

# OPTIMASI DESAIN PENCEGAHAN *LOST CIRCULATION* DENGAN *AERATED DRILLING* PADA SUMUR X DI LAPANGAN PANAS BUMI M

## OPTIMIZATION OF *LOST CIRCULATION PREVENTION DESIGN* WITH *AERATED DRILLING* OF WELL-X ON GEOTHERMAL FIELD-M

Amirah Thalia Fairuz Zaen\*, Rudi Rubiandini, dan Aly Rasyid

Program Studi Teknik Perminyakan, Universitas Pertamina, Jakarta 12220, Indonesia

### \*EMAIL

amirahzaen@gmail.com

### KEYWORDS

Panas bumi, Kehilangan Sirkulasi, Pengeboran aerasi, *Underbalanced Drilling*

### ARTICLE HISTORY

Received: 21 March 2023

Accepted: 31 August 2023

### HOW TO CITE

Zaen, A.T.F., Rubiandini, R., Rasyid, A. (2023). Optimasi Desain Pencegahan *Lost Circulation* Dengan *Aerated Drilling* pada Sumur X di Lapangan Panas Bumi M. *Subsurface*, 01(01) 39-48.

© 2023 SUBSURFACE. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC)

### ABSTRAK

Suksesnya operasi pengeboran adalah faktor penting dalam mengembangkan sumur panas bumi. Dalam proyek pengeboran, sistem sirkulasi membutuhkan biaya yang cukup besar mengingat tantangan mengebor di panas bumi dengan suhu yang sangat tinggi. Pentingnya memilih fluida pengeboran yang tepat akan memberikan pertimbangan terbaik dalam hal biaya, keselamatan, serta capaian kedalaman yang diinginkan. Masalah yang sering terjadi pada sumur panas bumi ialah kehilangan sirkulasi, untuk mencegah hal tersebut digunakanlah metode pengeboran aerasi. Pengeboran aerasi adalah teknik pengeboran balance mendekati underbalance. Teknik pengeboran aerasi dilakukan dengan menambahkan kompresi udara ke fluida pemboran (lumpur atau air). Metode perhitungan yang dipakai pada penelitian ini adalah Guo-Ghalambor, di mana metode tersebut mengoreksi tekanan dasar sumur secara akurat. Metode Guo-Ghalambor memperhitungkan moody friction dua fasa antara fasa cair fluida pemboran dengan gas untuk injeksi pada fluida pemboran, masuknya fluida formasi, dan serbuk bor (*cutting*). Hasil penelitian ini adalah jendela operasi pengeboran (*Liquid-Gas Rate Window*) untuk situasi tertentu dengan melakukan perhitungan hingga membuat grafik menggunakan software Microsoft Excel sehingga operasi akan optimal.

---

## PENDAHULUAN

Pada dasarnya, kegiatan pengeboran sumur panas bumi memiliki prinsip yang serupa dengan pengeboran pada sumur minyak dan gas bumi pada umumnya, baik ditinjau dari tahapan kerja, teknologi, dan alat yang digunakan. Namun, kegiatan pengeboran sumur panas bumi memiliki tantangan dan target tujuan yang berbeda dengan pengeboran pada sumur minyak dan gas. Sumur X merupakan salah satu sumur panas bumi yang terdapat di area Blawan Ijen dengan kondisi reservoir suhu tinggi, yaitu sebesar 300 °C dan keadaan dari sumur ini didominasi oleh air. Karena lokasi pengeboran panas bumi yang berada pada daerah gunung berapi aktif, menyebabkan struktur formasi di bawah permukaan tanah pada lokasi sumur tersebut berupa batuan beku yang memiliki banyak rekahan dan patahan yang seringkali mengakibatkan memunculkan zona hilang sirkulasi (*lost*

*circulation zone*), baik secara total maupun parsial (Finger & Blankenship, 2010). Terjadinya lost circulation dapat mengakibatkan serpihan bor atau cutting dan fluida pengeboran masuk ke dalam formasi, yang nantinya dapat mengakibatkan suatu permasalahan pada fasa pengeboran pada sumur ini. Oleh karena itu, untuk mengatasi lost circulation tersebut, digunakanlah metode pengeboran aerasi (*aerated drilling*). Pengeboran aerasi adalah suatu metode pengeboran dengan menggunakan fluida aerasi (fasa gas) yang mencampurkan udara ke dalam lumpur dasar dengan tujuan untuk mengurangi tekanan hidrostatik lumpur di annulus, sehingga dapat tercapai kondisi underbalance drilling (Guo & Ghalambor, 2002). Metode aerated drilling dipilih dikarenakan ia dapat meminimalisir pipa terjepit, hilang sirkulasi, dan kerusakan formasi. Dengan berkurangnya kerusakan formasi, maka akan dapat meningkatkan nilai produktivitas pada sumur dan operasi akan lebih cepat.

