

Syntax Literate: Jurnal Ilmiah Indonesia – ISSN: 2541-0849
e-ISSN: 2548-1398
Vol. 2, No 8 Agustus 2017

ANALISIS PRESSURE WINDOW UNTUK PENGOPERASIAN AERATED DRILLING TERHADAP GEOTERMAL

Rial Dwi Martasari¹, Ghifari Yoga Pradana dan Raka Aditya Pratama

Akamigas Balongan Indramayu dan PT. Air Drilling Indonesia

Email : rialdwimartasari@gmail.com; ghifariyoga@hotmail.com

Abstrak

Aerated Drilling yang telah dimanfaatkan untuk menembus zona potensial sumur geothermal penting untuk dinilai agar bisa berjalan optimal. Analisis kinerja pengeboran aerasi dengan menggunakan pressure window telah disiapkan untuk dijadikan referensi dalam praktek di lapangan sumur panas bumi dalam mengatasi permasalahan selama pengeboran guna meningkatkan produktivitas reservoir panas bumi. Sumur panas bumi yang didominasi fraktur di dalamnya cenderung mempengaruhi kemampuan lumpur dalam proses pengeboran. Tekanan kolom tembaga berkurang karena penambahan fasa gas menyebabkan lumpur yang digunakan secara teknis relevan diimbangi oleh kebersihan sumur bor. Penentuan jendela tekanan dibuat dengan memberikan volume yang tepat berkisar antara fase gas dan liquid dalam sistem sirkulasi lumpur, dibatasi oleh kemampuan membersihkan peralatan sumur bor dan peralatan pendukung permukaan. Pengamatan dilakukan pada aerasi simulasi aerasi di sumur geothermal seluas 2.500 meter. Zona retak diperkirakan berada pada kedalaman 1500 meter dengan lintasan sedikit 12-1/4 dan 9-7/8. Campuran lumpur 800-900 gpm dan 1500 scfm udara digunakan untuk perhitungan dasar. Kepadatan dan viskositas bahan bakar aerasi sama dengan tekanan dan sebaliknya membuat lumpur pengeboran memiliki lebih banyak daya untuk mengangkat pemotongan. Nilai kecepatan annular yang melebihi batas minimum (36 mpm), Ca di bawah 1% dan kecepatan transportasi menunjukkan 90-95% pemindahan pemotongan kemampuan optimal. Hasil ini akan digunakan untuk analisis jendela tekan. Dengan demikian pengeboran aerasi dinilai memiliki kinerja yang baik dalam pengeboran reservoir rekah panas bumi yang merupakan zona potensial. Makalah ini diakhiri dengan kinerja aerasi pada setiap kedalaman dan diverifikasi bahwa metode pengeboran aerob lebih mudah, lebih cepat dan lebih murah.

Kata Kunci: *Aerated Drilling, Fractures dan Pressure Window*

Pendahuluan

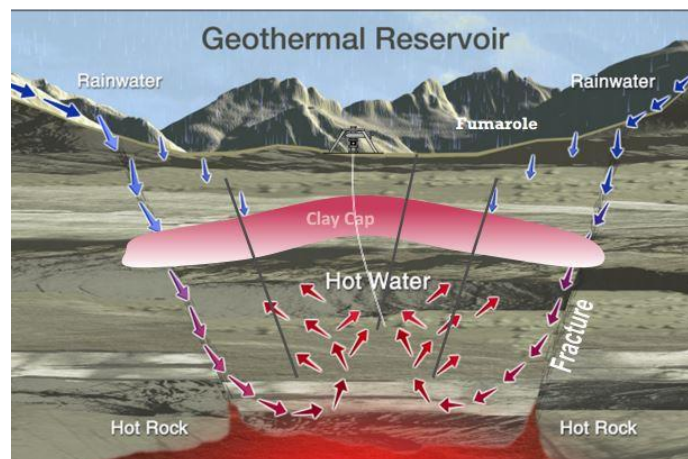
Zona produktif sumur panas bumi sangat rentan untuk dipenuhi *cutting* selama operasi pemboran. Demikian metode pemboran dapat mempengaruhi produktifitas sumur panas bumi. Metode *aerated drilling* sudah dikenal sebagai metode yang efektif untuk diterapkan. (Ashadi, 2015). *Aerated drilling* menggunakan fasa gas dan cair

untuk dimasukkan ke dalam kolom lumpur pemboran untuk mengurangi densitas efektif (ECD) agar dapat meningkatkan peluang lumpur bersirkulasi. Mengetahui variasi penggunaan volume fasa gas dan cair untuk diinjeksikan menjadi hal penting untuk diketahui pada operasi pemboran aerated.

