

SIMULASI PERHITUNGAN SIRKULASI *AERATED DRILLING* MENGUNAKAN METODE BEGGS AND BRILL TRAYEK 12-1/4” PADA LAPANGAN *GEOHERMAL*

Satria Nugeraha Ariyanto^{1*}, Bambang Yudho S.¹, Ade Dwi P.²

¹Teknik Produksi Minyak dan Gas, Politeknik Energi dan Mineral Akmigas Cepu, Jl. Gajah Mada No.38, Cepu, Jawa Tengah, 58315

² Drilling Engineer, Pertamina Geothermal Energy, Jl. Medan Merdeka Tim. No.11-13, Gambir, Jakarta Pusat, Daerah Khusus Ibukota Jakarta, 10110

*Email : satrianugeraha022@gmail.com

ABSTRAK

Pada pengeboran panas bumi memiliki banyak *challenge* yang harus dihadapi terutama pada masalah *loss circulation* yang akan menyebabkan *hole cleaning* tidak berjalan dengan baik, serbuk bor tidak bisa terangkat ke permukaan dan akhirnya menyebabkan *stuck pipe* yang disebabkan oleh *hole packing off*. Pada kondisi seperti ini hal yang wajib dilakukan adalah membuat perencanaan, perhitungan dan simulasi untuk memberikan treatment pada formasi yang terdapat zona hilang sirkulasi. Hilang sirkulasi dapat diatasi diantaranya dengan menggunakan pemboran *underbalanced* metode *aerated drilling*, dengan dibantu oleh persamaan Beggs and Brill dan simulasi menggunakan excel agar dapat menentukan angka yang tepat dalam menginjeksikan kombinasi gas rate dan mud ke dalam sumur pemboran. Penelitian membahas pada *trayek* khusus yang terdapat permasalahan hilang sirkulasi yaitu pada trayek sumur 12-1/4” lapangan panas bumi. Dikarenakan terdapat masalah hilang sirkulasi penulis mencoba membuat simulasi menggunakan kurva ECD, ELV dan *Annular Velocity*. Diharapkan dengan adanya simulasi ini akan ada perbaikan serta pencegahan hilangnya sirkulasi pada sumur pemboran panas bumi.

Kata kunci: *geothermal drilling problem, hole cleaning, loss circulation, underbalanced drilling*

1. PENDAHULUAN

Sumur panas bumi pada umumnya tidak jauh berbeda dengan sumur minyak dan gas. Namun, tantangan yang berbeda yaitu masalah hilang sirkulasi yang sering terjadi karena target pemboran yang sangat berbeda. Karena tujuan pemboran panas bumi yaitu mencari rekahan atau patahan pada batuan untuk mencari uap panas di dalam reservoir. *Aerated drilling* pada sumur panas bumi digunakan untuk menangani zona *partial loss* dan *total loss* [1]. Kehilangan sirkulasi sering terjadi di pemboran panas bumi karena tekanan reservoir lebih kecil dibandingkan tekanan yang berada di dalam sumur [2]. Metode *aerated drilling* diharapkan dapat menyelesaikan masalah yang ditemukan pada sumur panas bumi. Salah satunya menggunakan metode *underbalanced drilling*, parameter yang digunakan dalam metode ini yakni menghitung *Equivalen Circulating Density* (ECD), *Equivalen Liquid Volume* (ELV) dan *Annular Velocity* [1].

Dalam pengeboran panas bumi, salah satu masalah pengeboran yang harus dihadapi dan diantisipasi adalah hilang sirkulasi. Kehilangan sirkulasi sering terjadi karena reservoir panas bumi sering berada dibawah reservoir bertekanan dan biasanya memiliki rekahan alami. Jika masalah ini tidak dapat diantisipasi, maka akan menyebabkan pengangkatan cutting yang tidak baik, selain permasalahan sumur tersebut terdapat pula pipa terjepit (*stuck pipe*) dapat meningkat. Karena pipa terjepit dapat disebabkan oleh transportasi *cutting* tidak baik atau tidak sampai membersihkan lubang pengeboran [3].

Aerated drilling atau pengeboran menggunakan injeksi udara merupakan metode pengeboran yang menambahkan udara ke dalam fluida pemboran (*drilling mud*) untuk mengurangi densitas pada kolom fluida di annulus. Dengan demikian, tekanan fluida dalam sumur (*hydrostatic pressure*) akan lebih kecil daripada tekanan formasi (*formation pressure*) yang pada umumnya bisa disebut *underbalanced drilling* (UBD) dan akan memiliki rekahan alami [5]. Pengeboran ini merupakan teknik yang digunakan pada tahap terakhir untuk mencari zona *reservoir* dengan banyak rekahan [4]. Tabel 1 merupakan perbandingan *Aerated* dan *Mud Konvensional*

