

PENERAPAN TEKNOLOGI PEMBORAN UNDERBALANCED PADA SUMUR LAPANGAN JATIBARANG PERTAMINA DO HULU CIREBON

Oleh :

P. Subiatmono*, Irwan Yulianto** dan Kennedy*

* UPN “Veteran” Yogyakarta

** Pertamina DO Hulu Cirebon

ABSTRAK

Pada pemboran undebalanced, tekanan hidrostatik lumpur pemboran diatur agar dibawah tekanan formasi dibagian open hole sumur. Hal ini merupakan kebalikan dari pemboran overbalanced. Berdasarkan data-data geologi dan reservoir, formasi Vulkanik Jatibarang terdiri dari rekahan-rekahan alami dan mempunyai tekanan yang sudah turun (*depleted*) dari 0,438 psi/ft menjadi 0,287 psi/ft. Metoda pemboran underbalanced yang dipakai adalah gasified liquid drilling atau aerated drilling. Lumpur dasar yang digunakan adalah air tawar dan gas yang digunakan adalah nitrogen. Lumpur dasar dan nitrogen dicampurkan di permukaan sebelum masuk kerangkaian drillstring dan teknik ini disebut drillstring injection, underbalanced drawdown berkisar antara 250-500 psi

1. PENDAHULUAN

Teknologi pemboran underbalanced bukan merupakan hal yang baru, karena sudah dilakukan sejak tahun 50-an. Sedangkan berdasarkan data-data pemboran, pemboran konvensional (*overbalanced*) yang dilakukan pada formasi Vulkanik Jatibarang selalu mengalami masalah hilang sirkulasi dan pipa terjepit.

2. STUDI PUSTAKA

2.1 Definisi

Menurut API RP 53³⁾ dalam *draft* bagian 13, “*Underbalanced drilling* adalah pelaksanaan operasi pemboran yang mana diijinkannya fluida formasi masuk ke lubang bor, disirkulasikan dan dikontrol di permukaan”. Sedangkan menurut *Energy Resources Conservation Board (ERCB)*⁵⁾ : “UBD adalah tekanan hidrostatik fluida pemboran diusahakan di bawah tekanan pori formasi yang sedang dibor. Keadaan ini dapat dilakukan dengan menambahkan gas seperti udara atau nitrogen ke dalam fasa cair fluida pemboran”. Hal inilah yang akan menyebabkan masuknya fluida formasi yang harus disirkulasikan dan dikontrol di permukaan. Berdasarkan definisi tersebut maka fluida pemboran tidak akan dapat memasuki formasi dan tidak akan terjadi kehilangan sirkulasi.

2.2. Teknik Pemboran Underbalanced

Fungsi utama dari sirkulasi fluida pemboran *underbalanced*^{2,14)} adalah untuk mengeluarkan serbuk bor dari lubang bor. Ada banyak teknik pemboran *underbalanced* yaitu *dry air drilling, nitrogen drilling, natural gas drilling, mist drilling, stable foam drilling, stiff foam drilling, gasified*

liquids, flowdrilling, mudcap drilling, snub drilling, dan closed systems. Masing-masing teknik juga membutuhkan peralatan dan operasional yang berbeda. Pada subbab ini hanya akan diuraikan mengenai salah satu teknik pemboran *underbalanced* yaitu *gasified liquid (aerated mud drilling)*.

2.3. Gasified Liquid Drilling (Pemboran Aerasi)^{14,15)}

Fluida pemboran aerasi terdiri dari fasa gas yang diinjeksikan (dicampur) ke dalam fasa lumpur dasar (*oil base-mud atau water base-mud*) dimana fraksi fasa cairan lebih dari 25 % dan lumpur aerasi ini mempunyai densitas efektif antara 4-7 ppg. Pengaturan tekanan sirkulasi dapat dilakukan dengan mengatur laju (*rate*) gas injeksi dan laju lumpur yang dipompakan. Biasanya perbedaan tekanan antara tekanan hidrostatik lumpur aerasi di lubang bor dengan tekanan pori formasi berkisar antara 200-500 psi¹⁴⁾ (tekanan *underbalanced*). Tidak seperti teknik pemboran *underbalanced* lainnya, fasa cairan fluida pemboran aerasi dapat digunakan kembali setelah sirkulasi dan kembali ke permukaan.

