

ANALISIS PERBANDINGAN EFEKTIFITAS MODEL FLUIDA BINGHAM DAN POWER LAW DALAM OPTIMASI FLOW RATE POMPA DAN PENGANGKATAN CUTTING

Ganjar Hermadi ST. MT *)

ABSTRAK

Operasi pemboran pada suatu sumur tidak akan lepas dari peranan fluida atau lumpur pemboran sebagai bagian penting dari sistem sirkulasi. Fungsi lumpur pemboran sangat luas dan salah satunya adalah membersihkan serpih pemboran (cutting) hasil penggerusan dari pahat bor (bit). Cutting yang tidak terangkat ke permukaan dengan baik akan mengganggu operasi pemboran dan akan menyebabkan masalah pemboran, seperti penurunan laju penembusan dan terjepitnya rangkaian pipa pemboran.

Selain sifat-sifat dari lumpur pemboran yang harus disesuaikan dengan kondisi formasi pada sumur yang dibor, penentuan laju alir (flow rate) dari lumpur pemboran yang dipompakan pun akan sangat berpengaruh dalam pengangkatan cutting dari dasar lubang sumur ke permukaan. Semakin besar flow rate pompa yang digunakan maka kecepatan lumpur pemboran akan semakin besar juga dalam mengangkat cutting ke permukaan. Dikarenakan cutting mempunyai berat tertentu, maka cutting mempunyai kecenderungan untuk jatuh ke dasar lubang sumur melawan kecepatan aliran lumpur pemboran yang disirkulasikan ke permukaan, yang disebut dengan kecepatan slip (slip velocity) dari cutting tersebut. Kecepatan yang mengimbangi kecenderungan jatuhnya cutting ke dasar lubang sumur adalah kecepatan angkat (lifting velocity) dari lumpur pemboran.

Dalam tulisan ini penulis melakukan analisis flow rate pompa yang sesuai untuk sumur pemboran terhadap kemampuan mengangkat cutting ke permukaan dengan memperhitungkan parameter-parameter hidrolika pada operasi pemboran tersebut. Dari hasil perhitungan dan analisis akan ditentukan tipe pompa dan flow rate yang sesuai untuk pengangkatan cutting pada sumur Z.

Kata kunci: flow rate pompa, pembersihan cutting

I. PENDAHULUAN

Salah satu fungsi penting dari fluida pemboran adalah mengangkat *cutting* pemboran ke permukaan. Selain dari sifat viskositas lumpur yang menyebabkan *cutting* tersebut terangkat, parameter kecepatan angkat (*lifting velocity*) dari lumpur juga sangat penting, di mana kecepatan angkat tersebut tidak akan lepas kaitannya dengan *flow rate* yang optimum dari pompa lumpur. Sehingga dengan *flow rate* optimum dari pompa dan pemilihan fluida pemboran yang tepat

akan menghasilkan operasi pemboran yang baik.

Pemilihan fluida pemboran bisa dimodelkan dengan model fluida yang mengalir dalam pipa, yang pertama kali diteliti oleh Reynold. Fluida pemboran termasuk kedalam fluida non-Newtonian di mana nilai viskositasnya tidak dapat diwakili oleh nilai viskositas tunggal seperti pada fluida Newtonian. Model Bingham dan Power law merupakan fluida non-Newtonian yang dapat

mewakili karakteristik dari fluida pemboran.

Analisis perbandingan dari kedua model fluida tersebut, Bingham dan Power law akan dilakukan dengan melibatkan optimasi dari *flow rate* pompa yang dihitung dengan memasukan parameter kehilangan tekanan pada sumur dan akan dilihat efektifitasnya dalam pengangkatan *cutting* di anulus. Sensitivitas dari kedua model fluida tersebut akan melibatkan pengaruh diameter dan densitas *cutting* yang melewati annulus.

Perhitungan akan dilakukan dengan menggunakan data sumur Z yang merupakan sumur vertikal dengan kedalaman mencapai 3250 m atau 10663 ft. Pemodelan densitas *cutting* akan disesuaikan dengan densitas lapisan batuan yang ada pada data geologi sumur Z.

II. HIDROLIKA PEMBORAN

2.1 Fungsi fluida pemboran

Fluida pemboran disirkulasikan atau dipompa dari permukaan, turun melalui *drill string*, melewati bit, dan kembali ke permukaan melewati annulus. Berikut adalah fungsi dari fluida pemboran pada operasi pemboran :

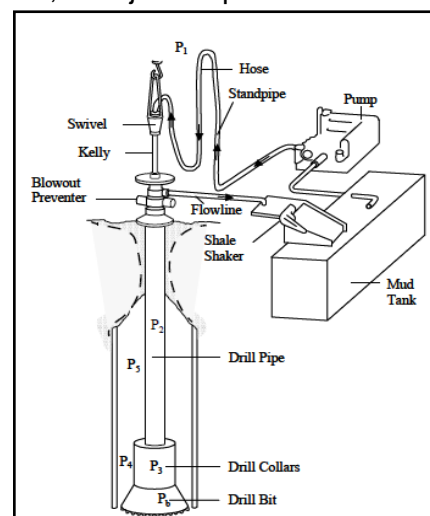
- Menyeimbangkan tekanan formasi sebagai *Well Control* (kendali sumur)
- Membawa *cutting* yang terbentuk dari sumur bor dan serpihan lainnya ke permukaan
- Membersihkan serpihan batuan (*cutting*) dibawah *bit*
- Menjaga *cutting* pemboran tidak turun kembali kedasar sumur ketika sirkulasi pemboran dihentikan
- Mentransmisi tenaga hidrolik pada bit
- Menjaga kestabilan formasi (lubang sumur)
- Mendinginkan dan melumasi *bit* dan *drillstring*

- Memfasilitasi *logging* data
Fungsi-fungsi fluida pemboran diatas dikendalikan oleh lebih dari satu sifat lumpur pemboran, seperti densitas, viskositas, *filtration loss*, kandungan solid dan lainnya.