Analisa *pressure window* dapat dijadikan acuan di lapangan mengenai penggunaan volume injeksi antara fasa gas dan cair agar operasi pemboran tidak menimbulkan masalah seperti hilang sirkulasi dan pipa terjepit.

1. Kondisi Geologi dan Reservoir Geothermal

Gambar 1
Skema Reservoir Geothermal



Kondisi geologi menjelaskan tentang kondisi formasi batuan yang akan dihadapi selama proses pemboran panas bumi, termasuk di dalamnya kondisi formasi reservoirnya. Sebagaimana dalam gambar di atas, Dwinanto (Dwinanto 2013) menjelaskan bahwa ada tiga komponen penting dari suatu formasi batuan untuk dapat dijadikan lahan produksi panas bumi, diantaranya yaitu:

- Aquifer/reservoir* yang dipenuhi rekahan yang mengandung air sebagai media transfer panas.
- Area recharge dimana air meteorik dapat mengisi reservoir.
- Sumber panas.

Air meteorik yang masuk ke dalam zona reservoir akan terpanaskan oleh sumber panas dan dapat berubah fasa menjadi uap yang panas, inilah yang kemudian mengalir ke permukaan untuk di produksi. Di dalam reservoir hal ini menyebabkan gradien tekanan menjadi rendah karena terisi oleh steam atau uap panas dan gradien suhu yang

tinggi karena dekat dengan sumber panas. Akibatnya, proses pemboran dapat terhambat karena apabila tekanan formasi kurang dari tekanan hidrostatiknya (lumpur) maka peluang hilang sirkulasi menjadi tinggi dan kemudian dapat menyebabkan pipa terjepit apabila rekahan sudah terisi oleh cutting yang tidak dapat terangkat ke permukaan.

Penggunaan volume lumpur aerasi yang efektif berhubungan langsung dengan kemampuan pembersihan lubang sumur yang dibentuk selama pemboran. Volume lumpur dengan nilai yang sesuai dapat dijadikan alat yang tepat untuk mengangkat cutting agar tidak terjebak di dalam anulus dan masuk ke zona rekah potensial selama operasi pemboran.

2. *Aerated Drilling*

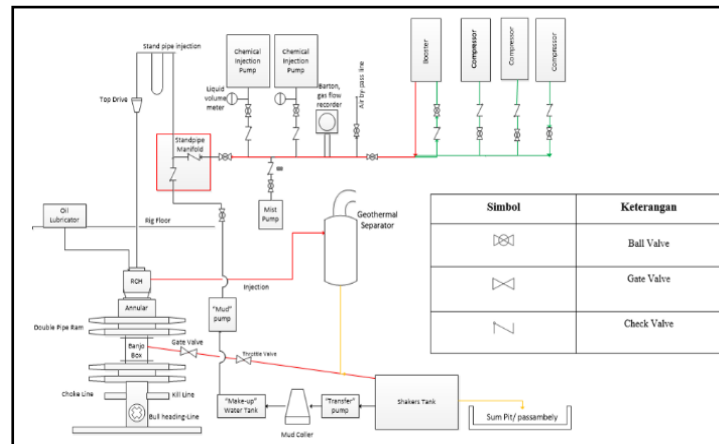
Teknik *Aerated drilling* telah diakui memiliki kinerja yang baik dalam pemboran panas bumi (Ashadi, Dumrongthai 2015) (Syahrul 2013) (Dwinanto 2013) (Subiatmono 2001) (Chemwotei 2011). Komposisinya berupa udara, lumpur dan zat tambahan (bila diperlukan). Penambahan fasa gas kedalamnya dapat menurunkan densitas kolom lubang sumur selama pemboran. Daya ekspansi dari gas setelah teragitasi (teraduk) oleh putaran pahat pada saat pemboran dapat membuat fasa cair dan gas menjadi bersatu sehingga membuat lumpur di dalam anulus bergerak lebih cepat naik ke permukaan, dapat dikatakan meningkatkan kemampuan lumpur untuk bersirkulasi.