2.3.1. Komponen Fluida Pemboran Aerasi.

Fluida pemboran aerasi terdiri dari dua fasa, yaitu fasa cairan sebagai lumpur dasar yaitu air atau minyak dan Nitrogen dengan kadar 92-99,5 % (oksigen = 0,5-8 %) biasanya lebih sering digunakan sebagai fasa gas yang digunakan untuk mengurangi densitas lumpur dasar.

2.4. Peralatan Yang Digunakan

Pada dasarnya peralatan yang digunakan pada pemboran aerasi hampir sama dengan peralatan pada pemboran *overbalanced*.

- Rotating Blow Out Preventer (RBOP)
 - . Rotating Control Head (RCH) Bowl
 - . Rotating Control Head (RCH) Bearing Assembly
- Kompresor
- Nitrogen Processing/Membrane Unit (NPU/NMU)
- Booster
- Separator
- Float Valve
- Choke Manifold

2.5. Perhitungan Lumpur Aerasi

Lumpur aerasi (*gasified liquid drilling*) merupakan lumpur pemboran yang memberikan kondisi *underbalanced* yang terdiri dari fasa gas dan fasa cairan (< 25 %). Densitas lumpur aerasi berkisar antara 4,0 - 6,95 ppg.

2.5.1. Volume Gas Injeksi

Jika 1 scf gas diinjeksikan dari permukaan, maka pada suatu kedalaman dengan tekanan dan temperatur tertentu volume gas tersebut akan menjadi :

$$V_{gp} = V_{gs} \left(\frac{T_2 \cdot P_1}{T_1 \cdot P_2} \right) \dots\dots\dots(1)$$

dimana :

- V_{gp} = volume gas pada kedalaman (D), cuft
- V_{gs} = volume gas permukaan (s), scf
- T_1 = temperatur permukaan (s), °R
- T_2 = temperatur kedalaman (d), °R
 - = { (d/2) x ΔT } + T₁
- P_1 = tekanan permukaan, psia
- P_2 = tekanan kedalaman, psi
 - = { (d x ΔP) + P₁ } / 2
- ΔT = gradient temperatur, °F/100 ft
- ΔP = gradient tekanan, psi/ft

Jika gravity gas (S) = 1, maka densitas gas (ρ_{gs}) pada kondisi permukaan sebesar :

$$\rho_{gs} = \frac{2,703 \times S \times P_1}{T_1} \dots\dots\dots(2)$$

Maka besarnya densitas gas (ρ_{gp}) pada kedalaman suatu kedalaman adalah sebesar :

$$\rho_{gp} = \rho_{gs} \left(\frac{T_2 \cdot P_1}{T_1 \cdot P_2} \right) \dots\dots\dots(3)$$

Dengan demikian volume gas yang diinjeksikan di permukaan dapat dihitung :

$$Q_{gp} = \frac{(\rho_l \cdot Q_l) - (\rho_A \cdot Q_l)}{(\rho_A - \rho_{gp})} \dots\dots\dots(4)$$

dimana :

- ρ_A = densitas lumpur aerasi, ppg
 - Q_A = laju volumetrik gas injeksi, gpm
 - ρ_l = densitas lumpur dasar, ppg
 - Q_l = laju alir lumpur dasar, gpm
 - Q_{gp} = laju volumetric gas injeksi pada kondisi kedalaman, gpm
- Laju volumetrik gas injeksi di permukaan dengan persamaan :

$$Q_{qs} = Q_{gp} \left(\frac{T_1 \cdot P_2}{T_2 \cdot P_1} \right), \text{scfm} \dots\dots\dots(5)$$

2.5.2. Fraksi Cairan Dalam Lumpur Aerasi¹⁴⁾

Berdasarkan persamaan-persamaan di atas maka fraksi volume gas dalam lumpur aerasi akan berkurang di dalam *drillstring* dengan semakin bertambahnya kedalaman

$$F_{lp} = \frac{F_{lo}}{\left\{ F_{lo} + (1 - F_{lo}) \left(\frac{P}{P_o} \right) \right\}} \dots\dots\dots(6)$$

$$F_{gp} = \frac{F_{go}}{\left\{ F_{go} + (1 - F_{go}) \times \left(\frac{P}{P_o} \right) \right\}} \dots\dots\dots(7)$$

$$F_{gp} + F_{lp} = 1 \dots\dots\dots(8)$$

dimana :