Tabel 1. Perbandingan *Aerated* dan *Mud Konvensional*

<i>Object</i>	<i>Aerated drilling</i>	<i>Mud drilling</i>
<i>Formation damage</i>	Mengurangi kemungkinan kerusakan formasi karena tekanan lubang bor lebih rendah daripada tekanan formasi, cairan pengeboran dan serbuk bor tidak masuk ke dalam formasi. Sebab, serbuk bor yang terdorong masuk ke dalam formasi akan menyumbat dan mengurangi porositas dan permeabilitas.	Dapat mengakibatkan kerusakan formasi ketika <i>mud cake</i> terbentuk di zona produksi dan fluida serta cutting pengeboran masuk ke dalam formasi ketika terjadi kehilangan sirkulasi total, sehingga menghalangi permeabilitas.
<i>Rate of penetration</i>	Pengeboran dengan metode <i>underbalanced drilling</i> akan meningkatkan laju ROP karena kerja dari mata bor tidak terlalu susah untuk mengebor ulang cutting yang terpendam di bawah mata bor. Laju penetrasi yang dialami pada formasi batuan lava basaltic di lapangan panas bumi Islandia, telah mencapai tiga kali lipat dari laju penetrasi yang dialami dalam formasi yang sama yang di bor secara konvensional [11].	Tingkat penetrasi lebih rendah dibandingkan saat menggunakan pengeboran <i>underbalanced</i> .
<i>Controlling hole pressure</i>	Fluida pengeboran yang diberi angin memiliki kepadatan yang lebih ringan sehingga menghasilkan tekanan annular yang lebih rendah daripada tekanan formasi. Fluida ini fleksibel dalam mengendalikan tekanan formasi karena tekanan dalam annulus dapat dipertahankan dengan mengurangi tekanan, rasio udara, fluida pada throttle valve yang berada di flow line.	Lumpur pengeboran memiliki kepadatan yang lebih tinggi daripada fluida pengeboran yang diberi angin. Tekanan hidrostatik bergantung pada kepadatan lumpur.
<i>Loss of circulation</i>	Pengeboran dengan <i>aerated</i> memiliki kepadatan yang lebih rendah daripada air yang dapat bekerja melawan sirkulasi yang hilang. Saat menggunakan fluida <i>aerated</i> , tekanan formasi pun rendah, tetapi masih memiliki kemungkinan untuk menyalurkan cutting ke permukaan. Pada gradien tekanan hydraulic, dengan menggunakan <i>underbaance drilling</i> akan mengurangi masuknya fluida dan cutting berbutir halus ke dalam zona produksi. [12].	Bila terjadi TLC, pengeboran dengan mud diubah menjadi <i>blind drilling</i> (pengeboran hanya dengan air). Air tetap masuk ke dalam formasi dan cutting tidak dialirkan ke permukaan, yang dapat meningkatkan kemungkinan stuck pipe akibat hole cleaning yang buruk.
<i>Annular velocity</i>	Pengeboran <i>aerated</i> memerlukan kecepatan annular yang lebih tinggi untuk mengangkat cutting.	Kecepatan annular lebih rendah.

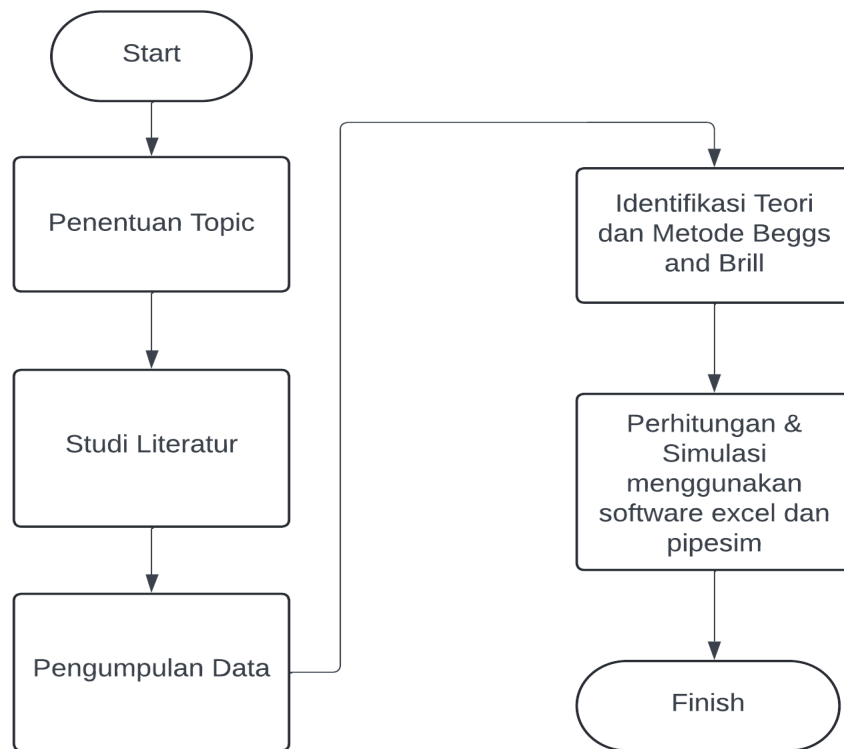
Volume of water requirement	Membutuhkan lebih sedikit air karena penggunaan kembali air dan lebih sedikit kehilangan air ke formasi.	Membutuhkan lebih banyak air saat melakukan pengeboran di lapangan panasbumi.
Drilling fluid materials	Air, udara, bahan pembuat foam, bahan corrosion, dan larutan kimia lainnya.	Air, bentonite, dan banyak aditif untuk menjaga kualitas lumpur, tergantung pada kondisi dasar lubang
Extended equipment	Membutuhkan peralatan tambahan dibandingkan pengeboran konvensional, compressor udara dan booster untuk memapitkan udara, mist pump, separator, dll.	Mud tank, hopper, mud pump.
Cost Operation	Biaya kompressor harian, biaya sewa booster, dan bahan bakar. Dan juga memerlukan orang yang terampil untuk mengoperasikan bor aerated. Ada perbedaan dalam operasi rangkaian bor yang disambung atau terputus karena tekanan pengeboran aerasi yang tinggi dan kebutuhan untuk mempertahankan tekanan.	Biaya lumpur pengeboran, operasi seperti pengeboran konvensional
Corrosion	Menyebabkan korosi pada pipa bor lebih tinggi.	Tidak terlalu menyebabkan korosi pada pipa bor.
Hole Cleaning	<i>Aerated drilling</i> lebih efisien dalam membersihkan lubang bor karena tekanan fluida yang seimbang dengan tekanan formasi serta transport <i>cutting ratio</i> yang optimal. Metode ini kurang rentan terhadap kerusakan formasi dan pipa terjepit.	Mud konvensional sering kali gagal membersihkan <i>cuttings</i> yang terjebak di dasar lubang bor, terutama pada zona <i>loss circulation</i> . Ini dapat menyebabkan pipa terjepit dan gangguan operasional lainnya

Penggunaan teknologi aerated drilling ini bertujuan mengatasi masalah hilang sirkulasi pada formasi atau zona *reservoir* yang menjadi penyumbang terbesar *stuck pipe* yang disebabkan oleh *hole packing off*. Dikarenakan hilang sirkulasi tersebut, sehingga mengambil fluida dari lubang bor karena tekanan yang berbeda. Maka perlu adanya sirkulasi tekanan dari fluida pengeboran sebagai fungsi dari *hydrostatic* dan laju pemompaan dapat disebut ECD (*Equivalent Circulating Density*) [6]. ECD harus dikurangi serendah mungkin ke perbandingan tertentu dari volume *gas-liquid*. Sehingga akan menghasilkan perbandingan rezim aliran fluida yang terbaik diterapkan dalam pengeboran aerasi [5].

