

Pemodelan Penyebaran Massa CO_2 Terinjeksi dalam *reservoir* untuk Mendapatkan Respon Anomali *Time-lapse Microgravity* di Permukaan

Rahmani D.L.* dan Dahrin D.

Teknik Geofisika, Fakultas Teknik Pertambangan dan Perminyakan, Institut Teknologi Bandung,
Jalan Ganesa No 10, Bandung, 40132

*Email: dind.larasati@gmail.com

Submit: 8 April 2017; Revised: 18 Mei 2017; Accepted: 20 Mei 2017

Abstract: Dalam proyek CCS, monitoring bawah permukaan perlu dilakukan dengan baik agar CO_2 yang diinjeksikan dapat tersimpan dengan aman di dalam *reservoir*. Salah satu metode geofisika yang dapat digunakan untuk monitoring bawah permukaan adalah metode *gravity*. Dengan membuat model sintetik volume *reservoir*, tekanan dan temperatur bawah permukaan, serta perhitungan aliran *fluida* pada rentang waktu tertentu, dapat diprediksi radius penyebaran CO_2 dan distribusi densitasnya di dalam *reservoir*. Radius penyebaran dan kontras densitas yang didapatkan, digunakan untuk pemodelan ke depan *time-lapse microgravity* dengan menggunakan *software* MATLAB versi R2012a yang telah divalidasi dengan *software* yang sudah ada sebelumnya, GRAV3D versi 2.0. Berdasarkan perhitungan dan pemodelan yang telah dilakukan, diketahui peningkatan tekanan *bottomhole* mengakibatkan perubahan sifat fisis CO_2 yang mempengaruhi radius penyebarannya. Kemudian, respon anomali *time-lapse microgravity* yang dihasilkan menunjukkan kecenderungan nilai anomali yang terus meningkat seiring bertambahnya massa CO_2 yang diinjeksikan. Nilai anomali setengah maksimum dan radius yang didapatkan pada hari ke 720, yaitu $1,323 \times 10^{-1} \mu Gal$ dan 631,688 m untuk penyebaran massa CO_2 di dalam *reservoir* sejauh 96,436 m. Dari kurva perbandingan tekanan *reservoir* terhadap tekanan *fracture* dan litostatik pada hari ke 720, didapatkan nilai tekanan pada kedalaman *reservoir* yang diinjeksikan CO_2 masih jauh di bawah tekanan *fracture* dan litostatik, sehingga penambahan massa dari injeksi CO_2 yang dimodelkan ini sangat kecil berpotensi untuk menimbulkan rekahan baru pada formasi. Dengan demikian, hasil pemodelan penyebaran CO_2 dan distribusi densitasnya dalam *reservoir*, yang dikaitkan pula dengan perbandingan tekanan *reservoir* terhadap tekanan *fracture* dan litostatik, dapat digunakan untuk menentukan aman atau tidaknya injeksi CO_2 yang dimodelkan.

Kata kunci: sifat fisis CO_2 , aliran *fluida*, *time-lapse microgravity*, pemodelan ke depan.

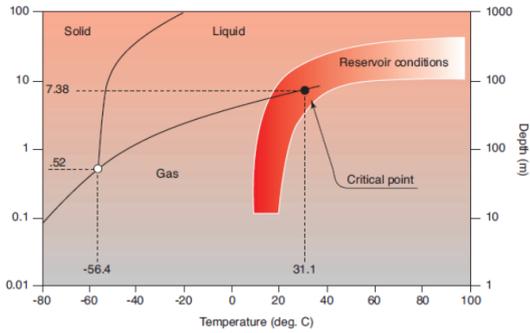
1 PENDAHULUAN

Berdasarkan analisis temperatur yang dilakukan oleh NASA's *Goddard Institute for Space Studies* (GISS) yang dikeluarkan pada tahun 2013, suhu rata-rata bumi telah meningkat sekitar $0,8^\circ C$ sejak tahun 1880. Salah satu penyebabnya antara lain adalah peningkatan kandungan karbon dioksida di atmosfer. Terdapat beberapa dampak yang ditimbulkan dari peningkatan karbon dioksida tersebut, antara lain adalah perubahan iklim, peningkatan muka air laut, dan gangguan ekologis lainnya.

