi operasi proses injeksi uap di sumur dan dikomputasikan ke dalam perangkat lunak.

Hasil dari pemodelan diharapkan dapat mendapatkan kondisi operasi (PVT) uap yang diinjeksikan pada sumur horizontal.

Tujuan dari tugas akhir ini yaitu Membuat model kondisi operasi injeksi uap di *core berea sandstone* menggunakan metode *lattice Boltzmann* dan perangkat lunak COMSOL dengan berbagai nilai *pressure* dan *temperature inlet* dan membandingkannya dan membuat validasi model dengan eksperimen pada *core holder* dengan *steam injector* dan *core berea sandstone*.

II. TEORI PENELITIAN

A. Enhanced Oil Recovery

Proses EOR merupakan teknik yang dikenal untuk memproduksi minyak tambahan dari reservoir minyak bumi dengan cara memasukan bahan yang dapat menurunkan viskositas minyak di dalam reservoir [6]. Metode ini secara umum dibagi menjadi tiga kategori utama.

- *Chemical Flooding*: Injeksi air yang bercampur bahan kimia yang ditambahkan ke dalam *reservoir* minyak bumi. Proses kimia meliputi: *Surfactant flooding*, *polymer Flooding*, and *Alkaline Flooding*.
- *Miscible Flooding*: Injeksi ke *reservoir* dari bahan yang terlarut, atau bisa menjadi larut dengan minyak dalam *reservoir*. Bahan tersebut adalah karbon dioksida, hidrokarbon, dan nitrogen.

• Thermal Recovery: Injeksi uap ke dalam reservoir minyak bumi, atau penyebaran zona panas melalui reservoir melalui udara atau oksigen. Proses termal meliputi : steam flooding (seperti pada gambar 1), injeksi uap siklik, dan in situ combustion.



Gambar 1 proses injeksi steam di reservoir

B. Heavy oil recovery dengan proses steam injection

Heavy oil adalah minyak mentah dengan API gravity kurang dari 22,3° dan viscosity yang lebih dari 100 cp (Centipoise). Kandungan heavy oil sampai dengan kategori bitumen (API gravity < 10°, viscosity > 10.000) memiliki jumlah lebih dari 2/3 dari kandungan minyak bumi yang ada di bumi. Karena karakteristiknya, heavy oil tidak mudah untuk dieksploitasi sehingga dibutuhkan usaha lebih untuk mendapatkannya yaitu dengan EOR. Salah satu jenis metode EOR adalah menggunakan energi panas. Energi panas tersebut bisa didapat dari injeksi uap dan pembakaran (*in situ* combustion). Metode yang menggunakan injeksi uap antara lain cyclic steam stimulation, steam assisted gravity drainage dan steam flooding. Sedangkan metode yang menggunakan pembakaran adalah *in-situ combustion*

C. Aliran Fluida dan Perpindahan Panas pada Porous Medium

Porous medium adalah bahan yang mengandung void / pori-pori, yang dapat berisi cairan (liquid atau gas). Bagian rangka dari material porous medium ini sering disebut "matrix" atau "frame" yang biasanya padat; Namun, dalam beberapa struktur seperti busa, struktur ini juga dapat dianggap sebagai media berpori. Matriks padat diasumsikan solid dan matriks di mana terdapat pori-pori diasumsikan sebagai cairan dengan fase tunggal. Baik matriks padat dan jaringan pada media berpori, diasumsikan strukturnya sama seperti spons. Gambaran umum batuan porous medium dapat dilihat pada gambar 2.