2. METODE

Suksesnya pelaksanaan kegiatan *aerated drilling* berdasarkan berapa banyak volume cairan pengeboran yang dibutuhkan untuk mengisi annulus serta kecepatan annular sesuai fungsi laju pemompaan [13][14]. Semua diperlukan untuk menjaga lubang tetap terisi dan *cutting* terangkat ke permukaan. Namun dengan adanya rekahan produktif mengakibatkan hilangnya sirkulasi akan mengurangi kinerja cairan pengeboran dalam membawa *cutting*. Kejadian yang terjadi karena fluida akan memiliki kecenderungan untuk mengalir ke rekahan batuan bukan ke permukaan [10]. Metode yang akan diterapkan untuk mengurangi *loss circulation* adalah mengurangi kepadatan fluida pengeboran. Tujuan dari metode ini adalah untuk menjaga keseimbangan ataupun menjaga volume cairan volume fluida agar cukup di dalam lubang untuk

menopang cutting dan memindahkannya [9]. Gambar 1 berikut merupakan flowchart penelitian.



Gambar 1. Flow Chart

Pada penelitian ini penulis menggunakan korelasi beggs and brill untuk menganalisa rezim aliran dari fluida multifasa yang idgunakan serta menghitung pressure loss pada saat fluida pengeboran dipompakan. Berikut merupakan persamaan yang digunakan dalam merancang suatu program aerated drilling dinyatakan dengan beberapa formula sebagai berikut.

Penentuan Nilai Temperature dan Tekanan pada Setiap Kedalaman

$$T = (Ts + ((TVDn \times Tg)) + 460 \quad (1)$$

$$P_n = P_{n-1} + P_{hyd-1} + P_{f-1} \quad (2)$$

Penentuan Nilai Kompresibilitas dari Gas

$$T_{pr} = \frac{T}{168+326 \times SGg - 12.5 \times SGg^2} \quad (3)$$

$$T_{pr} = \frac{T}{677+15 \times SGg - 37.5 \times SGg^2} \quad (4)$$

$$z = P_{pr} \times (0.065 \times T_{pr} - 0.1751) - (0.0009 \times T_{pr}) + 0.9968 \quad (5)$$

$$Bg = 0.0283 \times \frac{z \times T}{P} \quad (6)$$

Penentuan Nilai Annular Velocity

$$V_m = \frac{24.5 \times Q_{mud}}{(ID^2 - OD^2)} \quad (7)$$

$$V_g = \frac{Q_g \times B_g}{60 \times \pi \times \left(\frac{ID^2 - OD^2}{48}\right)} \quad (8)$$

$$V_{mix} = V_m + V_g \quad (9)$$

Penentuan Pola Aliran Fluida Aerasi

$$\lambda_l = \frac{V_m}{V_{mix}} \quad (10)$$

$$L_1 = 316 \times \lambda_l^{0.302} \quad (11)$$

$$L_2 = 0.000925 \times \lambda_l^{-2.468} \quad (12)$$

$$L_3 = 0.10 \times \lambda_l^{-1.452} \quad (13)$$

$$L_4 = 0.5 \times \lambda_l^{-6.738} \quad (14)$$

$$N_{fr} = \frac{V_{mix}^2}{g \times (ID - OD)} \quad (15)$$

Penentuan Nilai Liquid Holdup

$$H_{L(0)} = \frac{a \times \lambda_l^b}{N_{fr}} \quad (16)$$

$$N_{lv} = 1.938 \times V_m \times \left(\frac{M_w}{P_s}\right)^{0.25} \quad (17)$$

$$C = (1.0 - \lambda_l) \times \ln(e \times \lambda_l^f \times N_{lv}^g \times N_{fr}^h) \quad (18)$$

$$\Psi = 1 + C[\sin(1.8 \times (90 - \theta)) - 0.333 \times \sin^3(1.8 \times 90 - \theta)] \quad (19)$$

$$H_{L(\theta)} = H_{L(0)} \times \Psi \quad (20)$$

$$A = \frac{L_3 - N_{fr}}{L_3 - L_2} \quad (21)$$

$$H_{L(\theta)transition} = A \times H_{L(\theta)segregation} + (1 - A) \times H_{L(\theta)intermittent} \quad (22)$$

Penentuan Nilai Faktor Gesekan

$$\rho_g = \frac{P \times 28.967 \times s_{g_g}}{10.731557098 \times T} \quad (23)$$