2.2. Sistem hidrolika pengeboran

Tenaga hidrolik yang dikeluarkan ketika mensirkulasikan fluida pemboran adalah fungsi langsung dari kehilangan tekanan dan laju aliran melalui sistem. Karena laju aliran melalui semua bagian dari sistem sama, perhatian umumnya terfokus pada kehilangan tekanan pada setiap bagian dari sistem.

Penyemburan fluida pemboran melalui nozzle pada bit juga mengakibatkan hilangnya tekanan yang signifikan namun tidak melakukan fungsi yang berguna, karena hanya membantu untuk membersihkan *cutting* pemboran dari permukaan bit saja. Oleh karena itu perlu untuk mengoptimalkan kehilangan tekanan melalui nozzle (untuk pembersihan *cutting* pada permukaan bit) dan meminimalkan kehilangan tekanan di *drillstring* dan annulus. Kehilangan tekanan pada *drillstring* yang umum, untuk laju alir tertentu, ditunjukkan pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Kehilangan tekanan pada *drillstring*, nozzle bit dan annulus (Rabia, Hussain; 1989)

Kehilangan tekanan akibat sirkulasi dan laju aliran fluida pemboran melalui sistem adalah sama dengan tenaga hidrolis (*hydraulic power*) dari pompa lumpur yang harus dihasilkan. Satuan daya yang sering digunakan dalam operasi pemboran adalah *horsepower*, oleh karena itu tenaga hidrolis yang dihasilkan oleh pompa lumpur umumnya disebut sebagai *hydraulic horsepower (HHP)*. *Hydraulic horsepower (HHP)* yang diberikan oleh pompa dapat ditulis kedalam persamaan sebagai berikut:

$$HHP_t = \frac{P_t \times Q}{1714} \dots\dots\dots (1)$$

dimana:

P_t = Tekanan total (psi)

Q = laju alir lumpur (gpm)

Mengoptimalkan penggunaan *hydraulic horsepower* yang dihasilkan oleh pompa lumpur membutuhkan kemampuan untuk menghitung kehilangan tekanan di *drillstring*, di bit nozel dan di anulus antara *drillstring* dan lubang sumur. Faktor utama yang mempengaruhi besarnya kehilangan tekanan dalam sistem tersebut adalah:

- Geometri sistem sirkulasi (misalnya ID *drillpipe*, panjang *drillpipe*)
- Laju alir yang melewati sistem
- Regime aliran lumpur (laminar / turbulen)
- Sifat reologi dari fluida sirkulasi

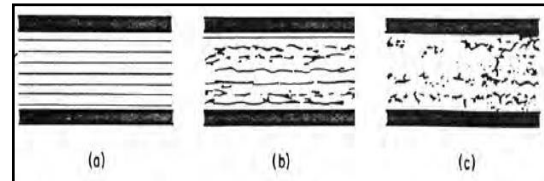
2.3 Model dan pola aliran

Penelitian pertama tentang pola aliran fluida dalam pipa dan tabung dilakukan oleh Osborne Reynolds. Dapat diidentifikasi dua jenis pola aliran utama (Gambar 2.2)

Aliran Laminar: Pada jenis aliran ini, lapisan fluida bergerak dalam arus *streamline* atau *laminae*. Tidak ada campuran mikroskopik atau makroskopik dari lapisan aliran. Sistem aliran laminar

umumnya secara grafis diwakili oleh arus lurus.

Aliran Turbulen: Dalam aliran turbulen ada gerakan acak yang tidak teratur dari fluida dalam arah melintang dengan aliran utama. Gerakan ini, fluktuasi yang tidak teratur dapat dianggap sebagai tumpang tindih pada gerakan rata-rata fluida.



Gambar 2.2 Pola aliran dalam pipa:
(a) laminar; (b) transisi; (c) turbulen
(Bourgoyne Jr., Adam T., dkk, 1991)

Batasan laminar dan turbulent

Reynolds menunjukkan bahwa ketika mensirkulasikan fluida Newtonian melalui pipa, timbulnya turbulensi tergantung pada variabel-variabel berikut:

- Diameter pipa, d
- Densitas fluida, ρ
- Viskositas fluida, μ
- Kecepatan aliran rata-rata, v

Ia juga menemukan bahwa terjadinya turbulensi terjadi bila kombinasi variabel-variabel tersebut melebihi nilai 2100.

Penelitian Reynold ini sangat penting karena berarti terjadinya turbulensi dapat diprediksi untuk pipa berbagai ukuran, dan densitas atau viskositas fluida, mengalir dengan laju alir tertentu melalui pipa. Persamaan tidak berdimensi dan dikenal sebagai bilangan Reynolds adalah:

$$N_{Re} = \frac{928 \rho v d}{\mu} \dots\dots\dots (2)$$

di mana:

ρ = densitas fluida, ppg

v = kecepatan rata-rata fluida, ft/s

d = diameter pipa, in

μ = viskositas fluida, cp

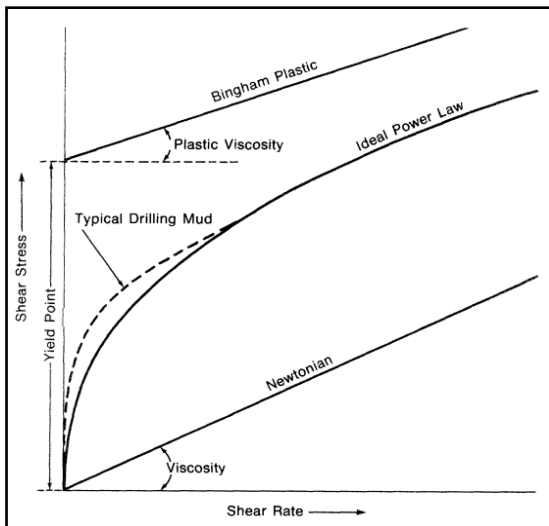
Tipe Fluida

Ada dua tipe dasar fluida, yaitu Newtonian dan non-Newtonian. Fluida Newtonian dicirikan oleh viskositas konstan pada suhu dan tekanan tertentu. Fluida Newtonian umumnya meliputi: air, diesel, gliserin dan *clear brine*