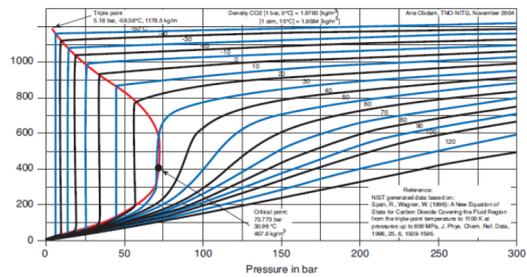
Berdasarkan Peraturan Presiden Republik Indonesia No. 62 tahun 2013, dinyatakan bahwa pemerintah Indonesia berkomitmen untuk menurunkan emisi gas rumah kaca sebesar 26% pada tahun 2020. Salah satu solusi yang dapat mendukung komitmen pemerintah tersebut adalah dengan menerapkan teknologi *Carbon Capture and Storage* (CCS).

CCS merupakan salah satu teknologi yang menerapkan rangkaian proses mulai dari pemisahan, penangkapan, hingga penyimpanan karbon dioksida ke dalam *reservoir* penyimpanan yang jauh dari atmosfer untuk waktu yang lama. Lapangan pertama di Indonesia yang dijadikan *first pilot project* untuk injeksi CO_2 adalah Lapangan Gundih, Jawa Tengah. Dalam proyek CCS ini, monitoring bawah permukaan perlu dilakukan dengan baik agar injeksi CO_2 dapat dilakukan dengan baik dan tidak terjadi kegagalan. Salah satu metode geofisika yang dapat digunakan untuk monitoring bawah permukaan adalah metode *gravity*. Metode ini relatif lebih murah dalam operasionalnya dan ramah lingkungan dibandingkan dengan metode seismik.

Dengan melakukan pemodelan aliran *fluida* dan pemodelan ke depan *time-lapse microgravity* yang dikaitkan pula dengan perbandingan tekanan *reservoir* terhadap tekanan *fracture* dan litostatik, penyebaran massa CO_2 di dalam *reservoir* dapat diprediksi serta dapat diketahui pula kemungkinan munculnya rekahan baru pada formasi akibat injeksi CO_2 .



Gambar 1. Diagram fasa CO₂ (2).



Gambar 2. Densitas CO₂ (kg/m³) sebagai fungsi tekanan (bar) dan temperatur (°C) (2).

2 TEORI DASAR

2.1 4D Time-lapse Microgravity

4D *time-lapse microgravity* merupakan pengukuran gayaberat yang dilakukan pada titik stasiun yang sama, dalam waktu yang berbeda, dan diukur dalam skala mikro-gal serta akurasi altimeter dalam skala mm. Perhitungan untuk anomali komponen vertikal *gravity* model prismatik segiempat dapat dijelaskan melalui persamaan berikut (1):

$$g(x,y,z) = G\rho \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^2 s_{ijk} \times [z_k \tan^{-1} \frac{x_i y_j}{z_k r_{ijk}} - x_i \ln(r_{ijk} + y_j) - y_j \ln(r_{ijk} + x_i)] \quad (1)$$

dimana:

$$s_{ijk} = S_i S_j S_k = (-1)^i (-1)^j (-1)^k, \quad (2)$$

$$x_i = x - a_i, y_j = y - b_j, z_k = z - c_k,$$

$$r_{ijk} = \sqrt{x_i^2 + y_j^2 + z_k^2}$$

Anomali 4D *time-lapse microgravity* merupakan selisih antara anomali *microgravity* pada periode t_2 dan t_1 .