$$\mu_n = \mu_l \times \lambda_l + \mu_g \times (1 - \lambda_l) \quad (24)$$

$$\rho_n = M_w \times \lambda_l + \rho_g \times (1 - \lambda_l) \quad (25)$$

Penentuan Nilai Gradient Tekanan

$$\rho_m = Mw * H_{l(\theta)} + \rho_g * (1 - H_{l(\theta)}) \quad (26)$$

$$\rho_g = \frac{f * \rho_n * v_{mix}^2}{2 * g * (ID - OD)} / 144 \quad (27)$$

$$\rho_{hy} = \frac{\rho_n}{144} \quad (28)$$

$$P_f = \rho_f * (MD_n - MD_{n-1}) \quad (29)$$

$$P_{hy} = \rho_{hy} * (TVD_n - TVD_{n-1}) \quad (30)$$

$$P_{total} = P_s + P_f + P_{hy} \quad (31)$$

Penentuan Nilai ECD

$$ECD = \frac{P_{total}}{0.052 * TVD} \quad (32)$$

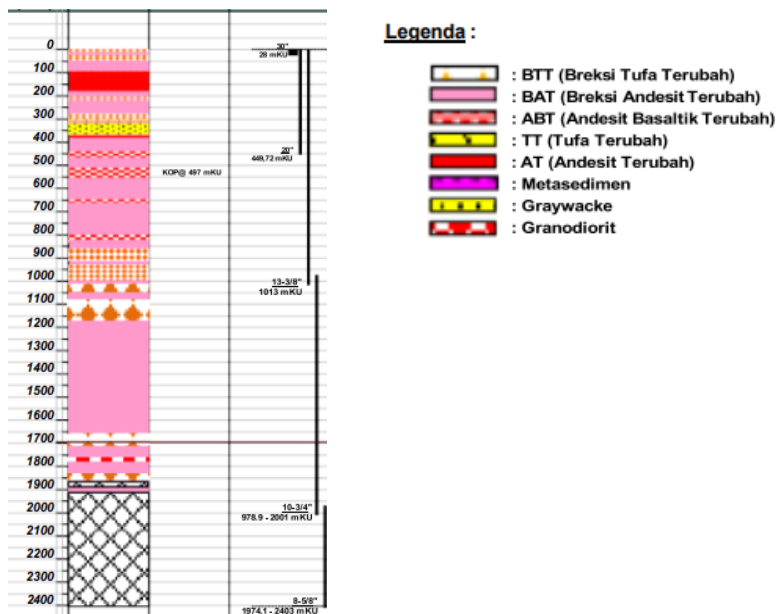
Penentuan Nilai ELV

$$ELV = Qm \frac{Qg * 14.7 * T * 7.48}{520 * P_{total}} \quad (33)$$

3. PEMBAHASAN

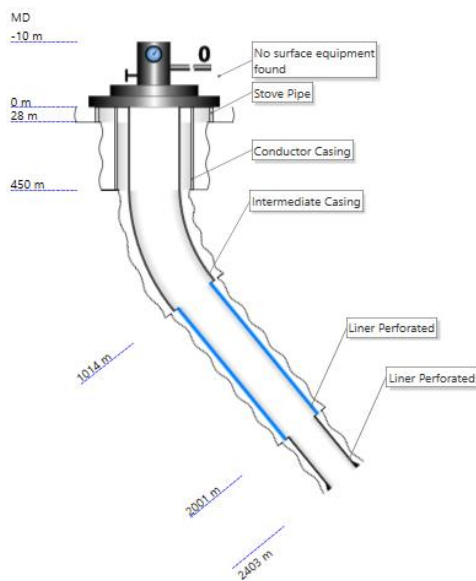
A. Tinjauan Lithology

Pada pembahasan ini fokus pada satu trayek yaitu pada section *casing liner* dengan *hole diameter* 12-1/4" seperti ditunjukkan pada Gambar 2. Formasi yang didominasi oleh breksi andesit yang memiliki ciri warna abu-abu kehitaman, sedikit keputihan tekstur porifiritik, batuan teralterasi lemah menjadi mineral clay (Cl), Klorit (Ch), Pirit (Py), dan kuarsa sekunder (SQ). Fragmen batuan dominasi masih *fresh* dan massif. Memiliki sifat kekerasan batuan lunak sampai sangat keras.



Gambar 2. Lithology Lapangan

B. Prognosis Sumur



Gambar 3. Prognosis Sumur menggunakan software PIPESIM

Dari gambar 3 bahwa pada sumur pemboran panas bumi dengan jenis pemboran J type dan merupakan tipe sumur *Big Hole*. Tujuan pemboran yaitu melakukan *Make up Well* untuk menambah produksi steam uap di lapangan Lahendong, PT. Pertamina Geothermal Energy. Pada section ke-4 merupakan liner perforated yang akan diambil menjadi sampel pada penelitian ini. Pada section ini memiliki *borehole diameter* 12-1/4 inch dengan liner perforated 10-3/4 inch, seperti ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Ukuran Casing dan Liner Sumur

No.	Name	From MD (mMD)	To MD (mMD)	Total Joints	Hole Dia. (Inch)	OD (Inch)	ID (Inch)	Grade
1	Stove Pipe	0	28	1.5	36	30	28	-
2	Conductor Casing	0	449.7	37	26	20	18.73	K-55
3	Intermediate Casing	0	1013.7	84	17.5	13.375	12.415	L-80
4	Liner Perforated	1013.7	2001	86	12.25	10.75	10.05	K-55
5	Liner Perforated	2001	2403	37	9.875	8.625	8.097	K-55

C. Parameter Data

Tabel 3. Slide dan Rotate Trayek 12-1/4”

Footage Meter		Hrs	Ave. ROP	%
Slide	28	1.76	3.8	2.8
Rotate	959	58.88	3.7	97.2

Tabel 4. Drilling Parameter Trayek 12-1/4”

Parameter	Min Value	Depth (mMD)	Max Value	Depth (mMD)	Avg.
ROP (m/mtr)	16.4	1656	0.8	1450	3.72
WOB (klbs)	1	1030	43	1639	12.5
Surface RPM	35	1643	60	1405	45
RPM bit	120	1015	169	1577	141
Torque (klbft)	5	1027	23	1719	14
Pump Press (Psi)	934	1852	2332	1722	1720
Flow Rate (GPM)	707	1015	994	1577	809

Pada tabel 3 dan 4, parameter memiliki nilai minimum dan nilai *maximum* agar menjadi patokan dilakukanya pengeboran. Terdapat satu parameter yang memiliki nilai justru minimum lebih besar dibandingkan maksimum, yaitu parameter *Rate of Penetration* (ROP) karena dari satuannya itu sendiri menit per meter, yang dimana semakin waktu nya kecil (dalam satuan menit) maka *value* dari ROP akan semakin baik pada parameter pemboran ini.