- F_{lo} = fraksi lumpur dasar kondisi permukaan, %
- F_{go} = fraksi gas pada kondisi permukaan, %

F_{lp} = fraksi lumpur dasar pada kondisi kedalaman, %

F_{gp} = fraksi gas pada kondisi kedalaman, %

V_{go} = volume gas kondisi permukaan, cfm

V_{gp} = volume gas kondisi kedalaman, cfm

V_t = total volume, cfm

2.5.3. Viskositas Lumpur Aerasi

Untuk menentukan besarnya viskositas fluida dua fasa pada suatu setiap kedalaman

$$\mu_A = (F_{gp} \cdot \mu_{gp}) + (1 - F_{gp}) \cdot \mu_l \dots\dots\dots(9)$$

dimana :

- μ_A = viskositas lumpur aerasi, cp
- μ_{gp} = viskositas gas pada kedalaman, cp
- μ_l = viskositas lumpur dasar, cp

2.5.4. Kecepatan dan Pola Aliran Lumpur Aerasi

Kecepatan lumpur aerasi dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan berikut ini :

dalam *drillstring* (V_p) :

$$V_p = \frac{Q_A}{\left(\frac{\pi}{4} \right) \cdot D_{ip}^2}, \text{ fpm} \dots\dots\dots(10)$$

dalam annulus (V_{ann}) :

$$V_{ann} = \frac{Q_A}{\left(\frac{\pi}{4} \right) \cdot (D_h^2 - D_{op}^2)}, \text{ fpm} \dots\dots\dots(11)$$

dimana :

Q_A = laju alir lumpur aerasi, cfm

D = diameter, inci (= 0,0833 ft)

Pola aliran menggunakan Bilangan Reynold :

untuk aliran dalam *drillstring* :

$$N_{Re} = \frac{15,47 \cdot D_{ip} \cdot \rho_A \cdot V_p}{\mu_A} \dots\dots\dots(12)$$

untuk aliran di annulus :

$$N_{Re} = \frac{15,47 \cdot D_{ep} \cdot \rho_A \cdot V_{ann}}{\mu_A} \dots\dots\dots(13)$$

D_{ep} , in = diameter hidrolika annulus

2.5.5. Metode Poettmann dan Bergman¹⁴⁾

Selain dengan cara di atas, penentuan volume gas yang diinjeksikan dapat dilakukan dengan menggunakan Metode Poettmann dan Bergman dengan grafik.

Secara matematis penentuan volume gas yang diinjeksikan dengan Metode Poettman dan Bergman:

$$S = \frac{42 \cdot D \cdot \rho_l - 808 \cdot (P_A - P_s)}{4,071 \cdot T_2 \cdot \ln \left(\frac{P_A}{P_s} \right) - 0,0764 \cdot D}$$

dimana :

S = volume udara (scf) yang diinjeksikan per barrel lumpur dasar

D = kedalaman, ft

2.5.6. Pengangkatan Serbuk Bor

Konsentrasi kritis serbuk bor (C_c) di dalam lubang bor yang diijinkan adalah tidak lebih dari 5 % . Kcepatan kritis (V_c) untuk mengeluarkan sebuk bor dari lubang:

$$V_c = \frac{ROP}{60 \cdot C_c} \text{ , fpm} \dots\dots\dots(14)$$

Kecepatan terminal serbuk bor (V_t) untuk pola aliran laminar, transisi dan turbulen yang melalui serbuk bor.

dalam aliran laminar :

$$V_t = 4980 \cdot dc \cdot \left(\frac{\rho_c - \rho_A}{\mu_A} \right) \dots\dots\dots(15)$$

dalam aliran transisi :

$$V_t = 175 \cdot dc \cdot \left[\frac{(\rho_c - \rho_A)^{2/3}}{(\rho_A \cdot \mu_A)^{1/3}} \right] \dots\dots\dots(16)$$

dalam aliran turbulen :

$$V_t = 92,6 \sqrt{dc \cdot \left(\frac{\rho_c - \rho_A}{\rho_A} \right)} \dots\dots\dots(17)$$