$$\Delta g = (x, y, z, \Delta t) = g(x, y, z, t_2) - g(x, y, z, t_1) \quad (3)$$

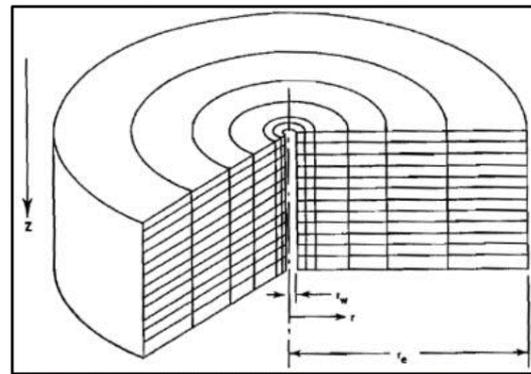
2.2 Sifat Fisis CO₂

CO₂ dapat berfasa padat pada temperatur rendah dan tekanan di atas 0,1 MPa. Kemudian dengan bertambahnya temperatur, fasa CO₂ dapat berubah menjadi gas dan cair, bergantung pada tekanannya.

Densitas CO₂ dipengaruhi oleh temperatur dan tekanan. Berikut ini diagram densitas CO₂(kg/m³) sebagai fungsi tekanan (bar) dan temperatur (°C).

2.3 Penyebaran Massa CO₂

Pendekatan yang digunakan untuk menentukan penyebaran massa CO₂ pada penelitian ini adalah pemodelan aliran *fluida* 3 fasa dalam arah radial dari satu sumur injeksi. Studi simulasi *reservoir* pada satu sumur secara umum digunakan untuk menganalisis sumur (*well test*) dan memprediksi efek dari injeksi ataupun produksi *fluida* ke dalam *reservoir*. (3).



Gambar 3. Model aliran *fluida* pada satu sumur injeksi dalam arah radial (3).

Pada penelitian ini, digunakan persamaan diferensial yang menghubungkan sifat *fluida*, medium berpori, dan kondisi aliran di dalam *reservoir*. Untuk mendeskripsikan penyebaran massa CO₂ melalui media berpori secara matematis, perhitungan pada penelitian ini menggunakan persamaan diferensial yang mengacu pada dua hukum fundamental, yaitu Hukum Kekekalan Massa dan Hukum Darcy. Berikut ini adalah solusi persamaan diferensial aliran *fluida* dalam arah radial:

$$q_{fr} = \frac{-2\pi r h \beta_c k_r k_{rel f} dp_f}{B_f \mu_f dr} \quad (4)$$

dengan kecepatan volumetrik *fluida* (u) dalam arah radial ditulis sebagai berikut:

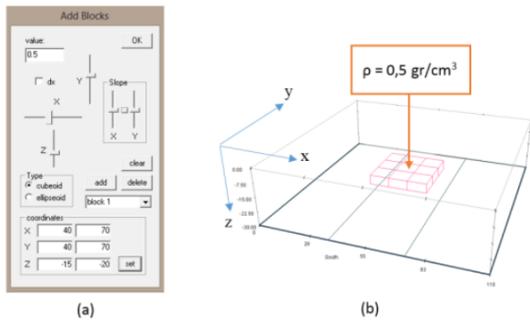
$$u_{fr} = - \frac{\beta_c k_r k_{rel f} dp_f}{B_f \mu_f dr} \quad (5)$$

antara u dengan A dan q dituliskan sebagai berikut:

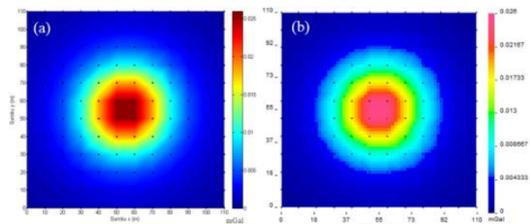
$$A_{tot} = \frac{q_{tot}}{u_{tot}} \quad (6)$$

2.4 Carbon Capture and Storage (CCS)

Carbon Capture and Storage (CCS) adalah suatu proses penangkapan gas CO₂ dalam jumlah besar dengan memisahkan CO₂ dari hasil sampingan industri atau sumber energi lainnya yang berkaitan, membawanya ke suatu tempat penyimpanan (*transport*), dan menyimpannya jauh dari atmosfer di dalam suatu *reservoir* penyimpanan (*storage*) untuk jangka waktu yang lama.