## TINJAUAN PUSTAKA

### PENGEBORAN AERASI

Pengeboran dengan fluida aerasi adalah teknik yang digunakan dalam pengeboran sumur panas bumi, sebagian besar pada tahap terakhir, yang dilakukan untuk mencari zona-zona yang diminati, di mana terjadi kehilangan sirkulasi sebagian dan/atau total; yang di mana reservoir produksi (zona permeabel) berada. Teknik aerated drilling merupakan metode pengeboran dengan menambahkan udara terkompresi ke dalam fluida pengeboran untuk mengurangi densitas. Sehingga tekanan fluida pengeboran yang ada di dalam lubang annulus akan lebih kecil dibandingkan dengan tekanan formasi (Andersen et al., 2009).

Tujuan utama penggunaan teknologi pengeboran aerasi adalah untuk mengatasi lost circulation pada formasi yang merupakan penyumbang terbesar stuck pipe yang disebabkan oleh *hole packing off*. Karena lost circulation tersebut, ia mengambil fluida dari lubang bor karena perbedaan tekanan dari fluida satu fasa dengan tekanan formasi sangatlah besar. Tekanan dari fluida pengeboran merupakan fungsi dari hidrostatik dan laju pemompaan yang kemudian disebut sebagai ECD (*Equivalent Circulating Density*). Dalam teknik pengeboran aerasi, ECD dikurangi serendah mungkin ke perbandingan tertentu dari volume gas-liquid. Perbandingan ini akan menyebabkan rezim aliran fluida tertentu yang paling baik untuk diterapkan dalam operasi pengeboran aerasi.

### LIQUID GAS RATE WINDOW

Untuk menentukan laju gas-cair kombinasi, Guo-Ghalambor memperkenalkan konsep LGRW. Kombinasi injeksi laju aliran gas dan laju aliran lumpur bor harus dirancang dengan tepat sehingga pemutusan sirkulasi tekanan dasar lubang lebih besar dari tekanan keruntuhan formasi dan tekanan lubang dasar mengalir lebih kecil dari tekanan pori formasi. Selain itu dalam mendesain fluida aerasi juga demikian perlu mempertimbangkan kapasitas *drill cuttings* dari cairan dan *wellbore washout*. Liquid-Gas Rate Window (LGRW) adalah kombinasi dari beberapa faktor yang dipertimbangkan dalam merancang pengeboran aerasi. *Liquid-Gas Rate Window* (LGRW) terdiri dari *Collapse Pressure Limit*, *Collapse Pressure Limit*, *Cutting Carrying Capacity Limit* dan *wellbore washout* Limit.

### COLLAPSE PRESSURE LIMIT

*Collapse Pressure Limit* (Batas Kanan) adalah batas dalam LGRW untuk mempertahankan tekanan lubang bawah statis agar lebih besar dari tekanan keruntuhan formasi (Wardana & Rasyidah, 2020). Tekanan lubang bawah statis harus lebih besar dari tekanan keruntuhan formasi untuk mencegah keruntuhan formasi di lubang bor. Nilai ini dapat dikalkulasikan menggunakan persamaan 1 sampai 5 (Guo & Ghalambor, 2002). Perhitungan lubang bawah tekanan pada bagian vertikal dapat dilakukan dengan menggunakan persamaan 3. Konstanta a" dan b" dapat dilihat dalam persamaan 1 dan 2.

$$a = \frac{9.45 * 10^{-5} d_b^2 S_s R_p + 1.667 * 10^{-2} W_m Q_m + 9.7327 * 10^{-2} S_l Q_f + 1.275 * 10^{-3} S_g Q_{go}}{6.7846 * 10^{-2} T Q_{go}} \quad (1)$$

$$b'' = \frac{92.2283 * 10^{-3} Q_m + 1.5597 * 10^{-3} Q_f}{6.7846 * 10^{-2} T Q_{go}} \quad (2)$$

$$b'' (P_{hy} - P_s) + \ln\left(\frac{P_{hy}}{P_s}\right) = a'' H \quad (3)$$

Untuk *directional well*, kalkulasi *bottom hole pressure* untuk *angle-build up* dan *slant section* pada sumur dapat menggunakan persamaan 4 dan persamaan 5.