D. Summary Loss

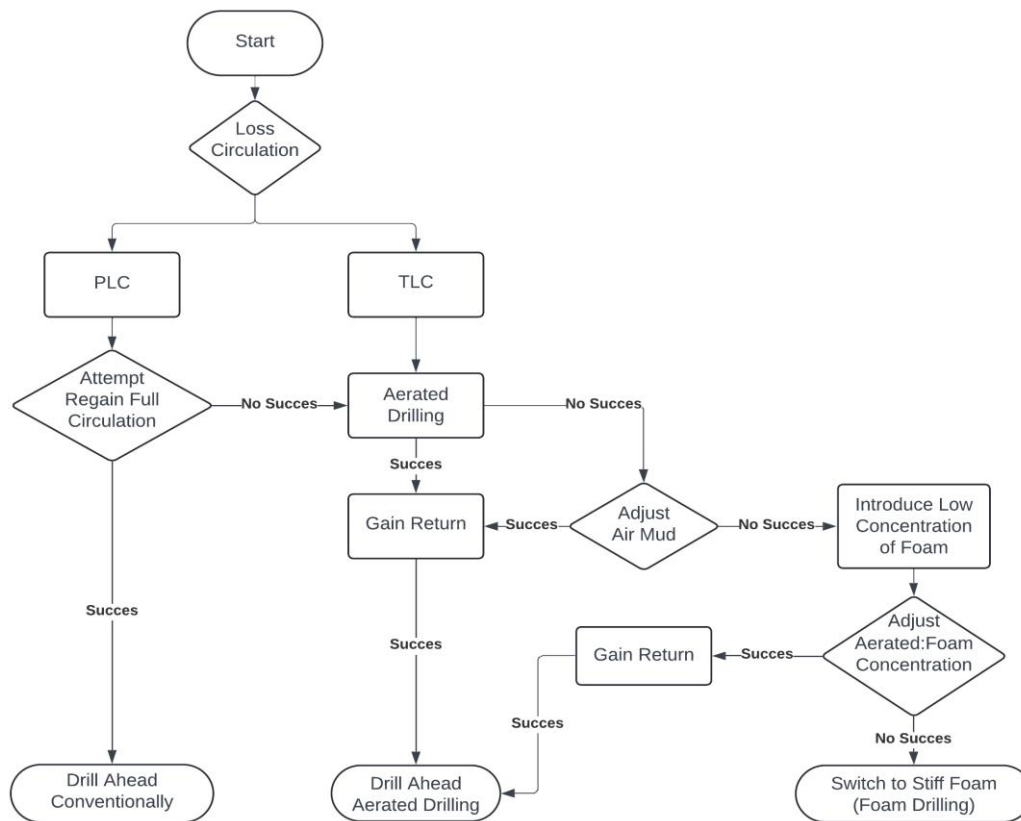
Pada tabel 5 mendeskripsikan rangkuman hilangnya sirkulasi pada trayek 12-1/4” di range kedalaman antara 1716 hingga 2001 mMD. Pada kedalaman ini mayoritas terdiri dari *lithology* batuan Breksi Andesit Terubah (BAT) dan sebagian Breksi Tufa Terubah (BTT) serta Andesit Basaltik Terubah (BAT). Tipe *loss circulation* juga bervariasi dari atas hingga bawah, semakin dalam atau bawah maka ditemukan hilang sirkulasi hingga *total loss circulation*. Dari

permasalahn yang terjadi ini harus ditangani dengan penentuan penggunaan metode *aerated drilling* dengan Gambar 4 dibawah ini.

Tabel 5. Data Rangkuman Hilang Sirkulasi Trayek 12-1/4”

<i>Depth (mMD)</i>	<i>Lithology</i>	<i>Type</i>	<i>Loss rate (BPM)</i>	<i>Remark</i>
1716-1731	<i>BAT</i>	<i>PLC</i>	3	<i>DOF</i>
1753-1756	<i>BAT</i>	<i>Intermittent</i>	3-7.5	<i>DOF</i>
1756-1771	<i>BAT/ABT</i>	<i>PLC</i>	0.5-1.1	
1771-1790	<i>ABT/BAT</i>	<i>PLC</i>	4-8.7	
1790-1802	<i>BAT</i>	<i>PLC</i>	8.1-10.4	
1817-1828	<i>BAT</i>	<i>PLC</i>	1.2-5.3	
1828-1848	<i>BAT</i>	<i>PLC</i>	10	
1848-1852	<i>BAT/BTT</i>	<i>PLC</i>	5	
1852-1853	<i>BTT</i>	<i>Intermittent</i>	13	
1853-1867	<i>BTT/BAT</i>	<i>PLC</i>	5	
1867-1886	<i>No Cutting</i>	<i>PLC</i>	5-15	
1886-1905	<i>BAT</i>	<i>PLC</i>	5-8.5	
1905-1911	<i>No Cutting</i>	<i>PLC</i>	5	
1911-2001	<i>No Cutting</i>	<i>TLC</i>	17,6	
2001	<i>No Cutting</i>	<i>TLC</i>	11,9	<i>Trip</i>
2001	<i>No Cutting</i>	<i>TLC</i>	11,9	<i>Wireline Logging</i>
2001	<i>No Cutting</i>	<i>TLC</i>	11.9-17.9	<i>Wireline Logging</i>
2001	<i>No Cutting</i>	<i>TLC</i>	11.9-17.9	<i>Trip</i>
2001	<i>No Cutting</i>	<i>TLC</i>	11.9-17.9	<i>Run Casing</i>
2001	<i>No Cutting</i>	<i>TLC</i>	17,9	<i>Run Casing</i>

Tujuan dari matriks aliran ini adalah untuk menetapkan kriteria kapan dapat diterima untuk melanjutkan pengeboran, dalam kondisi apa dapat diterima untuk melakukan control sumur atau aliran dinamis, dan pada titik mana diperlukan untuk beralih ke control sumur konvensional penuh. Pada kondisi case yang penulis pilih adalah trayek 12-1/4” yang memiliki kondisi PLC dan TLC. Maka perlu di analisa agar sesuai dengan refrensi diagram penggunaan *aerated drilling*[15].