Bilangan Reynold untuk serbuk bor :

$$N_{Re_c} = \frac{15,47 \cdot \rho_A \cdot V_t \cdot dc}{\mu_A} \dots\dots\dots(18)$$

Dengan demikian pembersihan lubang bor akan cukup baik jika kecepatan lumpur aerasi di annulus (V_{ann}) melebihi kumulatif kecepatan kritis (V_c) dan kecepatan terminal (V_t) serbuk bor.

$$V_{ann} > V_c + V_t$$

Kecepatan terminal serbuk bor pada lintasan vertikal berbeda dengan kecepatan terminal pada lintasa berarah. Rudy dan kawan-kawan membuat suatu persamaan untuk kecepatan minimum lumpur di annulus untuk mengangkat serbuk bor yang terdapat dalam lubang bor pada lintasan berarah.

3. STUDI KASUS

Sampai pada bulan Februari 1999 pada lapangan Jatibarang (JTB) sudah ada sekitar 161 buah sumur bor. Pada saat ini telah sekitar 4 sumur yang dilakukan dengan menggunakan teknologi UBD.

3.1 Alasan Penerapan Pemboran Underbalanced

Formasi vulkanik Jatibarang mempunyai tekanan yang sudah turun (*depleted*). Berdasarkan sumur referensi JTB-88, perkiraan tekanan formasi pada kedalaman 1880 meter kedalaman tegak adalah sebesar 127 ksc atau sebesar 1806 psi, (5,63 ppG).

3.2 Pengamatan di Lapangan.

Pemboran *underbalanced* dilakukan setelah memasuki *top* vulkanik (1928 mku/ 1890 mkt). Pemasangan *casing liner* 7” dilakukan sampai pada kedalaman 1930 mku/ 1897 mkt. Setelah itu dengan menggunakan bit 6” dilakukan pemboran *underbalanced (openhole)* sampai pada kedalaman 2448 mkt / 2058 mku.

3.3 Peralatan Yang Digunakan

Peralatan yang digunakan dilapangan pada dasarnya hampir sama pada pemboran *overbalanced* kecuali pada unit injeksi gas dan penambahan RBOP (*Rotating Blow Out Preventer*) tipe *Williams 7100*.

Untuk pemutar *drillstring* tidak digunakan *rotary table*, melainkan *top drive*. Dengan menggunakan *top drive* dapat dilakukan operasi keluar-masuk rangkaian sepanjang 3 *joint* (1 *stand*). Dengan demikian *top drive* berfungsi sebagai sebagai alat pengganti *traveller hook*, alat angkat, alat putar dan sebagai tempat awal sirkulasi menuju *drillstring* karena *swivel* terletak pada *top drive* ini. RBOP ini sanggup menahan tekanan balik sampai sebesar 2500 psi ketika beroperasi.

Unit injeksi gas terdiri dari dua unit kompresor yang akan memasok udara bertekanan 200 psi ke NPU (*Nitrogen Processing Unit*). Selanjutnya di NPU ini dihasilkan gas Nitrogen dengan proses pemurnian (*purifier*) hingga didapat Nitrogen berkadar 95 %. Sebenarnya yang diinginkan adalah Nitrogen dengan kadar 97% untuk menghindari resiko korosi yang lebih besar.

Selanjutnya Nitrogen yang dihasilkan oleh NPU dialirkan ke *booster (low booster)* yang akan menaikkan tekanan sampai sebesar yang diinginkan (maksimum 1500 psi).

Sebelum menuju ke *swivel*, gas bercampur dengan lumpur dasar (air tawar) setelah itu akan masuk bersama-sama ke *drillstring*. Lumpur akan bersirkulasi terus sampai ke permukaan kembali menuju ke *manifold* dan langsung ke separator. Untuk mencegah aliran balik fluida ke *drillstring*, maka digunakan *float valve*.

Separator yang digunakan adalah separator empat fasa untuk memisahkan gas, air, minyak dan serbuk bor.. Separator terdiri dari empat kompartemen yang dapat bekerja sampai pada tekanan sampai 200 psi.

3.4 Lumpur Dasar Yang Digunakan

Lumpur dasar yang digunakan adalah air tawar dengan berat 8.33 ppg dan viskositas funnel sebesar 28 MF detik. Ke dalam air ini ditambahkan beberapa zat kimia seperti *caustic soda* untuk menjaga pH lumpur 11 dan penambahan *corrosion inhibitor*.