$$b'' (P_{hy} - P_s) + \ln\left(\frac{P_{hy}}{P_s}\right) = a'' R \sin(I_m) \quad (4)$$

$$b'' (P_{hy} - P_s) + \ln\left(\frac{P_{hy}}{P_s}\right) = a'' S \cos(I_m) \quad (5)$$

### BALANCED PRESSURE LIMIT

*Balanced Pressure Limit* (Batas Kiri) adalah batas yang mempertahankan *bottom hole pressure* lebih rendah dari formasi tekanan. *Bottom hole pressure* yang mengalir harus lebih kecil dari tekanan pori formasi agar menciptakan kondisi underbalanced sehingga hilang sirkulasi dapat dicegah (Anwar & Wardana, 2020). Untuk menghitung nilai  $P_{fr}$ , digunakanlah persamaan 6 hingga persamaan 14 dengan berbagai variasi nilai laju aliran lumpur dan gas untuk membuat garis batas (Guo & Ghalambor, 2002).

$$P_{fr} = P_{fr1} + P_{fr2} + P_{fr3} \quad (6)$$

Persamaan untuk *vertical section*

$$b'' (P_{fr1} - P_s) + \ln\left(\frac{P_{fr1}}{P_s}\right) = a'' d''^2 e'' H \quad (6)$$

$$\frac{b''}{2} (P_{fr2}^2 - P_s^2) + (P_{fr2} - P_s) = 2a'' c'' d'' e'' H \quad (7)$$

$$\frac{b''}{3} (P_{fr3}^3 - P_s^3) + \frac{1}{2} (P_{fr2}^2 - P_s^2) = 2a'' c''^2 e'' H \quad (8)$$

Persamaan untuk *angle build up section*

$$b'' (P_{fr1} - P_s) + \ln\left(\frac{P_{fr1}}{P_s}\right) = a'' d''^2 e'' R I_m \quad (9)$$

$$\frac{b''}{2} (P_{fr2}^2 - P_s^2) + (P_{fr2} - P_s) = 2a'' c'' d'' e'' R I_m \quad (10)$$

$$\frac{b''}{3} (P_{fr3}^3 - P_s^3) + \frac{1}{2} (P_{fr2}^2 - P_s^2) = 2a'' c''^2 e'' R I_m \quad (11)$$

Persamaan untuk *slant section*

$$b'' (P_{fr1} - P_s) + \ln\left(\frac{P_{fr1}}{P_s}\right) = a'' d''^2 e'' S \quad (12)$$

$$\frac{b''}{2} (P_{fr2}^2 - P_s^2) + (P_{fr2} - P_s) = 2a'' c'' d'' e'' S \quad (13)$$

$$\frac{b''}{3} (P_{fr3}^3 - P_s^3) + \frac{1}{2} (P_{fr2}^2 - P_s^2) = 2a'' c''^2 e'' S \quad (14)$$

**CUTTING CARRYING CAPACITY LIMIT**

*Cutting Carrying Capacity Limit* (Batas Bawah) adalah batas untuk *cutting transport criteria*. Nilai LGRW harus mampu mengangkat *cuttings* untuk mencegah *stuck pipe*. Metode Guo-Ghalambor menggunakan nilai energi kinetik minimal 3 lbf-ft/ft<sup>3</sup> untuk *aerated fluid* sehingga serbuk bor bisa terangkat ke permukaan dengan baik. Batas ini dihitung dengan persamaan 15 hingga persamaan 25 (Guo & Ghalambor, 2002).