Fluida non-Newtonian memiliki viskositas yang bergantung pada laju geser yang diukur pada suhu dan tekanan tertentu. Contoh cairan non-Newtonian meliputi: fluida pengeboran pada umumnya dan *slurry semen*

Model reologi dari yang biasanya digunakan oleh industri perminyakan untuk menjelaskan fluida pemboran adalah:

- Model fluida Newtonian
- Model fluida non-Newtonian – Bingham plastic Power law



Gambar 2.3 Model rheologi dari berbagai tipe fluida (Darley, H. C. H. dan Gray, George R., 1988)

2.4 Kehilangan tekanan (*pressure loss*)

Setiap fluida yang mengalir dalam pipa akan kehilangan sebagian energinya, yang terserap akibat hilang karena

adanya gaya gesekan yang bekerja pada fluida tersebut. Gaya gesekan pada fluida:

- Gesekan internal karena viskositas fluida
- Gesekan eksternal karena kekasaran pipa

Hilangnya energi ini disebut sebagai kehilangan tekanan (*pressure drop* atau *loss*), dan dihitung berdasarkan perbedaan tekanan fluida tersebut diantara dua titik di pipa.

Seperti yang telah ditunjukkan pada Gambar 2.1 bahwa kehilangan tekanan terjadi di sepanjang sistem sirkulasi. Kehilangan tekanan terjadi pada :

1. Sambungan peralatan permukaan
2. Di dalam pipa termasuk *drillpipe* dan *drill collar*
3. Annulus antara lubang sumur dan *drillstring*
4. *Drill bit*

Persamaan kehilangan tekanan dipengaruhi oleh faktor-faktor sebagai berikut :

1. Reologi fluida
2. Tipe aliran (laminar atau turbulen)
3. Geometri lubang sumur dan pipa

Kehilangan tekanan di *surface connection*

Kehilangan tekanan pada sambungan peralatan permukaan terjadi di *standpipe*, *rotary hose*, *swivel* dan *kelly*. Persamaan umum berikut dapat digunakan untuk mengevaluasi kehilangan tekanan pada sambungan permukaan:

$$P_{sc} = E \times \rho^{0.8} \times Q^{1.8} \times PV^{0.2} \quad (3)$$

di mana

ρ = lumpur berat (ppg)

Q = Volume rate (gpm)

PV = plastik viskositas (cP)

E = konstanta yang tergantung pada jenis peralatan yang digunakan di permukaan

Dalam prakteknya, hanya ada empat jenis peralatan permukaan, masing-masing jenis ini ditandai dengan dimensi *standpipe*, *kelly*, *rotary hose* dan *swivel*. Tabel II.1 merangkum keempat tipe peralatan permukaan tersebut.

Tabel II.1 Nilai konstanta E untuk tiap tipe peralatan permukaan (Rabia, Hussain, 1989)

Surface equipment type	Value E	
	Imperial units	Metric units
1	2.5×10^{-4}	8.8×10^{-6}
2	9.6×10^{-5}	3.3×10^{-6}
3	5.3×10^{-5}	1.8×10^{-6}
4	4.2×10^{-5}	1.4×10^{-6}

Kehilangan tekanan dalam pipa dan annulus

Menghitung kehilangan tekanan di dalam *drillstring* dan di annulus, sebaiknya mempertimbangkan apakah aliran didalam pipa dan annulus tersebut laminar atau turbulen, dan memperhatikan juga model reologi yang dipilih, apakah Newtonian atau non-Newtonian.

Penentuan batasan laminar/turbulen

Sebuah kriteria turbulensi, dengan kata lain titik di mana perubahan aliran dari laminar menjadi turbulen, dibutuhkan untuk fluida non-Newtonian.

Penentuan apakah fluida laminar atau turbulen dapat menggunakan persamaan kecepatan rata-rata (*average velocity*) dan kecepatan kritis (*critical velocity*) dari fluida pemboran. Seperti yang telah disebutkan diatas, karena karena tidak adanya nilai viskositas tunggal maka yang berperan dalam persamaan penentuan batasan laminar/turbulen ini adalah *Plastic Viscosity* (PV) dan *Yield Point* (YP) dari fluida.

Persamaan kecepatan rata-rata fluida didalam pipa :

$$V' = \frac{24.5Q}{D^2} \quad (4)$$

di mana :

- V' = kecepatan rata-rata (ft/min)
- Q = flow rate lumpur (gpm)
- D = diameter dalam pipa (in)

Untuk kecepatan rata-rata fluida di annulus :

$$V' = \frac{24.5Q}{D_h^2 - OD^2} \quad (5)$$

dimana D_h dan OD adalah diameter dalam *casing/open hole* dan OD adalah diameter luar pipa

Persamaan kecepatan kritis fluida didalam pipa untuk fluida Bingham plastic :

$$V_c = \frac{97PV + 97\sqrt{PV^2 + 8.2\rho D^2 YP}}{\rho D} \quad (6)$$

di mana :

- V_c = kecepatan kritis fluida (ft/min)
- PV = *plastic viscosity* (cp)
- ρ = berat jenis lumpur (ppg)
- D = diameter dalam pipa (in)
- YP = *yield point* (lb/100 ft²)

Persamaan kecepatan kritis di annulus untuk fluida Bingham plastic :

$$V_c = \frac{97PV + 97\sqrt{PV^2 + 6.2\rho D_e^2 YP}}{\rho D_e} \quad (7)$$

di mana :

- V_c = kecepatan kritis fluida (ft/min)
- PV = *plastic viscosity* (cp)
- YP = *yield point* (lb/100 ft²)
- ρ = berat jenis lumpur (ppg)
- $D_e = D_h - OD$

Untuk fluida Power law, perhitungan kecepatan rata-rata (V') sama dengan fluida Bingham, perbedaannya pada persamaan kecepatan kritisnya yang

melibatkan indeks Power law (n) dan indeks konsistensi (K). Persamaan kecepatan kritis fluida didalam pipa untuk fluida Power law :

$$V_c = \left(\frac{5.82 \times 10^4 \times K}{\rho} \right)^{\left(\frac{1}{2-n} \right)} \times \left(\frac{1.6 \times (3n+1)}{D \times 4n} \right)^{\left(\frac{n}{1-n} \right)} \quad (8)$$

di mana :