3.5 Hasil Pelaksanaan

Pada saat pelaksanaan pemboran *underbalanced* ini, laju pemboran rata-rata (ROP) sebesar 8 min/m. Pada kedalaman 1999 m ada indikasi minyak selama 30 menit kemudian hilang dan pada kedalaman 2048 mku ada *trace burnable gas*. Pada kedalaman 2118 mku tidak ada aliran balik (*partial lost*) lumpur dari lubang bor, setelah itu diadakan sirkulasi sampai didapat aliran balik.

4. DISKUSI

Berdasarkan data reservoir Lapangan Jatibarang, tekanan pada formasi Vulkanik Jatibarang telah turun (*depleted*) menjadi sebesar 0,287 psi/ft (tahun 2000) dari 0,438 psi/ft (tahun 1973). Berdasarkan referensi dari sumur JTB-88, perkiraan tekanan formasi sumur pada kedalaman 1880 mkt adalah sebesar 1806 psi (5,63 ppg).

Volume nitrogen berpengaruh terhadap kondisi temperatur dan tekanan pada suatu kedalaman. Dengan demikian fraksi nitrogen dan lumpur dasar akan berubah terhadap kedalaman. Perubahan fraksi ini akan mempengaruhi perubahan densitas dan viskositas lumpur aerasi pada setiap kedalaman, gambar 1 s/d 4. Untuk perhitungan laju volumetrik gas injeksi teoritis, pada penelitian ini menggunakan metode *Gas Law*, karena memberikan hasil perhitungan lebih mendekati dengan kenyataan di lapangan ($\pm 18,6\%$) dari pada menggunakan metode Poettman-Bergmann ($\pm 63,2\%$).lihat tabel 1.

Pada pemboran kedalaman 1978 mkt, densitas lumpur aerasi yang diinginkan adalah sebesar 5,04 ppg. Dengan laju injeksi lumpur dasar (air = 8,33 ppg) sebesar 150 gpm, maka laju volumetrik nitrogen yang dibutuhkan untuk menurunkan densitas lumpur dasar sebesar densitas lumpur aerasi yang diinginkan adalah sebesar 13,1 cfm. Sedangkan injeksi nitrogen dari permukaan sebesar 779 scfm. Fraksi lumpur dasar di permukaan adalah sebesar 2,51 % sedangkan fraksi nitrogen adalah sebesar 97,49 %. Karena volume nitrogen berpengaruh terhadap kondisi tekanan dan temperatur pada setiap kedalaman, maka fraksi lumpur dasar pada kedalaman 1978 mkt adalah sebesar 77,03 % sedangkan fraksi gas menjadi sebesar 22,97 %. Perubahan fraksi masing-masing fasa tersebutlah yang menurunkan densitas lumpur dasar dari 8,33 ppg menjadi 5,04 ppg (lumpur aerasi). Hal yang sama juga terjadi pada viskositas lumpur aerasi, karena fraksi nitrogen sangat besar di permukaan, maka viskositas lumpur aerasi menjadi kecil (0,082 cp), namun ketika sampai pada kedalaman 1978 mkt karena fraksi gas berkurang maka viskositas lumpur aerasi naik menjadi 0,77 cp. Hal yang sebaliknya terjadi ketika lumpur aerasi bersirkulasi di annulus.

Pada pemboran kedalaman 1978 mkt, kecepatan minimal lumpur aerasi yang dibutuhkan untuk mengangkat serbuk bor keluar dari lubang bor adalah sebesar 88,52 fpm. Sedangkan kecepatan lumpur aerasi minimal yang terjadi adalah sebesar 91,53 fpm dengan pola aliran turbulen sepanjang annulus. Hal ini berarti bahwa $V_{ann} > V_{min}$. Dengan demikian pengangkatan serbuk bor sepanjang annulus sudah baik. Maka, kemungkinan terjadinya masalah hilang sirkulasi dan pipa terjepit jika di tinjau dari pembersihan lubang bor tidak akan terjadi.