$$Q_1 = \frac{0.1337Q_m}{60} + \frac{5.615Q_f}{3600} \tag{15}$$

$$Q_g = \frac{6.7846 * 10^{-2} T Q_{go}}{P_{hy}} \tag{16}$$

$$f_l = \frac{Q_1}{Q_l + Q_g} \tag{17}$$

$$\rho_g = \frac{S_g P_{hy}}{53.3T} \tag{18}$$

$$\rho_f = f_l \rho_l + (1 - f_l) \rho_g \tag{19}$$

$$v_m = v_{sl} + v_{tr} \tag{20}$$

$$v_m = \frac{c''}{P_{hy}} + d'' \tag{21}$$

$$v_{tr} = \frac{\pi d_b^2}{4C_p A} \left( \frac{R_p}{3600} \right) \tag{22}$$

$$v_{sl} = 5.35 \sqrt{\frac{D_s(\rho_s - \rho_f)}{\rho_f}} \tag{23}$$

$$\gamma_m = \frac{a'' P_{hy}}{b'' P_{hy} + 1} \tag{24}$$

$$E_m = \frac{1}{2} \frac{\gamma_m}{g} v_m^2 \tag{25}$$

**WELLBORE WASHOUT LIMIT**

Pada sumur panas bumi, *wellbore washout* tidak umum ditemukan, maka kapasitas alat pengeboran, khususnya *mud motor*, dijadikan sebagai acuan batas atas. Sebagai contoh, kemampuan *mud motor* bekerja pada kecepatan alir tertentu (Wardana & Rasyidah, 2020).

**DATA DAN METODOLOGI**

**DATA**

Data yang digunakan dalam desain proses untuk LGRW dapat dilihat pada **Tabel 1**.

**Tabel 1.** Data Perhitungan.

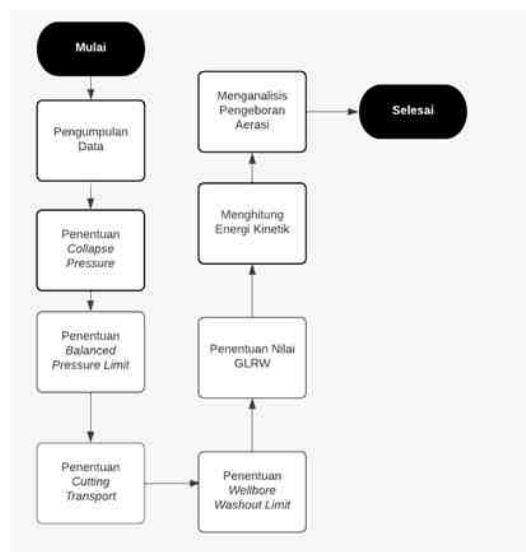
Parameter	Nilai	Satuan
Trayek	9-7/8	inch
TVD	7267	ft
Inklinasi	0	Deg
T-sirkulasi	300	°C
T-surface	250	°C
D-bit	9.875	inch
D-inside DP	5	inch

Tabel 1. Data Perhitungan (lanjutan).

<b>D-liner</b>	8.625	inch
<b>MW</b>	8	Ppg
<b>Qgo</b>	0-2500	SCFM
<b>Qm</b>	800	GPM
<b>Ps</b>	50	Psi
<b>Ps</b>	7200	lb/ft <sup>2</sup>
<b>Rp</b>	15	ft/hr
<b>g</b>	32.2	ft/s <sup>2</sup>

## METODOLOGI

Sumur X adalah sumur bor geothermal yang akan dibor menggunakan pengeboran aerasi untuk mencegah *lost circulation*. Semua data yang digunakan untuk perhitungan ditunjukkan pada **Tabel 1**. Langkah-langkah dalam mendesain LGRW selama penelitian dapat dilihat pada **Gambar 1**.

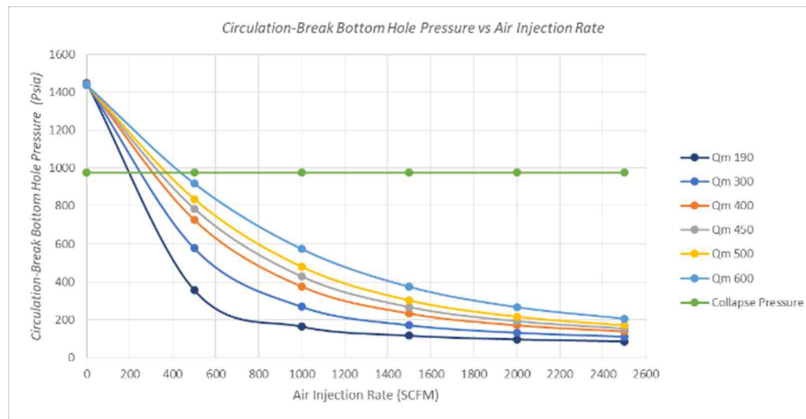


Gambar 1. Diagram Alir Penelitian.