Karena kecepatannya maka lumpur ini cocok untuk diterapkan dalam kondisi lubang yang memiliki rekahan. Hasil analisis, lumpur aerasi ini juga menjadi solusi mencegah masalah lubang sumur yang sering terjadi dalam pemboran sumur panas bumi seperti hilang sirkulasi dan pipa terjepit yang mencapai 17.9% dari keseluruhan masalah selama pemboran (Susilo 2015).

a. *Aerated Drilling Layout*

Pada prakteknya, volume injeksi lumpur aerasi dikontrol oleh peralatan sirkulasinya. Susunan sistem sirkulasi berikut ini dapat menjelaskan sistem aliran lumpur beserta peralatan yang dipakainya selama sirkulasi (Gambar 1).

Gambar 2
Aerated Drilling Layout (Yoga 2016)



Standar peralatan yang dipakai dalam pemboran panas bumi dengan memakai sistem aerasi diantaranya adalah:

- 1) *Kompresor*
- 2) *Booster*
- 3) *Texsteam/Chemical Injection/Mist Pump*
- 4) *Rotating Head*
- 5) *Banjobox*
- 6) *Bloo-line*
- 7) *Geothermal Separator*

Adapun peralatan pendukungnya seperti:

- 1) *Manifold*
- 2) *Mud Pump*
- 3) *Mud Cooler*
- 4) *Conditioning Equipments (e.g. shakers mud pit, etc.)*
- 5) *Barton*
- 6) *Float valve (back pressure equipment in drill string)*

Mengetahui komposisi lumpur aerasi, fasa cair yang biasa dipakai adalah air yang dipompakan melalui mud pump, adapun zat tambahannya seperti polimer potasium klorida (*KCL polymer*). Fasa gas adalah udara yang dikompresi oleh kompresor (*tipe screw*) dan diberi tekanan oleh booster (*kompresor tipe piston*) dan ditambah zat tambahan seperti foam agent dan corrosion inhibitor diinjeksikan oleh texsteam pump ditambahkan untuk memperbaiki kinerja dalam mengangkat cutting

selama sirkulasinya dan memperpanjang umur rangkaian bor agar tidak mudah korosi.

Demi hal keselamatan *float valve* dipasang pada rangkain bor untuk mencegah gas mengalir kembali ke atas saat diinjeksikan. Adapun jenis valve sebagai pengatur aliran pada peralatan aerasi (*kompresor dan booster*) didahului oleh check valve yang berfungsi untuk mengalirkan fluida pada satu arah dan menghindari adanya aliran balik, selanjutnya adalah ball valve untuk mengatur alirannya.

b. *Pressure window, Hydraulic and Hole Cleaning Assessment*

Pressure window berisi grafik laju alir gas (Q_{gas}) dan tekanan yang berasal dari perhitungan *Equivalent Circulating Density* (ECD) pada setiap batas kebersihan lubang di dalamnya terdapat batasan yang menerangkan kemampuan lumpur agar tidak menimbulkan masalah pemboran khususnya dalam sumur panas bumi seperti hilang sirkulasi dan pipa terjepit.

Seringkali hal ini terjadi karena efek dari overbalanced. Efek overbalanced ini berasal dari tekanan formasi yang kurang dari tekanan hidrostatik lubang bor, akan tetapi hal ini dapat dikontrol dari densitas lumpur yang dipakai. Dalam pemboran panas bumi *pressure window* dibatasi oleh:

- 1) Kemampuan peralatan permukaan
- 2) Pembersihan lubang sumur
- 3) Tekanan formasi