Gambar 4. Model bodi anomali menggunakan software GRAV3D versi 2.0. (a) Parameter model bodi anomali. (b) Tampilan mesh dan bodi anomali.



Gambar 5. Respon anomali gravity di permukaan: (a) MATLAB (b) GRAV3D.

Proyek CCS pertama di Indonesia berada di Lapangan Gundih, Jawa Tengah. Litologi tempat diinjeksikannya CO_2 di lapangan ini adalah Formasi Ngrayong. Formasi tersebut merupakan formasi batupasir yang memiliki permeabilitas baik, sehingga cocok sebagai *reservoir* penyimpanan CO_2 . Bagian atas dari Formasi Ngrayong adalah Formasi Wonocolo yang memiliki permeabilitas yang rendah, sehingga cocok sebagai lapisan penutup (4).

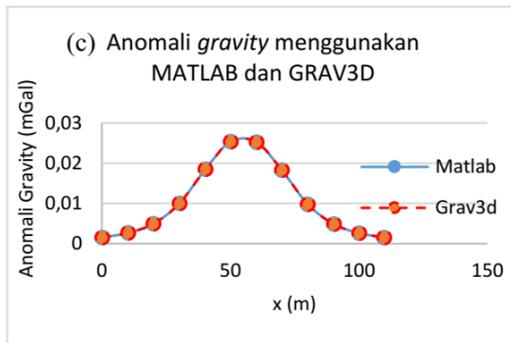
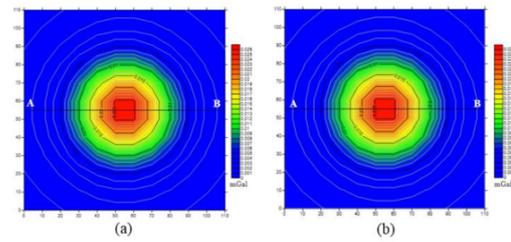
3 PENGOLAHAN DATA

3.1 Pemodelan ke Depan

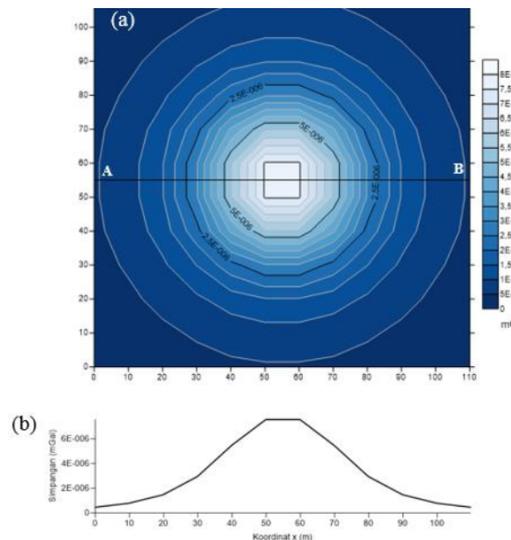
Pada penelitian kali ini, dilakukan pemodelan ke depan *time-lapse microgravity* dengan menggunakan software MATLAB versi R2012a. Persamaan yang digunakan dalam pemodelan ini, yaitu rumus perhitungan komponen vertikal *gravity* model prismatic segiempat oleh Plouff (1976) (1). Untuk memastikan pemrograman di MATLAB berjalan dengan baik dan benar, dilakukan validasi hasil pemodelan ke depan menggunakan MATLAB dengan software yang telah ada sebelumnya, yaitu GRAV3D. Berikut ini adalah model bodi anomali untuk validasi pemodelan ke depan dengan menggunakan MATLAB dan GRAV3D:

Berikut ini adalah respon anomali *gravity* berdasarkan pemodelan ke depan menggunakan MATLAB dan GRAV3D:

Dari gambar di atas diketahui bahwa nilai simpangan maksimum hasil pemodelan MATLAB terhadap GRAV3D bernilai 6×10^{-6} mGal yang relatif sangat kecil, sehingga hasil respon anomali *gravity* berdasarkan pemodelan di MATLAB



Gambar 6. Respon dan slice anomali gravity. (a) Hasil anomali gravity dari MATLAB. (b) Hasil anomali gravity dari GRAV3D. (c) slice anomali gravity dari MATLAB dan GRAV3D.