Setelah data terkumpul, *Collapse Pressure Limit* dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (1) sampai persamaan (5). Parameter tersebut akan digunakan untuk menghitung  $P_{hy}$ . Perhitungan ini dilakukan dengan menggunakan beberapa laju aliran lumpur dan beberapa laju aliran gas untuk membuat garis kurva. Beberapa kombinasi laju gas-cair yang bersinggungan dengan tekanan stabilitas lubang sumur diambil untuk menyusun *Collapse Pressure Limit*. Langkah selanjutnya setelah menghitung  $P_{hy}$  yaitu menghitung  $P_{fr}$  untuk *Balanced Pressure Limit*. Perhitungan ini mirip dengan perhitungan prosedur  $P_{hy}$ . Perhitungan  $P_{fr}$  akan digunakan persamaan (6) sampai persamaan (14). Beberapa kombinasi laju gas-cair yang berpotongan dengan tekanan reservoir diambil untuk membangun *Balanced Pressure Limit*. Untuk menentukan *Cutting Carrying Capacity Limit*, persamaan (15) sampai persamaan (25) digunakan (Guo & Ghalambor, 2002). Perhitungan akan dilakukan dengan menggunakan berbagai *injection rate*.

## HASIL

Data yang digunakan dalam desain proses untuk LGRW dapat dilihat pada **Tabel 1**. Sumur X merupakan sumur dengan trayek vertikal, dengan total kedalaman 2215 m atau 7267 ft. Zona rekah total dan partial diprediksi akan dialami pada kedalaman 7267 ft. akan digunakan pada section 9-7/8". Menggunakan berbagai laju aliran gas (dari 250 - 460 scfm) dan laju cair (dari 300 gpm – 600 gpm). *Collapse Pressure Limit* dibentuk dalam grafik pada (**Gambar 2**). *Collapse pressure* digunakan sebagai batas tekanan minimum yang akan menyebabkan keruntuhan formasi.



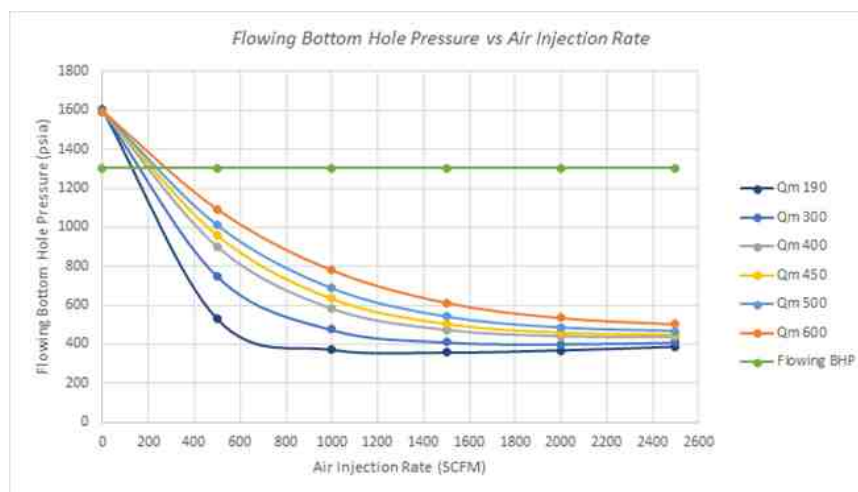
**Gambar 2.** Circulation-Break Bottom Hole Pressure vs Injection Rate.

Perpotongan nilai antara *static bottom hole pressure* dan *collapse pressure limit* dapat dilihat pada **Tabel 2** dan nilai tersebut akan digunakan untuk desain batas kanan pada LGRW.

**Tabel 2.** Collapse Pressure Limit.

Qgo (SCFM)	Qm (GPM)
190	190
257	300
319	400
352	450
390	500
460	600

Sama halnya dengan grafik CBHP, grafik *Flowing Bottom Hole Pressure* (**Gambar 3**) juga menggunakan variasi nilai laju aliran injeksi gas dan cair yang sama. Jika Bottom Hole Pressure lebih tinggi dari tekanan reservoir, maka *lost circulation* bisa terjadi. Semakin tinggi laju cairan yang digunakan dalam laju aliran lumpur, semakin tinggi juga nilai *Bottom Hole Pressure*. Sehingga, operasi akan aman jika menggunakan kombinasi laju alir gas – cair yang menghasilkan nilai BHP lebih rendah dari garis tekanan reservoir.



**Gambar 3.** Grafik Flowing Bottom Hole Pressure vs Air Injection Rate.

Garis tekanan reservoir ini memotong nilai BHP yang mengalir di beberapa titik yang dapat dilihat pada **Tabel 3**. Kemudian titik potong tersebut diplot pada grafik LGRW dan menjadi batas kiri.