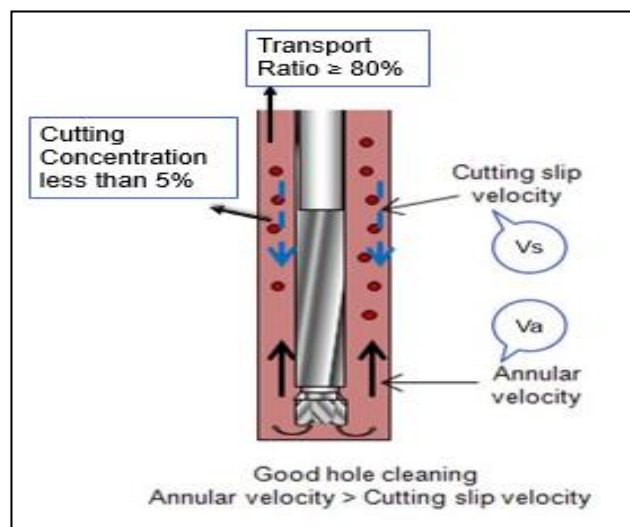
Kemampuan maksimal peralatan dipermukaan ditentukan oleh kebutuhan di lapangan. Contohnya seperti kompresor yang memiliki batas mengompres udara sampai 2700 scfm dan booster dengan tekanan 2500 psi (Kesuma 2005). Faktor tekanan formasi dalam pemboran panas bumi dalam hal ini diasumsikan bahwa di dalam hanya terdapat air maka dari itu hal ini menjadi acuan utama saat mendesain lumpur agar tetap dalam kondisi *underbalanced*.

Faktor pembersihan lubang sumur adalah hal yang paling kritis dalam penentuan *pressure window* ini, karena berhubungan dengan kondisi reservoir yang rekah, apabila tidak bersih maka besar kemungkinan *cutting* akan mengisi bagian rekahan yang dapat menjadi masalah dikemudian.

Pengaruh kebersihan lubang sumur dipengaruhi oleh reologi yang menerangkan sifat aliran dan hidrolika yang menerangkan kemampuan fluida khususnya saat kondisi bergerak. Analisa fluida aerasi seperti densitas, viskositas, kehilangan tekanan dan annular-slip *velocity*, diperhitungkan untuk mendapatkan nilai konsentrasi cutting di dalam anulus (C_a) dan transport ratio yang memperlihatkan nilai pengangkutan cutting ke permukaan. Dari studi literatur sebelumnya mengenai hidrolika lumpur aerasi didapat beberapa batasan, seperti:

- 1) Annular velocity (kecepatan lumpur mengalir di anulus) sebesar 36 m/min pada dasar lubang (P.S. Puon 1984) dan 3000 ft/min dipermukaan (Russel 1987)
- 2) Maksimal konsentrasi fraksi cutting yang ada di dalam lubang sumur 5% (Rabia 2002)
- 3) Minimal transport ratio sebesar 80% pada zona open hole
- 4) Memenuhi rumusan sederhana bahwa annular *velocity* lebih dari nilai slip *velocity*. (Gambar 3 Hole Cleaning States).
- 5) Perhitungan kebersihan lumpur menggunakan pendekatan power law, karena dalam prakteknya lumpur berbahan dasar air-newtonian (*water based mud*) akan ditambah zat lain untuk mendukung performanya maka trennya menjadi non-newtonian.

Gambar 3
Hole Cleaning States (Yoga 2016)



Analisa kebersihan lubang bor dalam prakteknya di lapangan juga dikorelasikan dengan *lag time*. Karena nilai ini adalah cerminan waktu untuk bersirkulasi dari permukaan ke dasar lubang sumur sampai kembali lagi ke permukaan dengan membawa cuttings, demikian dapat dipantau performa sebuah lumpur pemboran.

3. Studi Kasus Penentuan *Pressure Window* Pada Trayek 12 ¼ dan 9 7/8

Pada bagian ini akan menganalisa sebuah studi kasus pemboran panas bumi. Segala perhitungan dari riset ini menggunakan microsoft excel sebagai media hitungnyanya kemudian akan direpresentasikan ke dalam grafik, demikian pada akhirnya akan menilai proses pemboran panas bumi dengan menggunakan operasi aerated drilling sampai pada aspek pentingnya yaitu penentuan *pressure window* untuk mengetahui besaran volume injeksi yang optimal. Secara lengkap alur proses penentuan *pressure window* dalam operasi *aerated drilling*. Beberapa asumsi yang dipakai dalam perhitungannya antara lain adalah *pertama*, sistem perhitungan literasi menggunakan fasa cair digunakan untuk menghitung propertis multifasa (aerasi) dan yang *kedua*, perhitungan ini diasumsikan isothermal, tekanan dan volume berubah sesuai kedalaman akan tetapi suhu dijaga tetap pada gradienya (10 deg.C/100ft).

a. Tentang Sumur “X”

Sumur “X” adalah sumur eksplorasi panas bumi yang dibor di lapangan “Y” pada daerah “Z”. Sumur ini rencananya akan dibor tegak hingga kedalaman 2500 meter measured depth (mMD). Zona rekah total dan partial diprediksi akan dialami pada kedalaman 1500 mMD hingga True Depth (TD). Target utama dari pengeboran ini adalah untuk mengetahui potensi dari lapangan “Y”, apakah dapat dikembangkan atau tidak.