Gambar 7. (a) Plot nilai simpangan respon anomali MATLAB terhadap GRAV3D. (b) Profil nilai simpangan pada slice A – B.

sudah cukup baik dan dapat digunakan untuk pemodelan selanjutnya.

3.2 Data

Berdasarkan data dari tinjauan pustaka yang diperoleh, dilakukan estimasi perhitungan volume *reservoir* dan model sintetik dengan pendekatan sebagai berikut:

Adanya injeksi CO_2 menghasilkan perubahan tekanan dalam *reservoir* yang dapat mengakibatkan perubahan sifat dan kondisi *fluida* di dalam *reservoir*, seperti kompresibili-

Tabel 1. Model sintetik volume *reservoir*

Panjang (m)	445
Lebar (m)	445
Ketebalan (m)	20
Porositas (%)	20
Sw (%)	50
V total (m ³)	3960500
V pori (m ³)	792100

Tabel 2. Model sintetik temperatur dan tekanan pada lapisan *reservoir*

Kedalaman <i>top formation</i> (m)	800
Ketebalan (m)	20
ρ_p (kg/m ³)	1000
ρ_m sandstone (kg/m ³)	2700
Temperatur (°C)	38
Tekanan (MPa)	7,84

tas, densitas, dan *viskositas* yang berpengaruh pada radius penyebaran massa CO₂.

Kemudian dilakukan pula perhitungan untuk mengetahui FVF, saturasi, permeabilitas relatif, estimasi perubahan tekanan horizontal, dan kecepatan volumetrik tiap *fluida* sehingga didapatkan radius penyebaran massa CO₂ yang ditampilkan pada tabel berikut:

Berikut ini adalah kurva perbandingan tekanan *reservoir* terhadap tekanan *fracture* dan litostatik:

3.3 Pengolahan Data

Dengan mengetahui jumlah massa CO₂ yang diinjeksikan dan variasi densitas yang dipengaruhi oleh perubahan tekanan, selanjutnya dapat dihitung nilai kontras densitas saturasi yang bertambah terhadap waktu injeksi. Berikut ini adalah kurva kontras densitas saturasi (g/cm³) terhadap waktu injeksi (hari):

Nilai kontras densitas saturasi yang didapatkan dari perhitungan, selanjutnya akan digunakan untuk pemodelan ke depan dengan menggunakan *software* MATLAB versi R2012a untuk mendapatkan nilai respon anomali *time-lapse microgravity* di permukaan.

4 HASIL DAN PEMBAHASAN

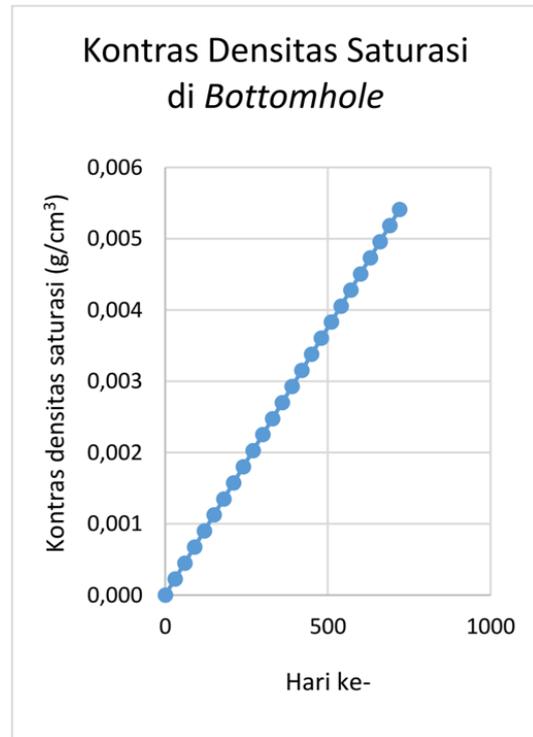
4.1 Model Bodi Anomali

Nilai $\Delta\rho_{sat}$ yang didapatkan dari perhitungan sebelumnya dimasukkan dan disesuaikan dengan koordinat yang diinginkan pada *script* pemrograman MATLAB yang telah dibuat.