**Tabel 3.** *Balanced Pressure Limit.*

Qgo (SCFM)	Qm (GPM)
145	190
200	300
250	400
275	450
300	500
349	600

Untuk Batas Bawah atau *Cutting Carrying Capacity Limit*, cuttings terangkat pada energi kinetik senilai 3 ft-lb/ft<sup>3</sup>. Jika nilai energi kinetik kurang dari nilai tersebut, serbuk bor tidak terangkat dengan baik. Untuk menentukan batas ini dapat dilakukan dengan menguji nilai-nilai yang berada di antara batas kanan dan batas kiri. Dari proses kalkulasi yang dilakukan, cukup sulit untuk mendapatkan nilai energi kinetik minimum sebesar 3 ft-lb/ft<sup>3</sup>. Sehingga, hasil perhitungan yang dipakai merupakan pendekatan terhadap nilai 3 ft-lb/ft<sup>3</sup>, yang dimuat pada **Tabel 4**. Dibutuhkan dua nilai energi kinetik agar dapat dibuat batas bawah pada desain LGRW.

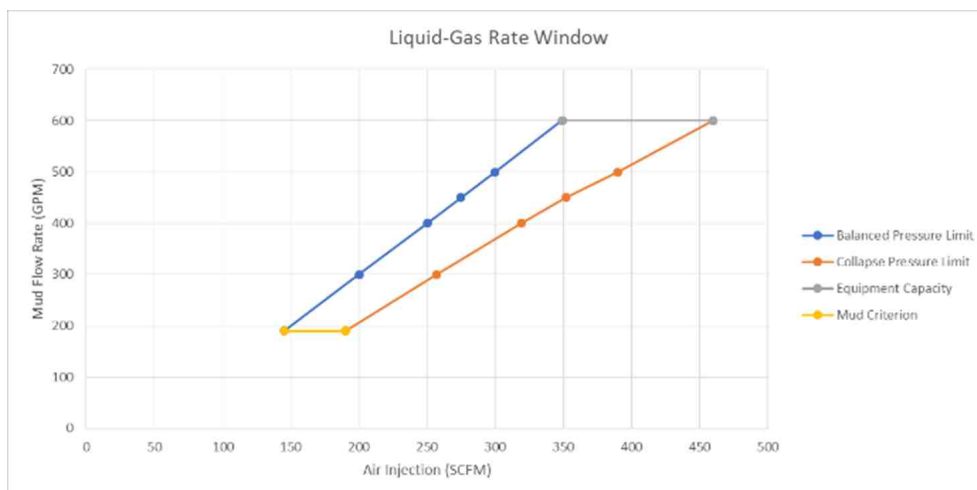
**Tabel 4.** Perhitungan Energi Kinetik.

Qgo (SCFM)	Qm (GPM)	Em (ft-lb/ft <sup>3</sup> )
145	190	2.997
190	190	3.212

Untuk Batas Atas atau *wellbore washout* Limit sebagai indikasi flowrate maksimum yang dapat digunakan dalam operasi. Pada penelitian ini menggunakan mud motor 6.9". Standar operasi *mud* motor 6.9" berada di rentang 300 gpm hingga 600 gpm. Sehingga, batas atas yang digunakan berada pada nilai Qm sebesar 600 gpm. Jika operasi melewati batas ini, maka kemungkinan kerusakan alat (*mud motor*) dapat terjadi.

## DISKUSI

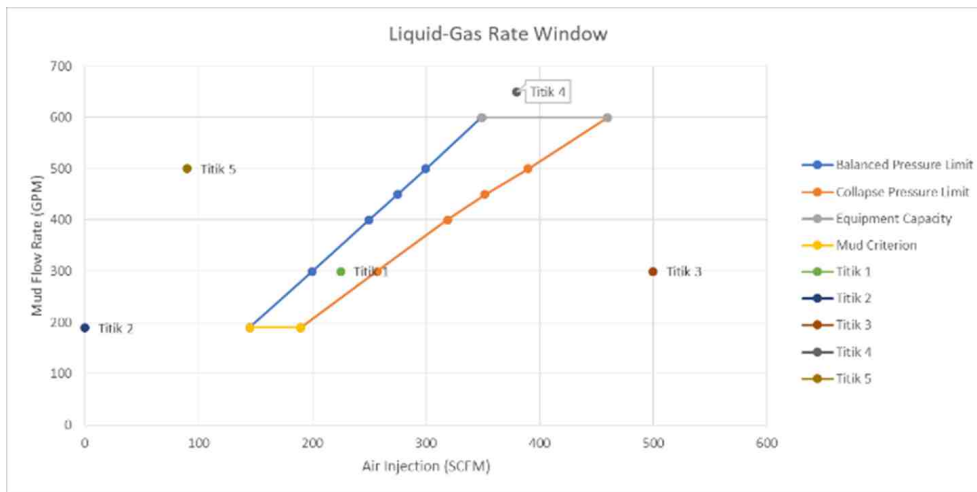
Keempat batas LGRW telah disatukan dalam 1 grafik dan membentuk bidang 2D seperti pada **Gambar 4**. Operasi pengeboran pada trayek yang diteliti akan terus diharapkan berada di dalam bidang tersebut. Jika operasi pengeboran tidak berada di dalam bidang yang terbentuk, masalah pengeboran memungkinkan untuk terjadi.