Aerated drilling akan digunakan pada trayek bit 12 ¼” (inch) dan 9 7/8” (inch) dengan tujuan mengatasi hilang sirkulasi, namun rentang penggunaan udara belum ditentukan, digunakan analisa *pressure window* untuk memperoleh rentang volume injeksi selama operasinya. Penentuan rentang penggunaan udara ini sangat kritikal untuk menentukan kesuksesan pemboran hingga TD sumur.

b. Data Formasi

Berdasarkan analisa geoscience suhu target TD diprediksi akan sebesar 250 °C, dengan dominasi batuan beku vulkanik yang memiliki densitas 22 ppg. Tekanan

dasar sumur diperkirakan 2800 psi pada TD sumur. Suhu tinggi ini akan dialami dari zona yang menjadi media alir steam zone (zona uap panas). Steam ini akan teralirkan melalui zona rekahan sepanjang operasi pemboran.

c. **Data Permukaan**

Ketersediaan peralatan untuk *aerated drilling* di permukaan adalah terdapat tiga kompresor dan satu *booster* yang mampu menghasilkan 2400 scfm pada 2500 psi. Terdapat juga foam agent dan corrosion inhibitor untuk meningkatkan performa pemboran aerasi.

4. **Hasil dan Diskusi**

Penggunaan *aerated drilling* didasarkan pada analisa fuzzy logic yang tujuan utamanya adalah mengatasi masalah lubang sumur panas bumi dalam menembus zona potensial yang penuh rekahan di dalamnya. *Aerated drilling* termasuk ke dalam metode unconventional untuk mengatasi masalah hilang sirkulasi setelah metode pemboran *blind drilling* dan pemboran dengan lumpur dasar (air ditambah bentonit). Tanda keberhasilan penerapan *aerated drilling* didapat dari penilaian *pressure window* yang efektif dimana dengan volume injeksi dua fasanya dapat membuat lumpur bersirkulasi dengan membawa *cutting* kepermukaan dan juga apakah lag time dari lumpur yang bersirkulasi telah tepat waktu.

a. **Lag Time**

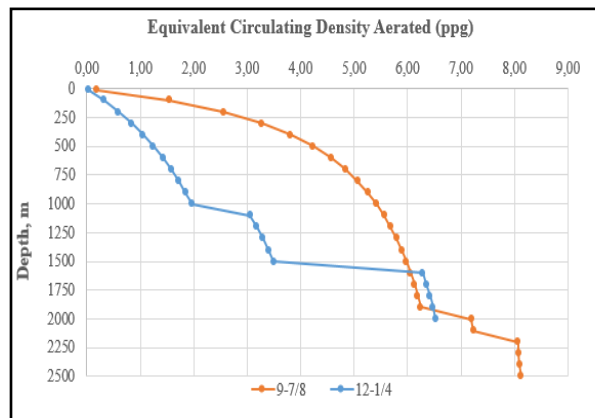
Pemompaan 800 gpm lumpur (air) kedalam lubang sumur pada kedalaman 2000 meter secara teoritis akan mendapatkan sirkulasi pada dalam waktu 44 menit. Sedangkan pemompaan 900 gpm lumpur pada kedalaman 2500 meter akan mendapatkan sirkulasi kembali ke permukaan selama 50 menit. Apabila kurang dari ini maka lumpur yang tersirkulasi kemungkinan telah hilang sebagian (bila volumenya berkurang) atau seluruhnya (bila mendapati zona hilang rekahan besar). Kemudian perhitungan kebersihan lubang sumur dilakukan untuk menghasilkan *pressure window* yang optimal untuk proses pemboran.

b. **Hydraulic Analysis**

Dari hasil perhitungan ECD pada kedua trayek di atas rata-rata densitas trayek 12 ¼ adalah 3 ppg dan trayek 9 7/8 adalah 5,43 ppg, selisih 2 ppg ini menandakan bahwa semakin kedalam densitas aerasi semakin besar (*aerated*).