Gambar 2 gambaran porous medium

D. Persamaan Darcy dan Penurunan Pressure

Permeabilitas dikenal sebagai konduktivitas hidrolik, sifat aliran dari cairan yang terdapat pada media berpori atau hidrolik. Hal ini diperkenalkan oleh Darcy pada tahun 1856 dan di didefinisikan sebagai tingkat kemudahan bagi cairan untuk bergerak melalui ruang berpori. Persamaan umum Darcy adalah dijelaskan sebagai berikut,

 $q = c A \Delta P / L$

dimana:

q

 ΔP = beda tekanan dari titik awal dan titik akhir (psi)

A = Luas area yang dilalui oleh fluida (m^2)

L = Panjang medium yang dilalui (m)

Konstanta c didapat dari inverse proporsional viscositas fluida yang digunakan. Oleh karena itu diganti dengan k/μ sehingga peramaannya menjadi:

$$q = k \frac{A \Delta P}{\mu L}$$
⁽²⁾

Kostanta merupakan nilai permeabilitas dari medium dengan dimensi cm2. Karena tidak ada batuan yang memiliki nilai permeability sebesar 1 cm2, maka dibuat suatu satuan baru yang dinamakan darcy dimana 1 darcy = $9,869 \times 10^{-9}$ cm.

Gambar 3 merupakan alat yang digunakan dalam pengukuran permeabilitas ini yang dinamakan *core holder*.



Gambar 3 Skematik Core Holder

III. METODOLOGI

A. Pengumpulan Data

Persamaan yang digunakan untuk membuat *lattice* boltzmann model pada steam injection memerlukan beberapa besaran data yaitu *Pressure* (P) dan *Temperature* (T) pada inlet steam injection seperti yang dapat dilihat pada **tabel 1** : **Tabel 1.** Inlet Pressure dan Temperature Steam Injection

Temperature (°C)	Pressure (Psi)
300	1000
300	1250
300	1500
250	500
250	750
250	1000
200	200
200	400
200	600
	Temperature (°C) 300 300 200 250 250 250 250 250 200 200 200

Selain itu, data *permeability* (K) batuan sebesar 1250mD, porosity (ɛ) sebesar 0.22, panjang (L) batuan sebesar 12cm, diameter (d) batuan sebesar 4cm, *thermal conductivity* (k) sebesar 2.57×10^{-2} W/m-K, *thermal diffusivity* (a) sebesar 2.16×10^{-5} m²/s, *thermal expansion coefficient* (β) sebesar 3.18×10^{-3} didapatkan dari spesifikasi *properties* batuan yang akan dicoba dan jurnal acuan yang dijadikan referensi, data lainnya yaitu *steam properties* yang terdiri dari *steam kinematic viscosity* (v) sebesar 1.57×10^{-5} m²/s, *steam velocity* (u) sebesar 0.01 m/s, *steam specific heat capacity* (cp) sebesar 920 J/kg.K dan *mean free path* sebesar 2.38×10^{-8} dari tabel *properties steam* dan referensi jurnal.

B. Pemodelan kondisi operasi *steam injection* dengan *lattice Boltzmann*

Persamaan di bawah ini merupakan persamaan yang telah dimodelkan oleh Guo *et al* pada tahun 2002, yang merupakan persebaran thermal untuk tiap node pada partikel dengan metode *lattice boltzmann*.

$$g_{a}(x + e_{a}\delta_{t}, t + \delta_{t} - g_{a}(x, t)) = -\frac{1}{\tau_{c}}[g_{a}(x, t) - g_{a}^{(eq)}(x, t)]$$
(3)

Dimana :

 $g_a(x, t) =$ thermal distribution function $e_a =$ velocity pada posisi x dan waktu t $\delta_t =$ kenaikan waktu $\tau_v =$ dimensionless relaxation time $g_a^{(eq)} =$ fungsi distribusi equilibrium

Kalkulasi *lattice boltzmann* terdiri atas tahap *collision*, *streaming*, dan dibatasi oleh *boundary*. [18]. Persamaan keduanya dapat dilihat pada persamaan di bawah ini:

Persamaan collision step:

$$g_a^{out}(x,t) = g_a^{in}(x,t) + \Omega_a(g^{in}(x,t))$$
⁽⁴⁾

Persamaan streaming atau propagation step:

$$g_a{}^{in}(x+e_a,\delta_t,t+\delta_t) = g_a{}^{out}(x,t)$$

Dimana :

 g_a^{out} = nilai distribusi setelah *collision* g_a^{in} = nilai setelah *collision* dan *propagation* Ω_a = fungsi *collision*

Selain kedua hal diatas adapun *boundary* yang dijadikan sebagai acuan untuk pengaruh dari lingkungan. *Boundary* ini terdiri atas *inlet*, *bottom*, *top*, dan *outlet*, dan terdiri atas *temperature boundary* dan *velocity boundary*

Ketiga hal di atas yang akan mencerminkan simulasi nantinya di dalam Matlab. Gambaran lattice boltzmann di dalam komputasi dilihatkan pada **gambar 4**.



Gambar 4. Skema lattice boltzmann pada sebuah medium

Fungsi *collision* ini di temukan oleh bhatnagar et al pada tahun 1954, persamaan ini diturunkan berdasarkan persamaan *relaxation*, dikarenakan didalam proses collision terdapat jeda menuju fungsi *equilibrium*, fungsi *relaxation* ini di jabarkan sebagai berikut:(3.5)

$$\Omega(f)\Delta t = -\frac{g - g^{eq}}{\lambda} \tag{6}$$

Dimana:

- $\Omega(f)$ = operasi *collision*

- $\lambda = relaxation time$ fungsi dari *viscosity*

-
$$f =$$
fungsi distribus

– g^{eq}= fungsi distribusi equilibrium

Sebelum masuk penjelasan D2Q9, adapun *weight factor* yang digunakan sebagai acuan untuk pemberatan *vector* arah dari tiap node [15]. Hal ini yang dapat dilihat pada uraian dan tabel di bawah ini:

- w_0 , a = 0, ini adalah *rest vector*
- w_s , a = 1,2,3,4, ini adalah *short vector*
- w_1 , a = 5,6,7,8, ini adalah *long vector*

Berdasarkan perhitungan referensi yang telah dikemukakan, adapun beberapa kondisi yang terkait dengan penentuan nilai *weight factor* di atas, yaitu sebagai berikut :

$$w_0 + 4w_s + 4w_l = 1 \tag{7}$$

$$2w_s + 4w_l = c_s^2 \tag{8}$$

(5)

$$2w_s + 4w_l = 3c_s^4 \tag{9}$$

$$4\mathbf{w}_l = c_s^4 \tag{10}$$

Gambaran *weight factor* untuk tiap *node* ditampilkan dalam **tabel 2**:

Tabel 2. Detil data D2Q9 pada lattice boltzmann

D2Q9			
e _a	W _a		
(0,0)	w ₀ =4/9		
(±1,0)	w _s =1/9		
$(\pm 1, \pm 1)$	w _l =1/36		
$c_{\rm s}^2 = 1/3$			

Velocity vector digambarkan dengan sudut pembagian berdasarkan penelitian sebelumnya oleh Frisch et al, yang disederhanakan menjadi seperti berikut [16]:

$$\mathbf{e}_{\mathbf{a}} = (\cos \pi a/3, \sin \pi a/3) \tag{11}$$

Dimana a adalah jumlah arah pada *velocity vector* (a=1,2,3,..,8), dapat dilihat pada **gambar 5**



Gambar 5. Node yang ada pada *lattice boltzmann*

Setelah diketahui *weight factor* tersebut, maka fungsi distribusi *equilibrium function* berubah menjadi :

$$g_a^{(eq)} = w_a \rho \left(1 + \frac{3\mathbf{e}_a \cdot u}{c^2} + \frac{9(\mathbf{e} \cdot \mathbf{u})^2}{2c^4} - \frac{3u^2}{2c^2}\right)$$
(12)