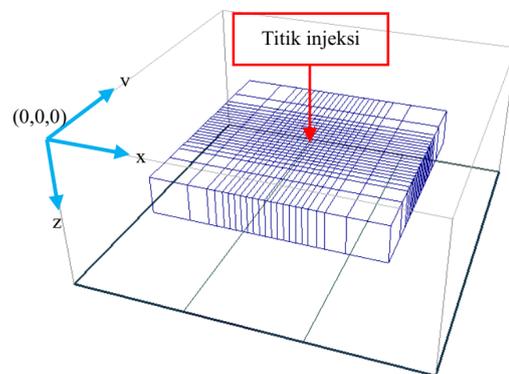
Berikut ini adalah model sintetik bodi anomali yang telah dibuat:

4.2 Respon Anomali Time-lapse Microgravity

Berikut ini adalah respon anomali *time-lapse microgravity* yang dihasilkan dari pemodelan ke depan menggunakan *software* MATLAB:



Gambar 8. Kurva kontras densitas saturasi di sumur injeksi (g/cm³) terhadap waktu injeksi (hari).



Gambar 9. Ilustrasi grid model bodi anomali menggunakan *software* GRAV3D versi 2.0. Titik injeksi yang dimodelkan berada pada koordinat (2400, 1800) m.

4.3 Analisis

Berdasarkan pemodelan yang telah dilakukan, massa injeksi CO₂ tersebut bertambah dari 9 x 10⁵ kg pada hari-30 hingga menjadi 216 x 10⁵ kg pada hari-720 dengan perubahan tekanan *bottom-hole* dari 7,865 MPa menjadi 8,440 MPa.

Dari hasil perhitungan, diperoleh kompresibilitas CO₂ yang semakin menurun seiring bertambahnya tekanan di dalam *reservoir*, yaitu 0,448 pada hari-30 menjadi 0,369 pada hari-720. Kompresibilitas yang semakin menurun tersebut menghasilkan peningkatan nilai densitas CO₂ di dalam

Tabel 3. Perubahan tekanan *bottom-hole* dan sifat fisis CO_2 di sumur injeksi

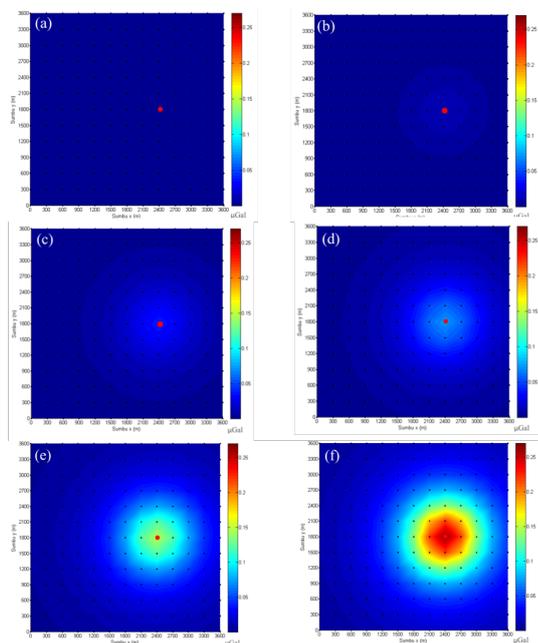
Hari ke-	Massa injeksi CO_2 (kg)	PBH (MPa)	z CO_2 Densitas CO_2 (kg/m^3)	μCO_2 (Pa s)	
30	9×10^5	7,865	0,448	342,280	$2,78 \times 10^{-5}$
240	72×10^5	8,040	0,424	369,647	$2,95 \times 10^{-5}$
360	108×10^5	8,140	0,410	387,115	$3,06 \times 10^{-5}$
480	144×10^5	8,240	0,396	404,583	$3,17 \times 10^{-5}$
600	180×10^5	8,340	0,383	422,051	$3,29 \times 10^{-5}$
720	216×10^5	8,440	0,369	439,519	$3,40 \times 10^{-5}$