**Gambar 4.** Desain *Liquid-Gas Rate Window*.



Selanjutnya, pada **Gambar 5**, diberikan contoh kondisi operasi yang berada di dalam bidang yang terbentuk dari desain LGRW. Sebagai contoh, pada titik 1 dengan kombinasi  $Q_m$  bernilai 300 gpm dan  $Q_{go}$  bernilai 225 scfm. Kondisi ini mencapai kondisi *under balance*, karena kombinasi  $Q_{go}$  dan  $Q_m$  lebih rendah dari *balanced pressure limit*. Nilai BHP lebih rendah dari tekanan formasi, yaitu 969 psi dari 1303.4 psi. Kondisi ini juga tidak menyebabkan *collapse*, karena BHP yang terjadi lebih besar dari *collapse pressure* yaitu sebesar 1119 psi dari 977 psi. Nilai energi kinetik yang dihasilkan pun lebih dari minimum ketentuan, yaitu 7.4 ft-lb/ft<sup>3</sup>. Operasi ini mampu dijalankan dengan *mud motor* 6.9", sebab laju alir lumpur sebesar 300 gpm. Kondisi ini dianggap memenuhi syarat operasi yang dapat dilakukan.



**Gambar 5.** Desain LGRW dengan Contoh Kondisi Operasi.

Di lain sisi, contoh kondisi tidak memenuhi syarat, yaitu titik 2 hingga 5 karena berada di luar batas LGRW. Titik 2 dengan kombinasi  $Q_m$  190 gpm dan  $Q_{go}$  0.001 scfm. Walaupun kondisi *under balance* tercapai dan keruntuhan lubang sumur tidak terjadi, tetapi pengangkatan serbuk bor buruk dan tidak mencapai batas *mud motor*. Energi kinetik pada kondisi ini hanya sebesar 2.56 ft-lb/ft<sup>3</sup>. Sedangkan pada titik 3, dengan kombinasi  $Q_m$  300 gpm dan  $Q_{go}$  500 scfm, kondisi yang terjadi adalah keruntuhan lubang bor. Meskipun kondisi *under balance* terjadi dan pengangkatan serbuk bor baik, operasi ini tidak dapat dilakukan. Hal ini dikarenakan BHP yang dihasilkan terlalu rendah, yaitu 749 psi dari 977 psi. Untuk titik 4, kondisi yang terjadi adalah kerusakan alat pengeboran yang digunakan, yaitu *mud motor* 6.9". Meskipun tekanan bawah sumur berada di antara tekanan formasi dan *collapse pressure limit* dan pengangkatan serbuk bor pun tergolong baik, tetapi batas operasi mud motor 6.9" terlampaui dengan operasi  $Q_m$  650 gpm dan  $Q_{go}$  380 scfm. Sedangkan pada titik 5, kombinasi  $Q_m$  500 gpm dan  $Q_{go}$  90 scfm mengakibatkan kehilangan sirkulasi tidak tercapai. Hal ini disebabkan nilai BHP yang dihasilkan sebesar 1313 psi.

## KESIMPULAN

Perancangan optimasi penggunaan pada trayek 9-7/8 inch telah berhasil dirancang. Didapatkan hasilnya dengan batas minimal (bawah) nilai  $E_m$  sebesar 2.997 ft-lb/ft<sup>3</sup>, dengan  $Q_m$  sebesar 190 GPM dan  $Q_{go}$  sebesar 145 SCFM, dan 3.212 ft-lb/ft<sup>3</sup>, dengan  $Q_m$  sebesar 190 GPM dan  $Q_{go}$  Sebesar 190 SCFM. Dan  $E_m$  sebesar 29.5 ft-lb/ft<sup>3</sup> dengan  $Q_m$  sebesar 600 GPM dan  $Q_g$  425 SCFM sebagai batas maksimal.