Untuk persamaan pada penelitian ini digunakan dengan 9 node dan 2 dimensi, membuat distribusi fungsi *equilibrium* temperature menjadi:

$$g_{0}^{(eq)} = -\frac{2\rho e u^{2}}{3c^{2}}$$

$$g_{1-4}^{(eq)} = -\frac{\rho e}{9} \left[\frac{3}{2} + \frac{3}{2} \frac{e_{a.u}}{c^{2}} + \frac{9}{2} \frac{(e_{a.u})^{2}}{c^{4}} - \frac{3}{2} \frac{u^{2}}{c^{2}} \right]$$

$$(13)$$

$$g_{5-8}^{(eq)} = -\frac{\rho e}{36} \left[3 + \frac{6e_{a.u}}{c^{2}} + \frac{9}{2} \frac{(e_{a.u})^{2}}{c^{4}} - \frac{3}{2} \frac{u^{2}}{c^{2}} \right]$$

$$(13)$$

$$(13)$$

Dimana e =3RT/2, dengan R adalah konstanta gas (R=8.314 [J/mol]-K), maka temperature dan *density* secara *macroscopic* dihitung sebagai berikut:

$$\rho(\frac{2RT}{2}) = \sum_{a} g_a \tag{14}$$

Geometri *porous medium* dan *permeability* telah di rumuskan oleh ergun (1952) berdasarkan eksperimen dengan *porosity* batuan yang nantinya akan digunakan sebagai pengurangan gaya partikel yang masuk, fungsi geometri tersebut dijelaskan sebagai berikut:

$$F_{\varepsilon} = \frac{1.75}{\sqrt{150\varepsilon^3}}; K = \frac{\varepsilon^3 d_p^2}{150(1-\varepsilon)^2}$$
(15)

Dimana d_p adalah diameter dari *solid particle*.

Karakteristik aliran dan perpindahan panas pada fluida juga tergambarkan berdasarkan *dimensionless number* yaitu:

$$Da = \frac{K}{L}; Pr = \frac{v}{\alpha}; Ra = \frac{g\beta\Delta TL^3}{v\alpha}; Re = \frac{LU}{v}$$
(16)

C. Pemodelan kondisi operasi *steam injection* dengan COMSOL *multiphysics*

COMSOL *multiphysics* digunakan untuk mensimulasikan steam injection berdasarkan data core berea sandstone dari Universiti Teknologi PETRONAS, persamaan yang ada di dalam perangkat lunak sama dengan hukum Darcy's dan persamaan Q atau *heat transfer* pada *porous media* untuk data yang digunakan pada COMSOL dapat dilihat pada **tabel 3**: **Tabel 3**. Tabel properti steam dan sandstone pada COMSOL

No	D. Viscos (Cp)	T. ConductivityDensity(W/m.K)(kg/m3)		Heat Capacity (J/kg.K)
1	0.021	0.025	2500	920
2	0.021	0.025	2500	920
3	0.087	0.025	2500	920
4	0.018	0.025	2500	920
5	0.018	0.025	2500	920
6	0.103	0.025	2500	920
7	0.016	0.025	2500	920
8	0.016	0.025	2500	920
9	0.131	0.025	2500	920

D. Proses validasi dengan data eksperimen

Untuk mengetahui keakuratan dan kebenaran model yang digunakan, validasi dilakukan dengan eksperimen menggunakan *coreholder* dan *steam injector* skala laboratorium di Universiti Teknologi PETRONAS. Data yang digunakan sama dengan model dan simulasi oleh lattice boltzmann dan COMSOL, susunan data input dapat dilihat pada **tabel 1**.

IV. DATA DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Simulasi Matlab dan COMSOL

Input disesuaikan berdasarkan tabel *inlet pressure* dan *temperature* yang ada pada tabel 1. Model dilakukan 9 kali dengan input nilai inlet yang berbeda-beda. **Gambar 6,7,8,9** adalah hasil dari model lattice boltzmann yang di program di dalam Matlab.



Gambar 6. Pada T *inlet* 300°C grafik *temperature* menunjukan besar T *outlet* 279.70°C pada titik 12 cm.