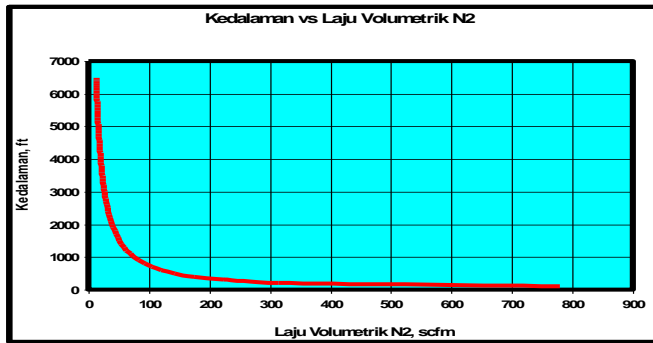
Secara teoritis, desain program sirkulasi yang dilakukan pada kedalaman 2003 mkt (2164 mku) menunjukkan bahwa operasional pemboran aerasi tidak akan menemui hambatan jika laju alir lumpur dasar yang dipompakan sebesar 150 gpm. Dengan menggunakan laju alir lumpur dasar sebesar 150 gpm, tiga kriteria desain telah terpenuhi yaitu dapat memberikan tekanan *underbalanced* yang diinginkan (960 scfm), memberikan pembersihan lubang bor yang cukup (950 scfm)

5. KESIMPULAN

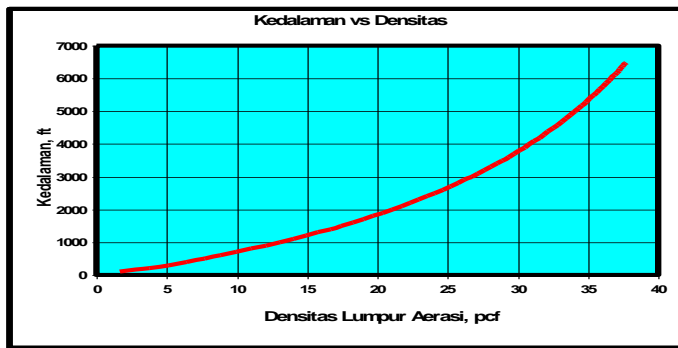
1. Formasi Vulkanik Jatibarang merupakan formasi yang mempunyai rekahan dan tekanannya telah turun (*depleted*) dari 0,438 ps/ft menjadi 0,287 psi/ft sehingga merupakan kandidat yang cocok untuk penerapan pemboran *underbalanced*.
2. Perubahan fraksi lumpur dasar dan nitrogen akan mempengaruhi densitas dan viskositas lumpur aerasi pada setiap kedalaman, dimana fraksi lumpur dasar untuk lumpur aerasi lebih dari 25 persen.
3. Ditinjau dari pengangkatan serbuk bor, untuk menghindari problem hilang sirkulasi dan pipa terjepit, maka kecepatan minimal lumpur aerasi yang diperlukan untuk pengangkatan serbuk bor yang baik pada kedalaman 1930 mku – 2164 mku adalah sebesar 100 fpm.
4. Agar pembersihan lubang bor baik dan masalah hilang sirkulasi tidak terjadi, maka Δ_{UB} dapat di ubah menjadi 350 psi dan ini memberikan densitas lumpur aerasi sebesar 4,61 ppg yang selanjutnya akan memberikan tekanan lubang bor yang masih mampu ditahan oleh formasi dan meningkatkan kecepatan lumpur aerasi di annulus.