- V_c = kecepatan kritis fluida (ft/min)
- ρ = berat jenis lumpur (ppg)
- D = diameter dalam pipa (in)
- n = indeks Power law
- K = indeks konsistensi

Persamaan kecepatan kritis di annulus untuk fluida Power law :

$$V_c = \left(\frac{3.878 \times 10^4 \times K}{\rho} \right)^{\left(\frac{1}{2-n} \right)} \times \left(\frac{2.4 \times (2n+1)}{D_e \times 3n} \right)^{\left(\frac{n}{1-n} \right)} \quad (9)$$

di mana :

- V_c = kecepatan kritis fluida (ft/min)
- $D_e = D_h - OD$

Untuk menentukan apakah fluida laminar/turbulen adalah dengan mengikuti syarat berikut :

- Jika $V' < V_c$, maka aliran adalah laminar
- Jika $V' > V_c$, maka aliran adalah turbulen

Aliran laminar fluida Power law di pipa dan annulus

Persamaan untuk kehilangan tekanan di dalam pipa dengan fluida Power law dan aliran laminar dituliskan sebagai:

$$P_p = \left(\frac{K L}{300 D} \right) \times \left(\frac{1.6 V' \times (3n+1)}{D \times 4n} \right)^n \quad (10)$$

di mana :

- P_p = kehilangan tekanan didalam pipa (psi)
- L = panjang pipa (ft)
- V' = kecepatan rata-rata (ft/min)

- D = diameter pipa (in)
- n = indeks Power law
- K = indeks konsistensi

Persamaan kehilangan tekanan di annulus dengan fluida sirkulasi fluida Power law dan aliran laminar adalah:

$$P_a = \left(\frac{K L}{300 D_e} \right) \times \left(\frac{2.4 V' \times (2n+1)}{D_e \times 3n} \right)^n \quad (11)$$

di mana :

- P_a = kehilangan tekanan di annulus (psi)
- $D_e = D_h - OD$

Aliran turbulen fluida Bingham Plastic di pipa dan annulus

Hilangnya tekanan yang terkait dengan aliran turbulen suatu fluida Bingham plastic dipengaruhi terutama oleh densitas dan viskositas plastik.

Persamaan untuk kehilangan tekanan didalam pipa dengan fluida Bingham Plastic dan aliran turbulen dituliskan sebagai:

$$P_p = \frac{8.91 \times 10^{-5} \times \rho^{0.8} \times Q^{1.8} \times (PV)^{0.2} \times L}{D^{4.8}} \quad (12)$$

di mana :

- P_p = kehilangan tekanan didalam pipa (psi)
- L = panjang pipa (ft)
- Q = flow rate pompa (gpm)
- D = diameter pipa (in)
- ρ = berat jenis lumpur (ppg)
- PV = viscositas plastik (cp)

Perbandingan yang serupa dari persamaan aliran turbulen untuk fluida Bingham plastic di annulus menghasilkan:

$$P_a = \frac{8.91 \times 10^{-5} \times \rho^{0.8} \times Q^{1.8} \times (PV)^{0.2} \times L}{(ID - OD)^3 (ID + OD)^{1.8}} \quad (13)$$

di mana :

- P_a = kehilangan tekanan di annulus (psi)
- ID = diameter dalam casing/open hole (in)
- OD = diameter luar pipa (in)

Aliran turbulen fluida *Power law* di pipa dan annulus

Dodge dan Metzner telah menerbitkan hubungan aliran turbulen untuk fluida yang mengikuti model *Power law*.

Persamaan untuk kehilangan tekanan di dalam pipa dengan fluida *Power law* dan aliran turbulen sama dengan Persamaan 12 untuk Bingham.

Persamaan kehilangan tekanan di annulus dengan fluida sirkulasi fluida *Power law* dan aliran laminar sama dengan Persamaan 13 untuk Bingham.

Kehilangan tekanan di bit

Kehilangan tekanan di nozel diberikan oleh:

$$P_1 - 8.074 \times 10^{-4} \rho v_n^2 = P_2 \quad (14)$$

Dalam satuan lapangan psi, ppg, fps dan ft dan dengan mensubstitusikan ΔP_b untuk kehilangan tekanan ($P_1 - P_2$) dan menyelesaikan persamaan ini untuk kecepatan nozzle v_n menghasilkan:

$$v_n = \sqrt{\frac{\Delta P_b}{8.074 \times 10^{-4} \rho}} \quad (15)$$

di mana :

ΔP_b = kehilangan tekanan di nozzle bit (psi)

ρ = densitas fluida (ppg)

V_n = kecepatan aliran (feet per second)

Diameter nozzle Bit juga sering dinyatakan 32nds dalam satu inci. Misalnya, jika nozel bit digambarkan sebagai "12-13-13" ini menunjukkan bahwa bit memiliki satu nosel dengan diameter 12/32 in dan dua nozel memiliki diameter 13/32 in.

2.5 *Cutting transport*

Untuk pemboran yang efektif, *cutting* yang dihasilkan oleh *bit* harus segera diangkat dari dasar lubang sumur. Kemampuan angkat (*lifting capacity*) dari lumpur sangat tergantung kepada beberapa parameter.

Hal-hal penting yang berhubungan dengan kemampuan lumpur dalam mengangkat *cutting* adalah :

1. Aliran turbulen sangat diharapkan agar pengangkatan *cutting* lebih efisien.
2. Viskositas dan *gel strength* yang rendah, adalah sifat lumpur yang diharapkan dalam pengangkatan *cutting*.
3. Densitas lumpur yang tinggi membantu efisiensi pengangkatan *cutting*.
4. Putaran pipa pemboran membantu pengangkatan *cutting*.