Gambar 7. Pada P inlet 1500 psi grafik pressure menunjukan besar P outlet 1497.12 psi







Gambar 9. Pada T *inlet* 300°C dan P *inlet* 1500 psi grafik *temperature* menunjukan penurunan dengan besar T *outlet* 297.49°C

Dengan simulasi *lattice boltzmann* dapat dilihat bahwa perbedaan pressure tidak berbeda jauh antara inlet dan outlet dikarenakan pendeknya jarak *core* yang di uji coba, sedangkan *temperature* terdapat perbedaan antara *lattice Boltzmann* dan COMSOL.

B. Validasi Model dengan Eksperimen

Untuk mengetahui kebenaran model yang digunakan maka dilakukan validasi menggunakan eksperimen. Alat yang digunakan dalam eksperimen ini adalah*core holder*. Fluida akan diinjeksi ke dalam *core holder* yang merepresentasikan proses injeksi ke dalam *reservoir*. Rancangan eksperimen menggunakan metode *Taguchi*. Terdapat dua parameter dalam eksperimen ini yaitu tekanan dan temperatur. Parameter-parameter tersebut menggunakan tiga level, yaitu *low, middle, high*. Nilai level terhadap tiap parameter ditunjukan oleh **tabel 4**.

Fabel 4. Validasi model	dengan eks	perimen
-------------------------	------------	---------

No.	Lattice		COMSOL		Eksperimen pada	
Eks.	Boltzmann multiphysics		Core Holder			
	T (°C)	P (psi)	T (°C)	P (psi)	T (°C)	P (psi)
1	279.7	1497.1	297.4	1481.2	297.7	1494.5
2	276.1	1247.2	297.4	1247.1	297.7	1248.2
3	275.5	987.3	297.5	987.5	295.9	992.3
4	248.4	1497.4	247.8	1497.4	247.6	1495.2
5	248.4	1247.4	247.7	1247.4	247.4	1248.8
6	245.7	985.1	247.6	985.2	247.1	993.1
7	196.5	1497.7	198.3	1497.8	196.4	1497.7
8	196.4	1247.7	198.4	1247.7	196.3	1249.1
9	196.3	997.6	197.7	981.2	196.3	998.4

Adapun perbandingan *error* antara eksperimen antara metode *Lattice Boltzmann* (LB) dan COMSOL, dapat dilihat pada **tabel 5**.

Tabel 5. Tabel Root Mean Square Error (RMSE) antara pemodelan dan eksperimen

No.	Error (%) pada –				
Eksperi men	T LB P LB		T COMSOL	P COMSOL	
1	6.03	0.90	0.21	13.3	
2	6.06	1.35	0.30	1.08	
3	5.73	1.13	1.69	4.79	
4	0.44	0.94	0.27	2.20	
5	0.36	1.41	0.39	1.40	
6	1.80	1.21	0.54	7.82	
7	0.23	1.12	1.96	0.10	
8	0.43	1.46	2.11	1.40	
9	1.10	1.74	1.44	17.12	
Root Mean Square Error (RMSE)	1.23	0.62	0.22	0.24	

Tabel 5 menjelaskan perbandingan *error* antara model *lattice boltzmann* dengan data eksperimen dan perangkat lunak COMSOL dengan data eksperimen. Dari Tabel 4.2 dapat dilihat bahwa RMS *error* terbesar terjadi pada *temperature* di metode *lattice Boltzmann* sebesar 1.23% hal inilah yang mengindikasikan kepada pembaca apabila ingin menggunakan model untuk mensimulasikan PVT *steam injection* pada *core* ataupun *reservoir*.

C. Hasil *Sensitivity Analysis* terhadap Variabel *Length*, *Porosity*, dan *Permeability*.

Dari hasil pressure outlet dan temperature outlet, sensitivity analysis dibuat dengan growth dari10% sampai 100%. Hasil penurunan temperature dan pressure untuk tiap input temperature dan pressure hasil sensitivity analysis dapat dilihat pada gambar 10-15.