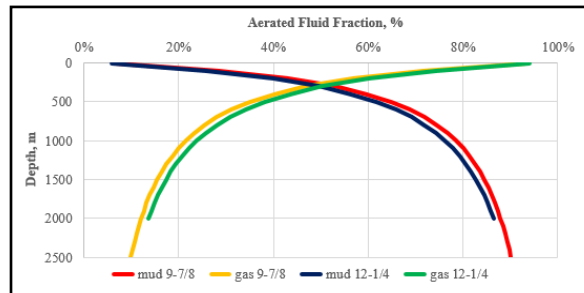
Densitas aerasi berbanding lurus dengan densitas udaranya dan nilai kehilangan tekanan (*pressure loss*) selama di dalam anulus. *Pressure loss* berbanding terbalik dengan selisih ruang di dalam anulus yang dipengaruhi oleh diameter luar rangkaian bor dan diameter lubang bor. Seperti pada trayek 12¼ di kedalaman 1000 meter dimana terdapat peralihan dari casing 13 3/8 ke trayek bit 12¼ selain itu, outside diameter drill collar juga mempengaruhi di kedalaman 1600-2000 m. Begitupun dengan trayek 9 7/8, dimana pada kedalaman 2000 meter terdapat peralihan dari trayek bit 12 ¼ yang di-casing dengan ukuran 10 ¾ ke trayek bit 9 7/8. Selain itu outside diameter drill collar mempengaruhi di kedalaman 2200-2500 m.

Gambar 4.
Gambar ECD vs Depth



Gambar di atas menunjukkan tren fraksi pada lubang bor yang berbeda ditunjukkan pada kombinasi 1500 scfm gas dengan 800 dan 900 gpm air pada kedalaman 2000 dan 2500 meter di trayek 12 ¼ dan 9 7/8, hasil ini mendukung pernyataan bahwa fluida aerasi akan mengalami kondensasi sehingga semakin dalam gas akan mengompresi, membuat fraksi cair bertambah dan semakin ke atas gas akan mengekspansi sehingga dalam aplikasinya dapat membuat lumpur bergerak lebih cepat ke permukaan.

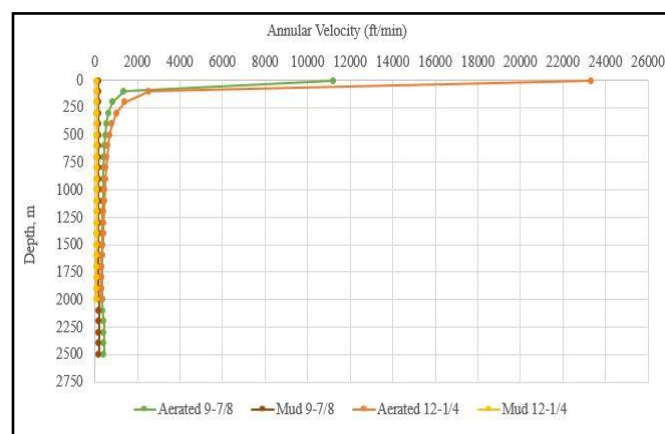
Gambar 5
Gambar Fraksi Aerasi



Tren di bawah menerangkan bahwa semakin dalam lubang bor maka viskositas lumpur aerasi mengalami kenaikan, Demikian fraksi cair sangat menentukan tren dari viskositas aerasi ini. Selain itu, terdapat penurunan nilai antara trayek 12 ¼ dan 9 7/8 karena viskositas lumpur dasar pada trayek 12 ¼ (57 MF) lebih besar dari pada trayek 9 7/8 (47 MF) walaupun dihitung dengan densitas lumpur yang sama (8.6 ppg).

Hasil analisa kedua trayek (Grafik 5.4) didapat annular velocity pada trayek 12 1/4 rata-rata lumpur aerasi menghasilkan 1720 fpm sedangkan lumpur dasar 96 fpm. Dari trayek 9 7/8 rata-rata lumpur aerasi menghasilkan 881 fpm sedangkan lumpur dasar 172 fpm. Selisih yang jauh ini menandakan lumpur aerasi lebih cepat bergerak ketimbang lumpur dasar yang tidak teraerasi.