Pada dasarnya pengangkatan *cutting* berhubungan erat dengan kecepatan slip (*slip velocity*) dari *cutting* dan kecepatan anular (*anular velocity*) dari lumpur pemboran.

Kecepatan slip dari *cutting* didefinisikan sebagai kecenderungan partikel batuan (*cutting*) untuk jatuh dan mengendap pada kecepatan yang konstan dan dapat ditulis dalam persamaan sebagai berikut :

- Untuk aliran transisi :

$$V_s = 174.7 \frac{d_p \times (\rho_p - \rho_f)^{0.667}}{\rho_f^{0.333} \times \mu_e^{0.333}} \quad (16)$$

- Untuk aliran turbulen :

$$V_s = 92.6 \frac{((\rho_p - \rho_f) \times d_p)^{0.5}}{\rho_f} \quad (17)$$

di mana :

ρ_p = densitas partikel (ppg)

ρ_f = densitas lumpur pemboran (ppg)

μ_e = viskositas efektif fluida (cp)

δ_p = ekivalen diameter partikel (in)

Nilai viskositas efektif untuk fluida Bingham plastic dapat dihitung menggunakan persamaan berikut :

$$\mu_e = PV + \frac{g_c YP D}{360v} \quad (18)$$

di mana :

$v = V_a$ = kecepatan anular (ft/min), bisa menggunakan persamaan :

$$V_a = \frac{24.5Q}{ID^2 - OD^2}$$

D = diameter pipa (in)

PV = viskositas plastik (cp)

YP = *yield point* (lb/100 ft²)

g_c = 32,2

Sedangkan untuk fluida Power law, viskositas efektif adalah :

$$\mu_e = \left[\frac{2.4 \times V' \times (2n+1)}{(ID-OD)3n} \right]^n \times \frac{200K(ID-OD)}{V'} \quad (19)$$

di mana :

$$V' = V_a = \frac{24.5Q}{ID^2 - OD^2}$$

n = indeks Power law

K = indeks konsistensi

Setelah memperoleh nilai V_s dan V_a , maka kecepatan transport (*lifting velocity*), V_t dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut :

$$V_t = V_a - V_s \quad (20)$$

Dari persamaan 20 sangat jelas terlihat bahwa untuk efisiensi pembersihan lubang, kecepatan anular harus lebih besar dari kecepatan slip.

III. PERHITUNGAN OPTIMASI KAPASITAS POMPA DAN PENGANGKATAN CUTTING

3.1 Data sumur Z

Data sumur yang digunakan dalam perhitungan kehilangan tekanan dan *horsepower* dalam tesis ini adalah sumur Z, yaitu sumur minyak vertikal dengan kedalaman total 3250 m MD atau 10663 ft.

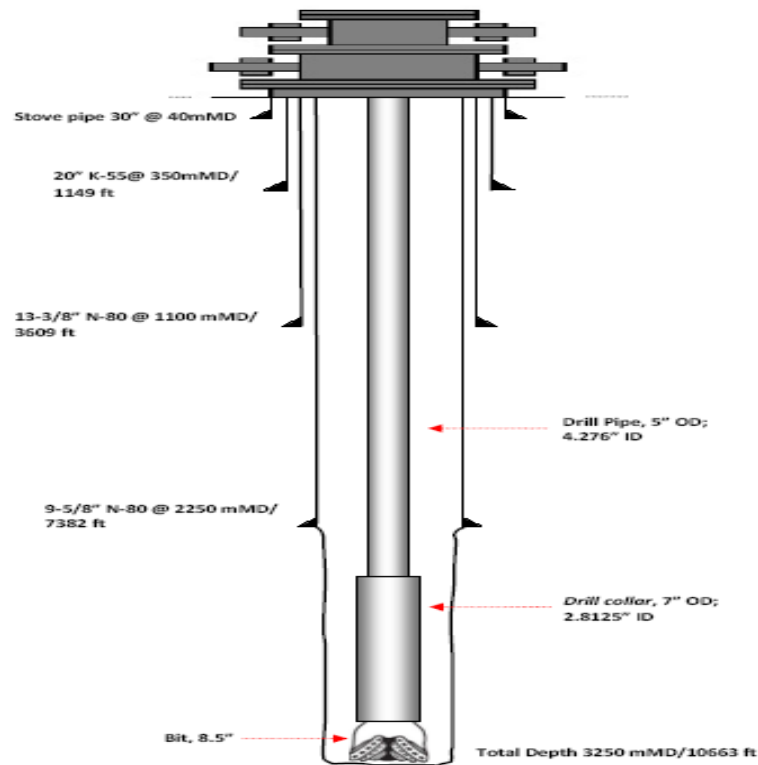
Operasi pemboran pada sumur Z ini adalah pemboran eksplorasi yang bertujuan untuk membuktikan cadangan migas yang telah diperkirakan sebelumnya, di mana diperkirakan formasi produktif berada pada kedalaman 3250 m di batuan dasar (*basement*).

Ilustrasi penampang sumur Z dan konfigurasi casing yang dipakai dapat dilihat selengkapnya pada Gambar 3.1.

Data geologi

Berdasarkan data geologi, secara stratigrafi lapisan prospek yang akan ditembus oleh sumur Z ini tersusun atas formasi Gumai sepanjang ± 631 m, formasi BRF sepanjang ± 41 m, formasi Talang Akar (TRM) sepanjang ± 619 m, formasi Talang Akar (GRM) sepanjang ± 262 m, formasi Lemat sepanjang ± 245 m dan terakhir adalah basement.

Jenis reservoir pada formasi produktif di sumur Z ini adalah berlapis-lapis (*multi layer*) yang pada beberapa formasi diatas. Tataan stratigrafi formasi produktif dari sumur Z dari lapisan batuan atas ke bawah (umur muda – tua) dapat dilihat selengkapnya pada Tabel III.1.