Tabel 4. Radius penyebaran massa CO_2 Hari

Hari ke-	q total	u total	A (m^2)	r (m)
30	0,218	0,00017	1288,380	20,516
240	1,592	0,00044	3599,337	57,314
360	2,276	0,00052	4382,977	69,793
480	2,898	0,00057	5045,125	80,336
600	3,469	0,00062	5587,316	88,970
720	3,994	0,00066	6056,165	96,436

Tabel 5. Tekanan pada Lapisan *reservoir* Hari 720

Kedalaman lapisan (m)	800
Ketebalan lapisan (m)	20
Tekanan normal hidrostatik (MPa)	7,84
Tekanan <i>overburden</i> (MPa)	16,630
Tekanan <i>fracture</i> (MPa)	15,049
Tekanan <i>reservoir</i> setelah injeksi (MPa)	8,440



Gambar 10. Respon anomali *time-lapse microgravity*. Radius penyebaran massa CO_2 serta anomali *time-lapse micro gravity* setengah maksimum dan radius anomalnya adalah sebagai berikut: (a) Hari-30 : 20,516 m; $2,042 \times 10^{-5} \mu Gal$ dan 622,357 m. (b) Hari-240 : 57,314 m; $6,3 \times 10^{-3} \mu Gal$ dan 622,357 m. (c) Hari-360 : 69,793 m; $1,85 \times 10^{-2} \mu Gal$ dan 628,686 m. (d) Hari-480 : 80,336 m; $3,585 \times 10^{-2} \mu Gal$ dan 631,688 m. (e) Hari-600: 88,97 m; $7,37 \times 10^{-2} \mu Gal$ dan 631,688 m. (f) Hari-720: 96,436 m; $1,323 \times 10^{-1} \mu Gal$ dan 631,688 m. Titik-titik berwarna hitam menunjukkan titik stasiun dan titik berwarna merah menunjukkan titik injeksi yang berada pada koordinat (2400,1800) berdasarkan pemodelan yang telah dilakukan.

reservoir karena hubungan keduanya yang berbanding terbalik. Adapun *viskositas* CO_2 yang juga mengalami peningkatan seiring bertambahnya tekanan *reservoir*. *viskositas* tersebut berbanding terbalik dengan laju aliran sehingga makin tinggi nilai *viskositas* CO_2 , makin sukar pula *fluida* tersebut untuk mengalir.

Berdasarkan perhitungan dan pemodelan yang telah dilakukan, diperoleh radius penyebaran massa CO_2 , yaitu sejauh 20,516 m pada hari-30 dan terus bertambah hingga 96,436 m pada hari-720. Secara umum, penambahan radius penyebaran massa CO_2 semakin mengecil dari hari ke-30 hingga 720. Hal tersebut selain dikarenakan perubahan *viskositas fluida* juga disebabkan oleh luas area yang terus bertambah sehingga penambahan radius penyebarannya akan terlihat mengecil dari hari ke hari. Radius penyebaran tersebut sangat dipengaruhi oleh perubahan tekanan horizontal tiap *emphfluida*. Pada pemodelan yang telah dilakukan, perubahan rata-rata tekanan horizontal CO_2 (dp/dr CO_2) untuk setiap penambahan jarak 1×10^{-3} m pada hari-30 adalah sebesar $-1,219 \times 10^{-6}$ kPa dan terus mengalami perubahan hingga hari-720 menjadi $-6,222 \times 10^{-6}$ kPa. Tanda negatif tersebut menunjukkan penurunan tekanan terhadap jarak.