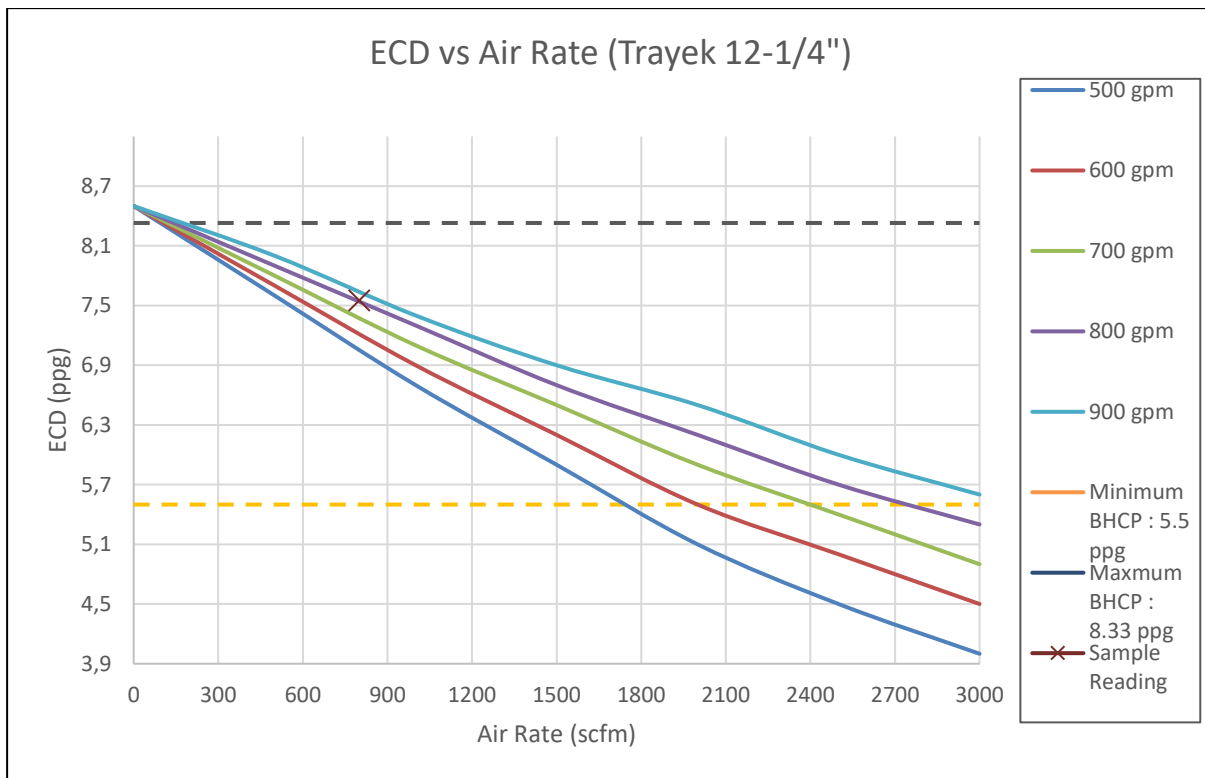


Gambar 4. Diagram Penggunaan Metode Aerated Drilling (ADA, 2023)

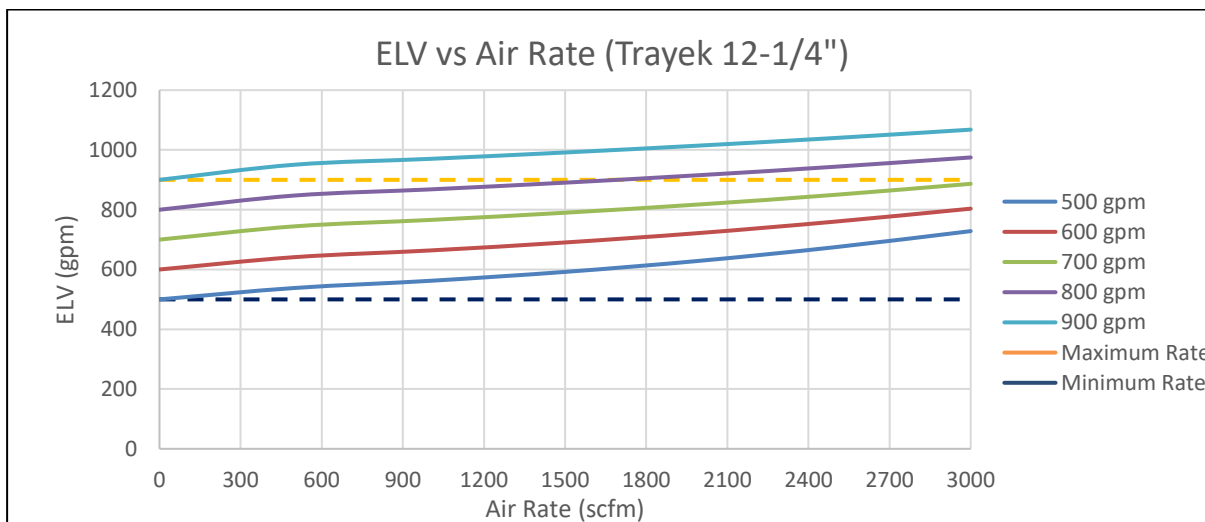
E. Grafik Simulasi Multirate Aerated Drilling

Simulasi *multirate* digunakan untuk menentukan kombinasi injeksi fluida aerasi mana yang optimum untuk digunakan selama proses pengeboran[16]. Adapun hasil yang diperoleh dari simulasi *multirate* menggunakan excel dapat dilihat pada Gambar 5. Gambar tersebut merupakan kombinasi fluida aerasi yang memiliki keterangan garis putus - putus berwarna oren yakni minimum batasan densitas terendah untuk sirkulasi sebesar 5.5 ppg dan keterangan garis putus – putus berwarna biru tua yakni maximum batasan densitas air sebesar 8.33 ppg. Karena untuk menginjeksikan udara ke dalam sumur harus memiliki takaran yang sesuai agar optimum untuk tujuan *hole cleaning* atau mengangkat *cutting* hingga ke permukaan, dengan tetap menjaga sirkulasi agar tidak hilang atau masuk ke dalam formasi.

ECD adalah hasil dari kombinasi antara kepadatan fluida pengeboran dan tekanan tambahan akibat gesekan fluida dalam annulus. Ini sangat penting untuk dipertimbangkan saat mengebor formasi dengan batas tekanan sempit (*narrow margin pressure windows*), seperti dalam pengeboran laut dalam (*deepwater drilling*). ECD yang terlalu tinggi bisa memicu masalah *loss circulation* atau bahkan memicu *blowout*, sementara ECD yang terlalu rendah dapat menyebabkan keruntuhan formasi atau *wellbore instability* [8].