Gambar 3.1 Skema penampang sumur Z tanpa skala

Tabel III.1 Stratigrafi formasi dan lapisan batuan pada zona produktif di sumur Z (dari umur muda – tua)

Formasi	Lapisan batuan	Keterangan
Air Benakat	Batu lempung	Terdapat sisipan batupasir
	<i>Glauconit</i>	
Gumai	Batu lempung <i>globigerina</i>	Terdapat sisipan batu pasir
	Batu lempung gampingan	
Baturaja (BRF)	Batu lempung	
	<i>Marly</i>	
Talang Akar (TAF)	Batu Pasir	Saling terjadi sisipan diantara kedua lapisan batuan ini dan sedikit sisipan batubara
	<i>Shale</i>	
Lemat	<i>Tuff</i>	Ada sisipan batu pasir, <i>tuff</i> , <i>silt</i> dan batubara
	<i>Agglomerat</i>	
	Batu lempung	
	<i>Andesit</i>	
	<i>Shale</i>	
Basement	<i>Gneissic granit</i>	
	<i>Quartz diorite</i>	

Tabel III.2 Data pendukung sumur Z

Hole	in	26	17.5	12.25	8.5
Flow rate	gpm	928	825	670	585
Mud Weight	SG	1.03-1.05	1.10 - 1.15	1.15 - 1.30	1.30 - 1.40
PV	cp	20	20	20	20
YP	lb/100 ft ²	20 - 26	20 - 26	20 - 26	20 - 26
TFA	sq. in	1.33	0.92	0.75	0.59

* PV = plastic viscosity, YP = yield point, TFA = Total Flow Area

3.2 Perhitungan kehilangan tekanan dan optimasi kapasitas pompa

Contoh perhitungan kehilangan tekanan dan optimasi kapasitas pompa hanya akan dilakukan pada sumur terdalam (lubang 8.5") dimana nilai *flow rate* optimum yang didapat akan digunakan pada perhitungan selanjutnya yaitu menentukan kecepatan transport dan kapasitas (konsentrasi) *cutting* pemboran.

Asumsi-asumsi yang digunakan dalam perhitungan kehilangan tekanan ini adalah sebagai berikut:

- Dikarenakan kurangnya data tentang konfigurasi drillstring (jumlah *joint drillpipe* dan *drill collar*), sehingga penentuan panjang drill pipe dan *drill collar* mengacu pada 'kebiasaan' bahwa untuk sumur dengan kedalaman kurang lebih 10000 ft, panjang *drill collar* yang digunakan adalah sekitar 600 ft (*Heriot-Watt University*).
- Menggunakan persamaan dengan asumsi fluida adalah model *Bingham plastic* dan *Power law*.
- Tipe kombinasi peralatan dipermukaan menggunakan tipe 4 dengan konstanta $E = 4.2 \times 10^{-5}$ (*Rabia, Hussain, 1989*).
- Efisiensi mekanik (E_m), Efisiensi volumetric (E_v) dan Efisiensi transmisi (E_t) dipilih 0,9.

Notasi kehilangan tekanan (P) pada tiap section dalam persamaan yang akan digunakan adalah sebagai berikut:

- P_{sc} – kehilangan tekanan pada *surface connection*
- P_{dp} – kehilangan tekanan didalam *drillpipe*
- P_{dc} – kehilangan tekanan didalam *drill collar*
- P_b – kehilangan tekanan di bit
- P_{dp-cs} – kehilangan tekanan di annulus antara *drillpipe* dan casing
- P_{dp-oh} – kehilangan tekanan di annulus antara *drillpipe* dan *open hole*
- P_{dc-oh} – kehilangan tekanan di annulus antara *drill collar* dan *open hole*

Berikut ini akan dibahas tahap-tahap perhitungan untuk menghitung kehilangan tekanan dan Horsepower pada sumur Z dengan data-data yang telah dijelaskan diatas. Contoh perhitungan kehilangan tekanan dibawah ini adalah untuk diameter 8.5 inci saja dan unruk aliran fluida Bingham plastic, sedangkan untuk diameter yang lainnya akan ditampilkan pada table hasil akhir perhitungannya.

Contoh Perhitungan

Tahap-tahap perhitungan kehilangan tekanan dan *horsepower* di sumur Z adalah sebagai berikut:

- Menyiapkan data sumur Z dan data pendukungnya.
Berikut adalah data pemboran sumur Z, dimana operasi pemboran telah memasuki tahap pemboran lubang sumur dengan diameter 8.5 inci:

Data Pemboran:		
Diameter <i>openhole</i>	8.5	in
TVD	10663	ft
Q pump	585	gpm
Plastic Viscosity	20	cp
Yield Point	23	lb/100 ft2
Mud weight	11.25	ppg
<i>Drillpipe</i> ID	4.276	in
OD	5	in
Length dp	10063	ft
<i>Drill collar</i> ID	2.8125	in
OD	6.25	in
Length dc	600	ft
TFA (Total Flow Area)	0.59	sq. in
Casing ID	9.625	in
Casing set	7382	ft

2. Menghitung kehilangan tekanan di peralatan permukaan (P_{sc}) dengan asumsi kombinasi yang dipakai tipe 4 dengan konstanta $E = 4.2 \times 10^{-5}$

- Kehilangan tekanan di peralatan permukaan bisa dihitung sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 P_{sc} &= E \times \rho^{0.8} \times Q^{1.8} \times PV^{0.2} \\
 &= (4.25 \times 10^{-5}) (11.25)^{0.8} (585)^{1.8} (20)^{0.2} \\
 &= 50.729 \text{ psi}
 \end{aligned}$$

3. Menghitung kehilangan tekanan didalam *drillpipe* (P_{dp})

- Menentukan kecepatan rata dan kecepatan kritis (V' dan V_c) untuk model fluida *Bingham plastic* didalam *drillstring* :

$$\begin{aligned}
 V' &= \frac{24.5 Q}{D^2} \\
 &= \frac{24.5(585)}{(4.276)^2} \\
 &= 783.875 \text{ ft / min}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 V_c &= \frac{97 PV + 97 \sqrt{PV^2 + 8.2 \rho D^2 YP}}{\rho D} \\
 &= \frac{97(20) + 97 \sqrt{(20)^2 + 8.2(11.25)(4.276)^2 (23)}}{(11.25)(4.276)} \\
 &= 439.531 \text{ ft / min}
 \end{aligned}$$