DAFTAR PUSTAKA

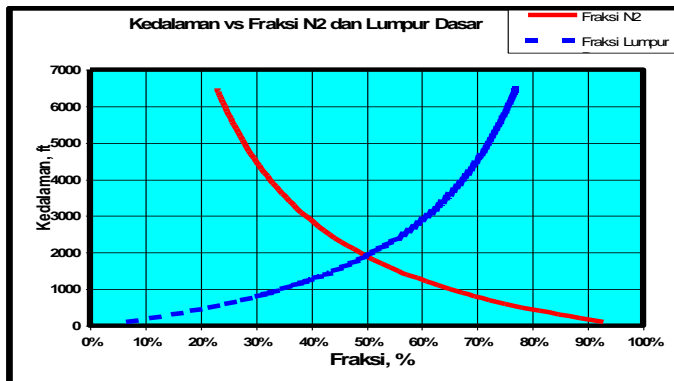
1. Adam T. Bourgoyne Jr.(1986), "Applied Drilling Engineering", First Printing, Society of Petroleum Engineering, Richardson, TX.
2. Azar J.J., Ph.D.(1998), "Mud Related Drilling Problems and Solutions", Ten Day Course, Petranusa, Jakarta.
3. Azar, J.J., Prof.(1999), "Underbalanced Drilling Technology", Course, Pertamina, Jakarta.
4. Angel, R.R.(1985), "Volume Requirements for Air or Gas Drilling", Gulf Publishing Company, Book Division, Fourth Printing.
5. Bennion D.B., Lunan B., Saponja S.(1988), "Underbalanced Drilling and Completion Operations to Minimize Formation Damage – Reservoir Screening Criteria for Optimum Application", The Journal of Canadian Petroleum Technology, vol 37, no.9,p36-50
6. Bennion Brant, Crouse C Philips, Lunan Brian.(1997), "Underbalanced Drilling Operations Technology", Short Course, Book I and Book II Calgary, Alberta, Canada
7. Bennion D.B., Thomas F.B., "Underbalanced Drilling of Horizontal Wells : Does It Really Eliminate Formation Damage ?", SPE no 27352
8. Bennion D.B., Thomas F.B., Bietz R.F., Bennion D.W.(1998), "Underbalanced Drilling : Praises and Perils", SPE Drilling and Completion, p214-222.
9. Bieseman, Taco, "An Introduction to Underbalanced Drilling" Shell Research, Shell Petroleum Development Company.
10. Cagnolatti, Eduardo, Curtis Fred., "Using Underbalance Technology to Solve Traditional Drilling Problems in Argentina", services especialies San Antonio S.A., Frontier Engineering and Consulting Ltd.
11. Crerar Paul, "Underbalanced Re-Entry Horizontal Drilling In The Wellton Field Bascal Succession Reservoir Onshore UK" Candecca Resources Limited.
12. Doane R.D., Bennion D.B., "Successful Drilling of an Underbalanced Horizontal Well in the Rigel Halfway Pool Laboratory Screening And Field Results", SPE no 37065.
13. Gas Research Institute.(1997), "Underbalanced Drilling Short Course Manual", GRI, GRI-97/0236.1a, Chicago, Illinois.
14. Gas Research Institute.(1997), "Underbalanced Drilling Manual", GRI, GRI-97/0236, Chicago, Illinois.
15. <http://www.iadc.org>
16. <http://www.hycal.com>
17. Lyons C. Williams,(1984) "Air and Gas Drilling Manual" Gulf Publishing Company, Houston, Texas.
18. Moore, Preston L(1974),,"Drilling Practice Manual", The Petroleum Publishing Company, Tulsa, Oklahoma
19. Mullane T.J., Churcher, "Benefits of Underbalanced Drilling from the Weyburn and Westeros Fields, Western Canada", Calgary, Alberta, Canada.
20. Rogers, Walters F.(1963), "Composition And Properties of Oil Well Drillings Fluids", Gulf Publishing Company, Third Edition, Houston, Texas
21. Singh M. Madan, Goodwin J. Robert,"Mechanism of Drilling Wells With Air As The Drilling Fluids", The Pennsylvania State University and Gulf Research and Development Company.
22. Software, "Mudlite : Air, Mist, Foam Hydraulics Model", Versi 2.0, Maurer Engineering Inc, 1997
23. _____,"Ulasan Teknis / Cara Melaksanakan Pekerjaan Pemboran Underbalanced", PT. Weatherford Indonesia, Cirebon, 2001.
24. _____,"Underbalanced Drilling", A Course In Advanced Underbalanced Drilling Version 1.0, Blade Energy Partners, 2001
25. _____,"Well File", Pertamina DOH Cirebon, Mundu, 2001



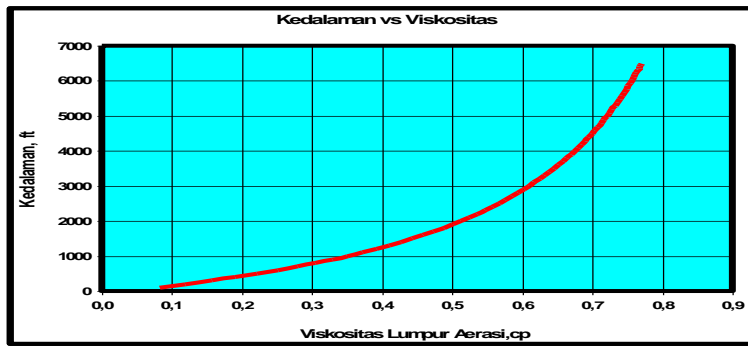
Gambar 1. : Grafik Hubungan Kedalaman Terhadap Laju Volumetrik Nitrogen