Gambar 10. Grafik sensitivity analysis temperature dengan length



Gambar 11. Grafik sensitivity analysis pressure dengan length

Tabel dan gambar ini berguna nantinya sebagai panduan pembaca untuk melihat *sensitivity pressure* dan *temperature* dengan persentase pertambahan panjang tertentu. Pada grafik didapatkan besar *sensitivity length* untuk *pressure* adalah -1.96 psi sedangkan *temperature* adalah -2.04°C.



Gambar 12. Grafik sensitivity analysis temperature dengan porosity



Gambar 13. Grafik sensitivity analysis pressure dengan porosity

Tabel dan gambar ini berguna nantinya sebagai panduan pembaca untuk melihat *sensitivity pressure* dan *temperature* dengan persentase pertambahan *porosity* tertentu. Pada grafik didapatkan besar *sensitivity porosity* untuk *pressure* adalah -0.0037 psi sedangkan *temperature* adalah 0.074°C. Dari Gambar 4.18 dan Gambar 4.19 dapat ditarik kesimpulan bahwa model COMSOL pada *temperature* dan *pressure* tidak *sensitive* terhadap *porosity*.



Gambar 14. Grafik sensitivity analysis temperature dengan permeability



Gambar 15. Grafik sensitivity analysis pressure dengan permeability

Tabel dan gambar ini berguna nantinya sebagai panduan pembaca untuk melihat *sensitivity pressure* dan *temperature* dengan persentase pertambahan *permeability* tertentu. Pada grafik didapatkan besar *sensitivity permeability* untuk *pressure* adalah 1.078 psi sedangkan *temperature* adalah 0.0055°C. Dari Gambar 4.18 dan Gambar 4.19 dapat ditarik kesimpulan bahwa model COMSOL pada *temperature* tidak *sensitive* terhadap *permeability*, sedangkan *pressure* mengalami kenaikan dengan pertambahan *permeability*.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis data yang telah dilakukan, didapatkan beberapa kesimpulan dari tugas akhir ini adalah:

- Dari penelitian ini dapat disimpulkan sebagai berikut :
- Model *lattice boltzmann* dan COMSOL setelah dibandingkan didapatkan hasil *Root Mean Square Error* (RMSE) terbesar pada bagian temperature *Lattice Boltzmann* dengan RMSE sebesar 1.23%, hal ini disebabkan oleh banyak faktor, salah satunya *temperature boundary*, *time step*, iterasi, dll, sedangkan COMSOL memiliki error sebesar 0.45%, hal ini menunjukan bahwa perangkat COMSOL lebih baik digunakan untuk memodelkan P dan T *steam injection*.
- Hasil validasi model dengan eksperimen didapatkan hasil RMSE untuk *temperature lattice boltzmann* sebesar 1.23% dan *pressure lattice boltzmann* 0.62%, sedangkan perangkat lunak COMSOL didapatkan RMSE untuk *temperature* sebesar 0.22% dan *pressure* sebesar 0.24%, dilihat dari perbedaan error antara model dan eksperimen terlampau metode COMSOL lebih mendekati nilai eksperimen.
- Berdasarkan sensitivity analysis, karakteristik model didapatkan berdasarkan perubahan length, pressure, dan temperature. Hasil dari sensitivity analysis menunjukan bahwa model COMSOL sensitif terhadap permeability untuk pressure dengan besar sensitivity 1.078 psi/m², sedangkan terhadap porosity, COMSOL sensitif pada temperature dengan besar sensitivity 0.074°C/%porosity, dan untuk length, COMSOL sensitif pada temperature dan pressure dengan besar sensitivity -2.04°C/cm untuk temperature, dan -1.96 psi/cm untuk pressure.