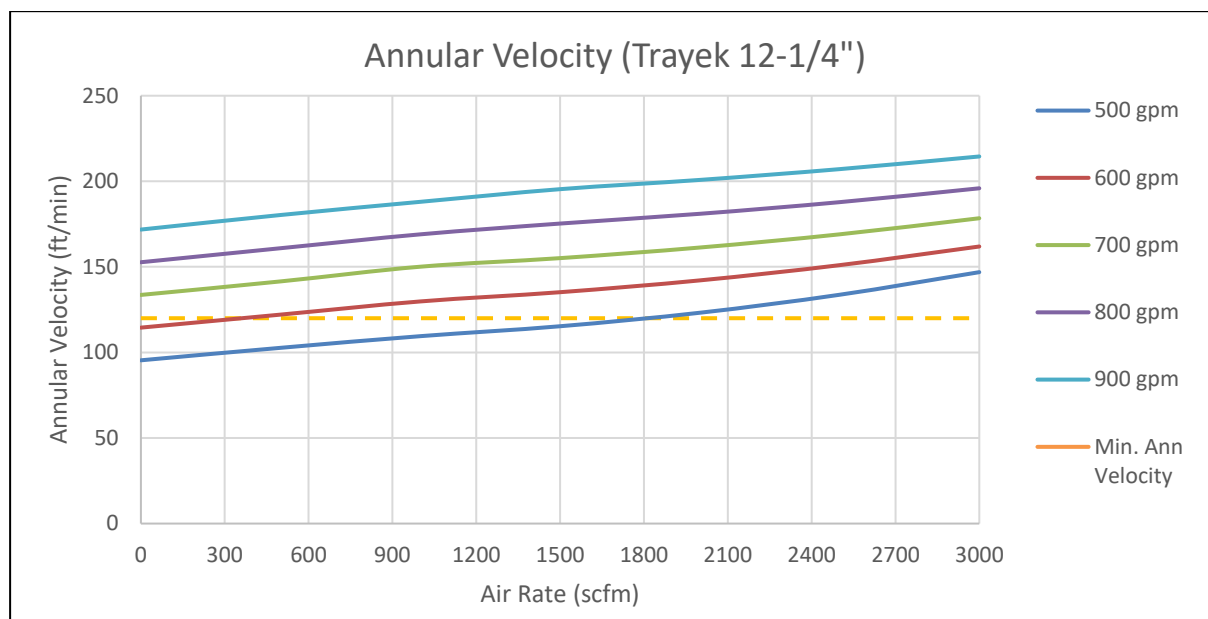
Gambar 5. Kurva *Equivalent Circulating Density (ECD) vs Air Rate*



Gambar 6. Kurva *Equivalent Liquid Volume (ELV) vs Air Rate*

Gambar 6 merupakan grafik ELV (*Equivalent Liquid Volume*) yang mempresentasikan jumlah fluida ketika berada di dasar. Hal ini perlu diperhatikan karena jumlah fluida aerasi akan berkurang di setiap kedalaman dikarenakan fluida aerasi merupakan fluida dua fasa yang terdiri dari fasa liquid dan fasa gas sehingga ketika menambah kedalaman yang di lewati maka jumlahnya akan berkurang dikarenakan sifat gas yang kompresibel [8][17]. Selain itu, nilai ELV penting saat berada di *bottom* atau berada di *mud motor* dikarenakan jumlah fluida aerasi yang melebihi batas maksimum ditambah toleransi *mud motor*, maka akan merusak *mud motor* sedangkan jumlah fluida yang terlalu sedikit atau di bawah nilai minimum akan membuat *mud motor* tidak berkerja atau berputar [7][18].

Dalam penelitian ini mud motor yang digunakan adalah 8” memiliki batas minimum 500 gpm dan maksimum toleransi di 900 gpm. Berdasarkan gambar di atas kombinasi fluida yang diizinkan adalah penggunaan fluida yang berada diantara 2 garis putus – putus yang mempresentasikan batas minimum dan maksimum mud motor.



Gambar 7. Kurva Annular Velocity (AV) vs Air Rate

Gambar 7 merupakan *annular velocity* atau kecepatan annular dari fluida aerasi ketika berada di *critical section*. Pada gambar tersebut terdapat garis berwarna oranye yang merupakan batas *minimum annular velocity* yang harus dimiliki fluida yaitu 120 ft/min. Hal ini dikarenakan pada kecepatan tersebut fluida pengeboran mampu mengangkat *cutting* ke permukaan dikarenakan gaya dorong yang lebih besar dibandingkan dengan gaya *cutting* jatuh ke bawah dan serpihan bor akan mengendap dan membentuk *cutting bed* [7]. Dapat dilihat pada gambar di atas bahwa kombinasi yang berada di atas garis oranye merupakan kombinasi yang diizinkan karena memenuhi kriteria *annular velocity* atau agar *hole cleaning* sumur terpenuhi.

4. SIMPULAN

Trayek 12-1/4” dipilih dikarenakan memiliki masalah hilang sirkulasi yang bervariasi dari yang *partial loss circulation* hingga *total loss circulation*. Kemudian penulis menentukan simulasi yang sesuai dengan studi literatur dan referensi yaitu dari perhitungan Beggs and Brill dan berhasil membuat referensi simulasi dengan menggunakan excel serta data yang berada di salah satu lapangan panas bumi.

Pada kurva ECD minimum batasan harus diatas 5.5 ppg karena merupakan densitas terendah untuk sirkulasi dan maximum 8.33 ppg karena sebagai batasan densitas air. ECD merupakan hal yang sangat penting dalam metode *aerated drilling* karena jika terlalu tinggi bisa memicu masalah *loss circulation* atau bahkan memicu *blowout*, sementara ECD yang terlalu rendah dapat menyebabkan keruntuhan formasi atau *wellbore instability*.

Pada kurva ELV batasan terdapat pada maksimum mud motor yang digunakan pada lapangan yakni antara 500-900 gpm. Nilai ELV penting saat berada di *bottom* atau berada di *mud motor* dikarenakan jumlah fluida aerasi yang melebihi batas maksimum ditambah toleransi *mud motor*, maka akan merusak *mud motor* sedangkan jumlah fluida yang terlalu sedikit atau di bawah nilai minimum akan membuat *mud motor* tidak berkerja atau berputar.