Berdasarkan penelitian dan kalkulasi batas-batas LGRW yang telah dilakukan, parameter yang berpengaruh pada proses ini untuk operasi adalah *circulation-break bottom hole pressure* hal ini didukung oleh hasil perhitungan *Collapse Pressure Limit* (batas kanan) , kehilangan tekanan akibat friksi yang didukung dari hasil perhitungan *Balanced Pressure Limit* (batas kiri), laju injeksi udara dan



*mud* yang yang digunakan dengan berbagai macam variasi dengan hasil yang berbeda beda pula, dan spesifikasi *mud motor*.

## DAFTAR PUSTAKA

- Anwar , F. F., & Wardana, R. S. (2020). Designing Liquid Gas Rate Window For Aerated Drillingusing Guo Ghalambor Method. Migasian.
- Andersen, H., Vigrestad, A., & Kuru, E. (2009). Hydraulic optimization of aerated mud drilling for maximum drilling rate. Society of Petroleum Engineers - IADC/SPE Managed Pressure Drilling and Underbalanced Operations Conference and Exhibition 2009 - Drilling in India: Challenges and Opportunities, 55–69. <https://doi.org/10.2118/122206-ms>
- Finger, John; Blakenship, D. (2010). Handbook of Best Practices for Geothermal Drilling.
- Guo, B., & Ghalambor, A. (2002). Gas Volume Requirements for Underbalanced Drilling: Deviated Holes.
- Wardana, R. S., & Rasyidah, K. (2020). Evaluation Of Aerated Drilling In K-01 Geothermal Well Using Guo Ghalambor's Gas Liquid Rate Window. Petro.

## DAFTAR SIMBOL

A	= Luas Penampang
C <sub>p</sub>	= Konsentrasi partikel aliran, %
D <sub>h</sub>	= Diameter <i>annulus</i> , ft
D <sub>g</sub>	= Diameter serbuk bor, ft
d <sub>b</sub>	= Diameter bit, inci
d <sub>i</sub>	= Diameter dalam <i>annulus</i> , inci
d <sub>o</sub>	= Diameter luar <i>annulus</i> , inci
E <sub>m</sub>	= Energi kinetik, lbf-ft/ft <sup>3</sup>
e <sub>i</sub>	= Kekasaran drillpipe, inci
e <sub>o</sub>	= Kekasaran dinding sumur, inci
f	= Faktor friksi Moody
f <sub>i</sub>	= Fraksi volume liquid pada titik
g	= Gravitasi, 32.2 ft/s <sup>2</sup>
H	= Kedalaman, ft
I <sub>m</sub>	= Sudut inklinasi maksimum, rad
P <sub>fr</sub>	= Tekanan akibat gesekan, lb/ft <sup>2</sup>
P <sub>fr1</sub>	= Frictional pressure 1, lb/ft <sup>2</sup>
P <sub>fr2</sub>	= Frictional pressure 2, lb/ft <sup>2</sup>
P <sub>fr3</sub>	= Frictional pressure 3, lb/ft <sup>2</sup>
P <sub>h</sub>	= Tekanan hidrostatik, lb/ft <sup>2</sup>
P <sub>s</sub>	= Tekanan choke, lb/ft <sup>2</sup>
Q <sub>f</sub>	= Laju alir influx, bbl/hr
Q <sub>go</sub>	= Laju alir volumetrik gas saat kondisi standar (60 °F, 14.7 psia), scfm
Q <sub>m</sub>	= Laju alir lumpur, gpm
R	= Radius of curvature, ft
R <sub>p</sub>	= Rate of penetration, ft/hr
S	= Panjang lintasan sisi miring sumur, ft
S <sub>g</sub>	= Spesific gravity fasa gas (ketika udara = 1)
S <sub>i</sub>	= Spesific gravity dari fluida formasi (ketika air = 1)
S <sub>s</sub>	= Spesific gravity batuan (ketika air = 1)
T	= Suhu, Rankine

- $V_m$  = Kecepatan campuran fasa, fps
- $V_{ts}$  = Transport velocity, fps
- $V_{sl}$  = Settling velocity, fps
- $W_m$  = Mud weight, ppg
- $Y_m$  = Berat fisik campuran fluida, lbf/ft<sup>3</sup>
- $\rho_s$  = Densitas serbuk bor, lbf/ft<sup>3</sup>
- $\rho_g$  = Densitas udara, lbf/ft<sup>3</sup>