Respon anomali *time-lapse microgravity* yang dihasilkan menunjukkan adanya peningkatan seiring bertambahnya injeksi CO_2 ke dalam *reservoir*. Berdasarkan pemodelan yang telah dilakukan, massa injeksi CO_2 pada hari ke 30 dan 720 secara berurutan adalah 9×10^5 kg dan 216×10^5 kg. Anomali setengah maksimum dan radius anomalnya pada hari-30 yaitu $2,042 \times 10^{-5} \mu Gal$ dan 622,357 m untuk radius penyebaran massa CO_2 di dalam *reservoir* sejauh 20,516 m. Lalu pada hari-720, anomali setengah maksimum dan radius anomalnya adalah $1,18 \times 10^{-1} \mu Gal$ dan 631,688 m untuk radius penyebaran massa CO_2 di dalam *reservoir* sejauh 96,436 m.

Injeksi CO_2 yang dimodelkan tersebut masih tergolong aman, mengingat tekanan *reservoir* dari hasil perhitungan pada hari- 720 adalah 8,44 MPa yang masih jauh di bawah tekanan *fracture* (15,049 MPa).

5 KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, pada kasus ini dapat disimpulkan beberapa hal, yaitu Pada hari ke 30 hingga 720, terjadi peningkatan tekanan *bottomhole* dari 7,865 MPa menjadi 8,440 MPa. Pada kedua kondisi tekanan tersebut, kompresibilitas CO_2 menurun dari 0,448 menjadi 0,369, sementara itu terjadi peningkatan densitas CO_2 dari 342,28 kg/m^3 menjadi 439,519 kg/m^3 , dan *viskositas* CO_2 dari $2,78 \times 10^{-5}$ Pa s menjadi $3,4 \times 10^{-5}$ Pa s.

Radius minimum dan maksimum penyebaran massa

CO₂ dari hasil penelitian, yaitu 20,516 m dan 96,436 m pada hari ke 30 dan 720 dengan perubahan rata-rata tekanan horizontal CO₂-nya, yaitu $-1,219 \times 10^{-6}$ kPa dan $-6,222 \times 10^{-6}$ kPa untuk tiap penambahan jarak 1×10^{-3} m.

Trend anomali *time-lapse microgravity* yang diperoleh menunjukkan adanya peningkatan seiring bertambahnya waktu injeksi. Nilai maksimum anomali *time-lapse microgravity* pada hari ke 30 dan 70, yaitu $4,084 \times 10^{-5}$ μ Gal dan 0,265 *muGal*.

Adanya penambahan massa injeksi CO₂ mempengaruhi penambahan radius penyebaran dan respon anomali *time-lapse microgravity*. Injeksi CO₂ yang dimodelkan tersebut masih tergolong aman, mengingat tekanan *reservoir* dari hasil perhitungan pada hari-720 adalah 8,44 MPa yang masih jauh di bawah tekanan *fracture* (15,049 MPa).

Dengan demikian, kombinasi antara pemodelan penyebaran massa CO₂, *time-lapse micro gravity*, dan *geopressure* dapat digunakan untuk menentukan aman atau tidaknya injeksi CO₂ yang dimodelkan serta dapat membantu perencanaan proyek injeksi CO₂.

REFERENCES

- Plouff, D. 1976. *Gravity and Magnetic Fields of Polygonal Prisms and Application to Magnetic Terrain Corrections*. *Geophysics*, 41 (4), 727 –741.
- Meer, B.V.D. (2005) : *Carbon Dioxide Storage in Natural Gas Reservoirs*. *Oil & Gas Science and Technology – Rev. IFP*, 60 (3), 527 – 536
- Ertekin, T., Kasseem, J.H.A., King, G.R. 2001. *Basic Applied Reservoir Simulation*. United States of America, ISBN 1-55563-089-8.
- Tsuji, T., Matsuoka, T., Kadir, W.G.A., Hato, M., Takahashi, T., Sule, M.R., Kitamura, K., Yamada, Y., Onishi, K., Widarto, D.S., Sebayang, R.I., Prasetyo, A., Priyono, A., Ariadji, T., Sapiie, B., Widiyanto, E., Asikin, A.R. 2014 *Reservoir Characterization for Site Selection in the Gundih CCS Project, Indonesia*. *Energy Procedia*, 63, 6335 – 6343.