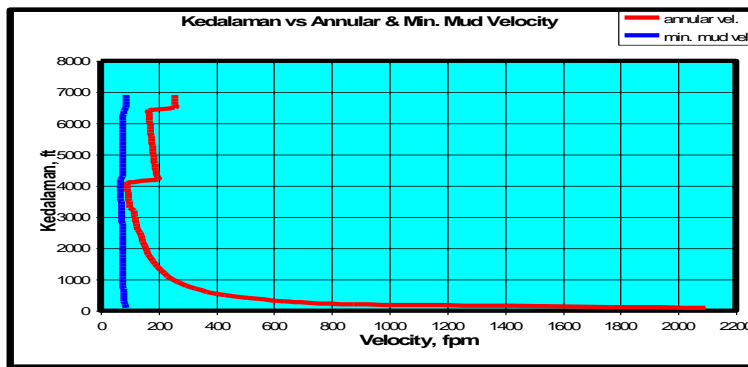
Gambar 2. : Grafik Hubungan Kedalaman Terhadap Densitas Lumpur Aerasi.



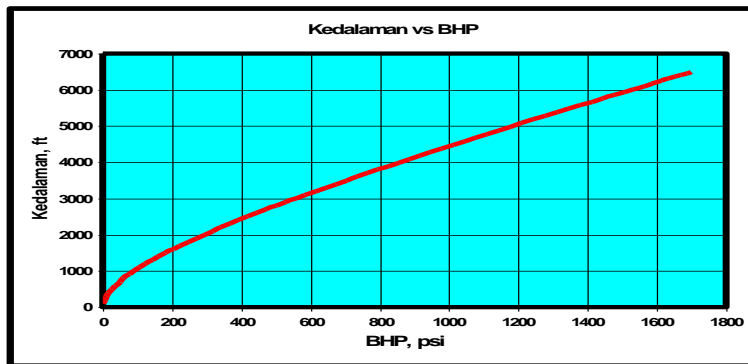
Gambar 3. : Grafik Hubungan Kedalaman Terhadap Fraksi Nitrogen dan Fraksi Lumpur Dasar



Gambar 4. : Grafik Hubungan Kedalaman Terhadap Viskositas Lumpur Aerasi



Gambar 5. : Grafik Hubungan Kedalaman Terhadap Kecepatan Lumpur Aerasi di Annulus dan Kecepatan Minimal Lumpur Aerasi Yang Dibutuhkan Untuk Pengangkatan Serbuk Bor Yang Baik



Gambar 4.6. : Grafik Hubungan Kedalaman Terhadap BHP

Tabel 1 : Perbandingan Antara Metode Poettman-Bergmann dengan Metode Gas Law Untuk Volume Gas Injeksi

Perbandingan metode dan % error						
mkt, m	gpm	aktual, scfm	P & B, scfm	% error, %	Gas Law, scfm	% error, %
1902	155	899	320	64,4	787	12,5
1921	195	922	405	56,1	995	7,9
1938	195	902	406	55,0	1001	10,9
1953	191	907	399	56,0	985	8,5
1965	191	894	400	55,3	989	10,6
1976	167	1024	351	65,7	867	15,3
1986	113	1095	238	78,3	589	46,2
1995	121	1064	256	74,6	632	37,2
		rata-rata		63,2		18,6

- Berdasarkan tabulasi di atas, maka perhitungan teoritis untuk volume gas yang diinjeksikan di permukaan yang mendekati dengan aplikasi di lapangan adalah metode Gas Law.

Tabel 2 : Densitas Lumpur Pemboran¹⁴⁾

Deskripsi	Fraksi Cairan (%)	Densitas (ppg)
Gas	-	0,01 – 0,1
Mist	< 2,5	0,1 – 0,3
Foam	2,5 – 25	0,3 – 3,54
		3,5 – 6,95
Gasified / Aerated	> 25	4,0 – 6,95
Liquid	100	6,95 – 19,0