B. Saran

Pertimbangan untuk menentukan *pressure* dan *temperature* pada proses simulasi *steam injection*, dibutuhkan faktor data yang sangat kuat terutama *heat transfer coefficient* yang dapat berubah seiring berubahnya *pressure* dan *temperature*. Untuk penelitian berikutnya alangkah baiknya jika, percobaan *steam injection* pada core holder, dapat ditentukan suhu *boundary* nya sehingga hasil temperatur dan *pressure* dapat didapatkan dengan hasil yang baik dan akurat. Selain itu, penelitian ini baik jika dilanjutkan dengan mengganti fluida yang dipakai pada *enhanced oil recovery* lebih beragam seperti CO₂, *Alkaline*, *Polymer*, Surfaktan, dll.

DAFTAR PUSTAKA

- L. Zhong, S. Zhang, F. Wu, B. Lang, and H. Liu, "Improved Heavy-Oil Recovery by Separated-Zones Horizontal-Well Steam Stimulation," 2012/3/1/.
- [2] B. Gunadi, "Experimental and Analytical Studies of Cyclic Steam Injection Using Horizontal Wells," *Texas A&M University*, 1999.
- [3] T. C. Boberg, "Calculation of the Production Rate of a Thermally Stimulated Well," 1966/12/1/.
- [4] B. T. Gael, E. S. Putro, and A. Masykur, "Reservoir Management in the Duri Steamflood."
- [5] A. A. Bashar, "Modeling of Cyclic Steam Stimulation in A Reservoir: A Case Study of A Sudanese Reservoir," Sudan University of Science and Technology, 2010.
- [6] E. M. Kutay, "Modeling Moisture Transport in Asphalt Pavements," *PhD Thesis*, 2005.
- [7] S. M. Kleinknecht, "Steam Injection Technique for In Situ Remediation of Chlorinated Hydrocarbons from Low Permeable Saturated Zones - Experiment and Numerical Approach," Universit at Stuttgart -Institut f ur Wasserbau, 2011.
- [8] K. Avila, Moxei, D., Lozar, A., Avila, D., and Barkley, D., ""The Onset of Turbulence in Pipe Flow"," vol. Science vol. 333, pp. pp. 192-196., 2011.
- [9] F. M. White, "Viscous Fluid Flow, 3rd edition," 2006.
- [10] B. R. Munson, Young, D.F., Okiishi, T.H., and Huesbsch, W.W., "Fundamentals of Fluid Mechanics, 6th edition," 2008,.
- [11] S. Succi, "The Lattice Boltzmann Equation for Fluid Dynamics and Beyond," 2001.
- [12] G. R. MacNamara, and Zanetti, G., ""Use of the Boltzmann Equation to Simulate Lattice Gas Automata"," vol. vol. 61, no. 20, pp. pp. 2332-2335., 1988.
- [13] R. Maier, Kroll, D., Kustovsky, Y., Davis, H. T., and Bernard, R., " "Simulation of Flow through Bead Packs Using the Lattice Boltzmann Method"," *AIP Publishing LLC*,, vol. vol. 10, pp. pp. 1-16., 1997.
- [14] S. Chapman, and Cowling, T. G., "The Mathematical Theory of Non-Uniform Gases," *Cambridge University Library, New-York*, vol. 3rd edition, 1970.

- [15] R. Begun, and Basil, M. A., "Lattice Boltzmann Method and Its Applications to Fluid Flow Problems," *Euro Journals Publishing Inc.*, 2008.
- [16] U. Frisch, Hasslacher, B., and Pomeau, Y., " "Lattice Gas Automata for Navier-Stokes Equation"," *Physical Review Letters*, vol. vol. 56, pp. pp. 1505-1508., 1986.
- [17] Z. Guo, and Zhao, T. S., ""Lattice Boltzmann Model for Incompressible Flows through Porous Media"," *Physical Review Letters*, vol. vol. 66, pp. pp. 036304-1036304-9, 2002.
- [18] B. D. Chirila, "Introduction to Lattice Boltzmann Methods," 2010.