- Dikarenakan $V' > V_c$ maka aliran fluida adalah turbulen, sehingga perhitungan kehilangan tekanan didalam pipa *drillpipe* :

$$\begin{aligned}
 P_{dp} &= \frac{8.91 \times 10^{-5} \times \rho^{0.8} \times Q^{1.8} \times (PV)^{0.2} \times L}{D^{4.8}} \\
 &= \frac{8.91 \times 10^{-5} (11.25)^{0.8} (585)^{1.8} (20)^{0.2} (10063)}{(4.276)^{4.8}} \\
 &= 1013.054 \text{ psi}
 \end{aligned}$$

4. Menghitung kehilangan tekanan di dalam *drill collar* (P_{dc})

- Prosedur perhitungan kehilangan tekanan di dalam *drill collar* sama dengan poin 3 diatas. Hasil perhitungannya sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 V' &= \frac{24.5 Q}{D^2} \\
 &= \frac{24.5(585)}{(2.8125)^2} \\
 &= 1811.911 \text{ ft / min}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 V_c &= \frac{97 PV + 97 \sqrt{PV^2 + 8.2 \rho D^2 YP}}{\rho D} \\
 &= \frac{97(20) + 97 \sqrt{(20)^2 + 8.2(11.25)(2.8125)^2 (23)}}{(11.25)(2.8125)} \\
 &= 463.179 \text{ ft / min}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P_{dc} &= \frac{8.91 \times 10^{-5} \times \rho^{0.8} \times Q^{1.8} \times (PV)^{0.2} \times L}{D^{4.8}} \\
 &= \frac{8.91 \times 10^{-5} (11.25)^{0.8} (585)^{1.8} (20)^{0.2} (600)}{(2.8125)^{4.8}} \\
 &= 451.225 \text{ psi}
 \end{aligned}$$

5. Menghitung kehilangan tekanan di annulus antara drill pipe dan casing (P_{dp-cs})

- Menentukan kecepatan rata dan kecepatan kritis (V' dan V_c) untuk model fluida *Bingham plastic* di annulus :

$$V' = \frac{24.5Q}{ID^2 - OD^2}$$

$$= \frac{24.5(585)}{(9.625)^2 - (5)^2}$$

$$= 211.892 \text{ ft/min}$$

$$V_c = \frac{97PV + 97\sqrt{PV^2 + 6.2\rho D_e^2 YP}}{\rho D_e}$$

$$= \frac{97(20) + 97\sqrt{(20)^2 + 6.2(11.25)(4.625)^2 (23)}}{(11.25)(4.625)}$$

$$= 384.639 \text{ ft/min}$$

dimana $D_e = ID - OD = 9.625 - 5 = 4.625$ in

- Dikarenakan $V' < V_c$ maka aliran fluida adalah laminar, sehingga perhitungan kehilangan tekanan di annulus :

$$P_{dp-cs} = \frac{L \times PV \times V'}{60000 \times D_e^2} + \frac{L \times YP}{225 \times D_e}$$

$$= \frac{(7382)(20)(211.892)}{60000(4.625)^2} + \frac{(7382)(23)}{225(4.625)}$$

$$= 187.533 \text{ psi}$$

6. Menghitung kehilangan tekanan di annulus antara *drill pipe* dan *open hole* (P_{dp-oh})

- Prosedur perhitungan kehilangan tekanan di annulus antara *drill pipe* dan *open hole* sama dengan poin 5 diatas, dengan nilai $D_e = 3.5$ in dan $L = L_{dp} - L_{cs} = 2681$ ft. Hasil perhitungannya sebagai berikut:

$$V' = \frac{24.5Q}{ID^2 - OD^2}$$

$$= \frac{24.5(585)}{(8.5)^2 - (5)^2}$$

$$= 303.333 \text{ ft/min}$$

$$V_c = \frac{97PV + 97\sqrt{PV^2 + 6.2\rho D_e^2 YP}}{\rho D_e}$$

$$= \frac{97(20) + 97\sqrt{(20)^2 + 6.2(11.25)(3.5)^2 (23)}}{(11.25)(3.5)}$$

$$= 398.113 \text{ ft/min}$$

$$P_{dp-oh} = \frac{L \times PV \times V'}{60000 \times D_e^2} + \frac{L \times YP}{225 \times D_e}$$

$$= \frac{(2681)(20)(303.333)}{60000(3.5)^2} + \frac{(2681)(23)}{225(3.5)}$$

$$= 100.431 \text{ psi}$$

7. Menghitung kehilangan tekanan di annulus antara *drill collar* dan *open hole* (P_{dc-oh})

- Prosedur perhitungan kehilangan tekanan di annulus antara *drill pipe* dan *open hole* sama dengan poin 5 diatas, dengan nilai $D_e = 2.25$ in. Hasil perhitungannya sebagai berikut:

$$V' = \frac{24.5Q}{ID^2 - OD^2}$$

$$= \frac{24.5(585)}{(8.5)^2 - (6.25)^2}$$

$$= 431.864 \text{ ft/min}$$

$$V_c = \frac{97PV + 97\sqrt{PV^2 + 6.2\rho D_e^2 YP}}{\rho D_e}$$

$$= \frac{97(20) + 97\sqrt{(20)^2 + 6.2(11.25)(1.5)^2 (23)}}{(11.25)(1.5)}$$

$$= 430.391 \text{ ft/min}$$

- Dikarenakan $V' > V_c$ maka aliran fluida adalah turbulen, sehingga perhitungan kehilangan tekanan di annulus :

$$P_{dc-oh} = \frac{8.91 \times 10^{-5} \times \rho^{0.8} \times Q^{1.8} \times (PV)^{0.2} \times L}{(ID - OD)^3 (ID + OD)^{1.8}}$$

$$= \frac{8.91 \times 10^{-5} (11.25)^{0.8} (585)^{1.8} (20)^{0.2} (600)}{(8.5 - 6.25)^3 (8.5 + 6.25)^{1.8}}$$

$$= 44.634 \text{ psi}$$

8. Menghitung kehilangan tekanan di bit (P_b)

Menghitung kehilangan tekanan yang melalui bit menggunakan persamaan 27 dengan $C_d = 0.95$ (*Heriot-Watt university*) dan $A_t = \text{TFA}$ (Total Flow Area) = 0.59 sq in.