Pada kurva AV mempresentasikan terkait kecepatan fluida pengeboran yang harus mampu mengangkat *cutting* ke permukaan, namun dikarenakan gaya dorong yang lebih besar dibandingkan dengan gaya *cutting* jatuh ke bawah dan serpihan bor maka akan mengendap dan membentuk *cutting bed*. Dalam menentukan perhitungan dan simulasi sangat banyak referensi yang bisa menjadi acuan, namun penulis memilih metode yang memiliki hubungan paling dekat dengan penanganan masalah serbuk bor yang tidak dapat terangkat ke permukaan yang nantinya akan menyebabkan *stuck pipe* karena *hole packing off*.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Beggs, H. D., Brill, J.P, A study of Two Phase Flow in Inclined Pipes, SPE-AIME, 1973.
- [2] Guo, B. & Ghalambor, A, Gas Volume Requirements for Underbalanced Drilling, PennWell, 2002.
- [3] Nas, S. & Toralde, J. S. S., *Geothermal Aerated Fluids Drilling Operations in Asia Pacific*. Kuala Lumpur: Proceedings World Geothermal Congress, 2010.
- [4] Ettehadi, R., Young, W.L.S, *Calculation of Equivalent Circulating Density in Underbalanced Drilling Operation*. International Petroleum Technology Conference, 2013.
- [5] Nugroho, Wisnu Adi, Design and Application of Aerated and Foam Drilling Fluid, Case Study in Drilling Operation in Indonesia. Proceedings, 43rd Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University, 2018.
- [6] Osguouei, R. E., Calculation of Equivalent Circulating Density in Underbalanced Drilling Operation. China: SPE, 2013.
- [7] Borgoyne, A.t., Millheim, K.K., Chenevert, M.M, & Young, F. S, *Applied Drilling Engineering*. United States of America: Society of Petroleum Engineer. 1991.
- [8] Rabia, H., Oilwell Drilling Engineering. Principles and Practice. USA:Graham & Trotman, 1985.
- [9] Rubiandini, Rudi. *Teknik Operasi Pemboran Volume 1 Edisi 1*. Institut Teknologi Bandung, 2012.
- [10] Martasari, Rial Dwi., Wiratama, Denny., dan Arifiyanto, Dwi. Penentuan Injeksi Udara Optimum dalam Operasi Aerated drilling pada Sumur Panas Bumi PT. Air Drilling Associates. Jurnal Migasian, e-issn: 2615-6695, 2021.
- [11] Hole, H., *Lecture on geothermal drilling and direct uses*. UNU-GTP, Iceland, report 3, 32 pp.
- [12] Bjelm, L., Underbalanced drilling and possible well bore damage in low-temperature geothermal environment. Proceedings of the 31st Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford, 2006, 6 pp.
- [13] C. R. Ade Indra, "Analysis of the Relationship between Rate of Penetration, Torque, Rotary Per Minute, and," *PROCEEDINGS, The 8th Indonesia International Geothermal Convention & Exhibition (IIGCE) 2020*, 2020.
- [14] R. A. Amirah, "Optimization of Lost Circulation Prevention Design With Aerated Drilling of Well-X on Geothermal Field-M," *Subsurface*, vol. 01, pp. 39-48, 2023.
- [15] D. O. Aris, "Aerated drilling cutting transport analysis in geothermal well," *6th ITB International Geothermal Workshop (IIGW2017)*, 2017.
- [16] S. Ariya, " Aerated Underbalance Drilling Screening Assessment at "X"," *Renewable Energy and Energy Conversion Conference and Exhibition*, vol. 1, pp. 22-46, 2015.
- [17] S. W. P. Nugroho, "Design and Application of Aerated and Foam Drilling Fluid, Case Study in Drilling Operation in Indonesia," *SPE-186233-MS*, 2017.
- [18] S. P. Mika, "Optimizing the Application Underbalanced Drilling Through The Use Air and Foam Systems and Low-Pressure Gas Reservoirs," *SEP/IADC-189388-MS*, 2018.

Daftar Simbol

- T = Temperature Kedalaman yang dihitung, Rankine
- T_s = Temperatur permukaan, F
- TVD_n = True Vertical Depth dari kedalaman yang dihitung, ft
- T_g = Gradien temperature panas bumi (F/ft)
- P_n = Tekanan pada kedalaman yang dihitung (psi)
- P_{n-1} = Tekanan pada sebelum kedalaman sebelumnya (psi)
- Phyd-1 = Tekanan hidrostatik pada kedalaman sebelumnya (psi)
- Pf-1 = Tekanan friksi pada kedalaman sebelumnya (psi)
- T_{pr} = Pseudo reduce temperatur (R)
- P_{pr} = Pseudo reduce pressure (psi)
- z = Faktor kompresibilitas
- B_g = Gas kompresibilitas
- V_m = Velocity lumpur dasar (ft/min)
- V_g = Velocity gas (ft/min)
- V_{mix} = Velocity Fluida Aerasi (ft/min)
- Q_{mud} = Laju alir lumpur dasar (gpm)
- Q_{gas} = Laju alir gas (scfm)
- ID = Inner diameter casing (ft)
- OD = Outer diameter dp (ft)
- λ_l = Lamda
- L = Konstanta
- g = Gravitational acceleration (ft/sec²)
- N_{fr} = Froude Number
- H_L = Liquid Holdup
- N_{lv} = Number liquid volume
- V_m = Velocity campuran (ft/sec)
- M_w = Massa jenis lumpur (ppg)
- P_s = Tekanan permukaan
- Ψ = Konstanta faktor koreksi pipa miring
- Θ = Sudut
- HL(θ) = Liquid holdup pada pipa miring
- HL(0) = Liquid holdup pada vertikal
- ρ_g = Density gas pada kedalaman yang dihitung (Pcf)
- S_{gg} = Specific gravity gas
- μ_n = Viscosity campuran (cp)
- μ_g = Viscosity gas (cp)
- μ_L = Viscosity liquid (cp)
- ρ_n = Density campuran (pcf)
- P = Tekanan pada kedalaman yang dihitung
- ρ_m = Density mix fluida (pcf)
- M_w = Density Mud (pcf)
- HI(θ) = Liquid Hold-up pada kedalaman
- ρ_g = Density gas (pcf)
- ρ_f = Pressure loss (psi/feet)
- ρ_{hy} = Tekanan Hidrostatik (psi/feet)
- ρ_n = Density mix (pcf)
- V_{mix}² = Velocity Mix (Ft/sec)
- g = Percepatan gravitasi (ft/sec²)
- ECD = Equivalent circulating density
- P_{total} = Bottom Hole Pressure (psi)
- ELV = Equivalent Liquid Volume (gpm)
- Q_m = Flow rate mud (gpm)
- Q_g = Flow rate gas (gpm)

Flow Pattern	A	b	C	
Segregated	0.98	0.4846	0.0868	
Intermittent	0.845	0.5351	0.0173	
Distributed	1.065	0.5824	0.0609	
Flow Pattern	e	f	G	h
Segregated Uphill	0.011	-3.768	3.539	-1.614
IntermittentUphill	2.96	0.305	-0.4473	0.0978
Distributed Uphill	No Correction : C = 0, Ψ = 1			
Jika C < 0, maka C = 0				