Gambar 5
Annular velocity



Densitas dan viskositas dari fluida yang teraerasi cenderung membuat gas semakin terkompresi, demikian dapat mempengaruhi nilai annular *velocity* di dalam anulus. Ekspansi gas akan lebih besar di dalam anulus ketimbang di dalam

rangkaian bor karena proses agitasi oleh bit dapat menyebabkan fraksi gas terlarut dalam fraksi cairnya. Semakin mendekati permukaan maka nilai annular velocity akan semakin besar hal ini terjadi seiring densitas dan viskositas lumpur yang berkurang.

c. Hole Cleaning Assessment

Pada akhirnya penilaian hole cleaning tercermin dari nilai Ca (cutting concentration) dan TR (transport ratio). Perhitungan slip velocity terlebih dahulu dilakukan, pada trayek 12¼ didapat hasil 31 ft/min dan 23 ft/min pada trayek 9 7/8 dengan asumsi diameter dan densitas cutting sebesar 0.3 in dan 22 ppg. Nilai TR pada trayek 12¼ adalah 70-90% dan pada trayek 9 7/8 sebesar 70-95%.

Kemudian nilai Ca dihitung dengan asumsi laju penembusan bit sebesar 40 ft/hr. Pada trayek 12¼ menghasilkan 0.4% dan pada trayek 9-7/8 sebesar 0.3%. nilai ini berbanding terbalik dengan transport ratio. Nilai Ca dan TR diatas menjelaskan bahwa semakin dalam kemampuan lumpur aerasi dapat mengangkat cutting yang lebih banyak ke permukaan.

d. Pressure Window Assessment

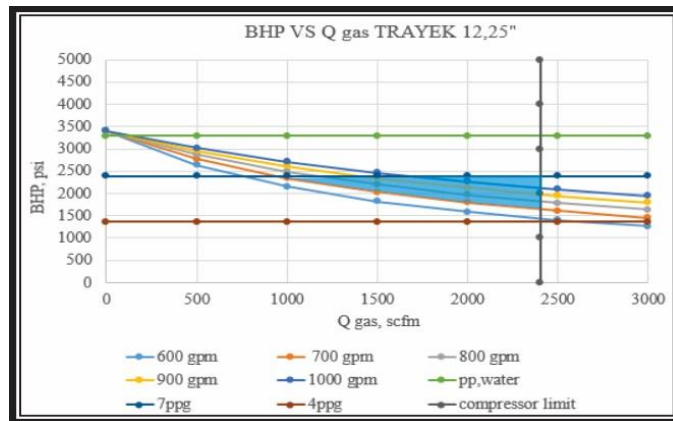
Hasil akhir perhitungan kebersihan lubang sumur akan berupa densitas yang kemudian akan direkayasa ulang dengan laju alir (scfm dan gpm) yang bervariasi, kemudian akan dicatat ECD yang optimal berdasarkan hasil hole cleaning-nya untuk dapat diterjemahkan kedalam tekanan selama lumpur bersirkulasi (BHCP) dan dimasukkan kedalam grafik berdasarkan jumlah gas dan fluida yang diinjeksikan. Dari grafik ini kemudian dapat digunakan sebagai acuan dalam praktek di lapangan.

Kedua grafik tersebut dibatasi pada ECD antara 4-7 ppg, nilai ini efektif berdasarkan pengalaman insinyur di lapangan (AirDrilling, 2016).

1) Trayek 12 ¼

Batas injeksi fluida yang optimal (pressure window) pada trayek ini sebesar 700–900 gpm air dengan 800–2400 scfm gas. Nilai ini sudah memenuhi minimal TR sebesar 80% pada zona open hole.

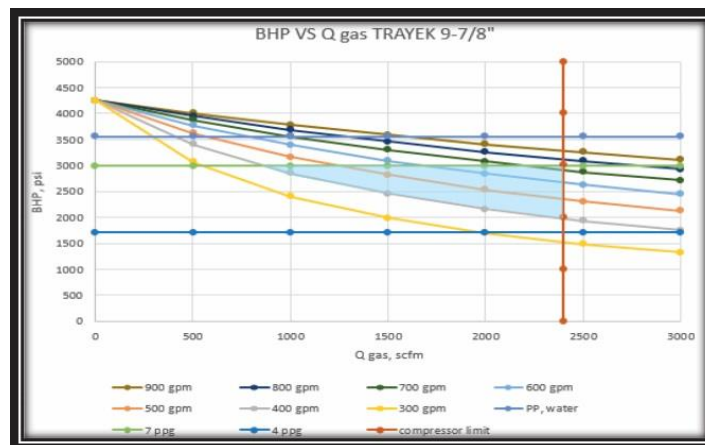
Gambar 6.
Pressure window Trayek 12 ¼



2) Trayek 9 7/8

Dari perhitungan yang sama kemudian diterapkan kedalam trayek 9 7/8 dimana ini adalah batas akhir pemboran yang kemudian akan dipasang liner sebagai pipa produksinya. Batas injeksi fluida aerasi yang optimal berada pada 400-600 gpm air dan 500-2400 scfm gas. Akan tetapi, batas maksimal pada trayek ini tetap pada 900 gpm.

Gambar 7.
Pressure window Trayek 9-7/8



Pressure window pada kedua trayek (12¼ dan 9-7/8) memiliki nilai keefektifan yang berbeda. Nilai optimal lebih baik dipakai dari pada nilai maksimal. Pada penerapannya di lapangan, penggunaan pressure window ini bertujuan untuk mendapatkan sirkulasi ke permukaan pada nilai volume injeksi yang optimal, nilai

ini tergantung kondisional di lapangan dan ada atau tidaknya sirkulasi (return) dapat dievaluasi dari lag time .

Kesimpulan

Aerated drilling dengan komposisi lumpur berisi udara dan air yang ditambah zat tambahan dipakai untuk menembus zona potensial (loss zone) agar meminimalisir masalah pemboran yang berkaitan dengan akumulasi cutting selama sirkulasi lumpur.

Kenaikan laju alir air dapat meningkatkan kebersihan lubang bor, terlihat dari nilai TR dan Ca. Terlihat antara grafik *pressure window* 12-1/4 dan 9-7/8 dalam efektifitas injeksinya dapat menaikkan nilai ratio transportasi cutting dari 90% ke 95% (kenaikan 5%) dan menurunkan nilai konsentrasi cutting dari 0,4% ke 0,3% (penurunan 0,1%).

Masing-masing grafik *pressure window* menghasilkan nilai efektifitas yang berbeda. Nilai ini dapat dijadikan acuan untuk penentuan laju alir lumpur aerasi pada penerapannya di lapangan akan tetapi penilaian lag time juga akan berpengaruh untuk menilai seberapa efektif *pressure window* yang diaplikasikan (44 min. Pada trayek 12-1/4 dan 50 min. Pada 9-7/8), hal ini terlihat dari seberapa baik lumpur dapat bersirkulasi tepat waktu dan membawa *cutting* kepermukaan

BIBLIOGRAFI

- Ashadi, Dumrongthai, Panurach. 2015. "Successful Implementation of Aerated Drilling in Improving Geothermal Drilling Performance." Proceedings World Geothermal Congress 1.
- Chemwotei, Sichei Chepkech. 2011. "Geothermal Drilling Fluids." Geothermal Training Programme (United Nations University) 149-177.
- Dwinanto, Ariya. 2013. *Aerated Underbalanced Drilling Screening Assessment at "X" Geothermal Field*. Bandung: ITB.
- Kesuma, I Made Budi. 2005. "Aerated Drilling in Indonesia and Icelandic." unu-gtp.
- Rabia, Hussain. 2002. *Well Engineering & Construction*. Iran.
- Russel. 1987. "The Use of Aerated Fluids in Geothermal Drilling." Geothermal Energy New Zealand Limited. New Zealand: GEZL. 1.
- Subiatmono, P., Kenedy., Irwan, Yulianto. 2001. "Penerapan Teknologi Pemboran Underbalanced pada Sumur Lapangan Jatibarang Pertamina DO Hulu Cirebon." Proceeding Simposium Nasional Iatmi 2001 68.
- Susilo, Surjanto Djoko. 2015. *Pengenalan Pemboran Geothermal*. Indramayu, Jawa Barat, 27 September.
- Syahrul, Edo Pratama. 2013. "Drilling Parameter Analysis in Solving Pipe Sticking in a Total Lost Circulation Zone Case Study: Well X and Well Y Geothermal Well Ulubelu Field." Indonesia Petroleum Association. Jakarta: Indonesia Petroleum Association.