$$\begin{aligned}\Delta P_b &= \frac{8.311 \times 10^{-5} \rho Q^2}{C_d^2 A_t^2} \\ &= \frac{8.311 \times 10^{-5} (11.25)(580)^2}{(0.95)^2 (0.59)^2} \\ &= 1018.512 \text{ psi}\end{aligned}$$

9. Menghitung kehilangan tekanan total dari sistem (P_t)

Menghitung kehilangan tekanan total (P_t) dengan menjumlahkan semua kehilangan tekanan tiap *section* :

$$\begin{aligned}P_t &= P_{sc} + P_{dp} + P_{dc} + P_{dp-cs} + P_{dp-oh} + P_{dc-oh} + P_b \\ &= 2866.119 \text{ psi}\end{aligned}$$

10. Menghitung *Hydraulic Horsepower* (HHP)

Menghitung HHP :

$$\begin{aligned}HHP_t &= \frac{P_t \times Q}{1714} \\ &= \frac{(2581.184)(580)}{1714} \\ &= 978.226 \text{ HP}\end{aligned}$$

11. Menghitung *Input Horsepower* (IHP)

Menghitung IHP dengan memakai asumsi nilai E_m dan E_v sebesar 0,9 :

$$\begin{aligned}IHP &= \frac{HHP}{E_m \times E_v} \\ &= \frac{978.226}{(0.9)(0.9)} \\ &= 1207.687 \text{ HP}\end{aligned}$$

Optimasi kapasitas pompa

Dasar optimasi dari kapasitas pompa ini adalah dengan memakai asumsi yang biasa dipakai dilapangan bahwa untuk desain hidrolika yang optimum pada suatu operasi pemboran, maka *flow rate* dari pompa yang harus digunakan ada dalam rentang 30 – 70 gpm/in diameter lubang (*Drilling Formulae*, GlobalSantaFe).

Dari data pemboran untuk lubang 8.5" dan perhitungan kehilangan tekanan dianulus akan dibuat tabel rentang kapasitas pompa terhadap kehilangan tekanannya yang akan menunjukkan *flow rate* optimum dari pompa yang pada *section* lubang tersebut.

Dengan menggunakan per-samaan kehilangan tekanan pada annulus yang telah dicontohkan diatas, perhitungan optimasi kapasitas pompa menghasilkan tabel hasil perhitungan seperti pada Tabel III.3.

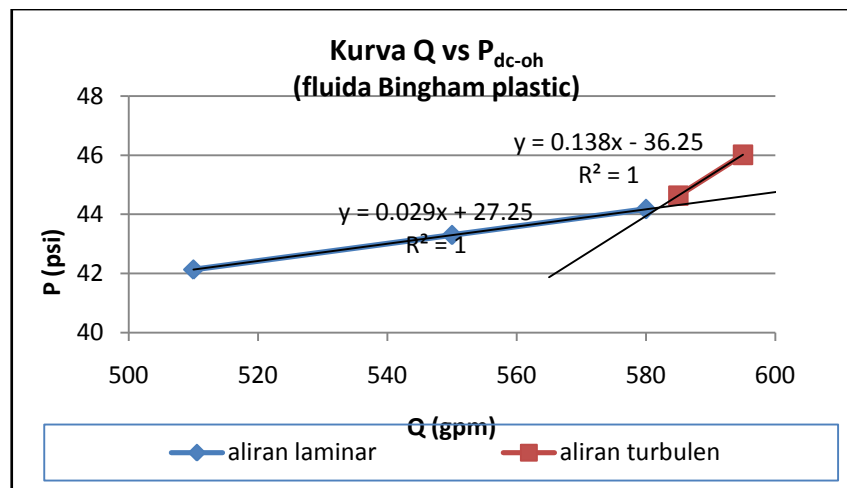
Terlihat bahwa pada annulus antara drill collar dan open hole ada saat dimana aliran menjadi turbulen (ditandai dengan angka yang dicetak tebal). Dengan membagi lagi nilai kapasitas pompa pada rentang 510 – 595 gpm, maka dapat diketahui nilai optimum *flow rate* pompa pada saat aliran berubah dari laminar menjadi turbulen, kemudian dapat dibuat grafik antara *flow rate* terhadap kehilangan tekanan di annulus pada *section* drill collar, seperti ditunjukkan dengan Tabel III.4 dan Gambar 3.2.

Tabel III.3 Hasil perhitungan optimasi pompa pada annulus sumur Z dengan fluida Bingham plastic

Q		anulus dp - cs			anulus dp - oh			anulus dc - oh			
GPM/ in	Q @ 8.5" (gpm)	V' (ft/min)	P _{dp-cs} (psi)		V' (ft/min)	P _{dp-oh} (psi)		V' (ft/min)	P _{dc-oh} (psi)		
30	255	92.36	173.78	lam	132.22	87.95	lam	188.25	34.70	lam	
40	340	123.15	177.32	lam	176.30	91.16	lam	251.00	37.18	lam	
50	425	153.94	180.87	lam	220.37	94.38	lam	313.75	39.65	lam	
60	510	184.73	184.41	lam	264.44	97.59	lam	376.50	42.13	lam	
70	595	215.51	187.95	lam	308.52	100.81	lam	439.25	46.02	turb	
V _c = 384.64 ft/min				V _c = 398.11 ft/min				V _c = 430.39 ft/min			

Tabel III.4 Flow rate vs Kehilangan tekanan di P_{dc-oh} (fluida Bingham plastic)

Q (gpm)	P _{dc-oh} (psi)	
510	42.13	lam
550	43.30	lam
580	44.17	lam
585	44.63	turb
595	46.02	turb



Gambar 3.2 Kurva perpotongan aliran laminar dan turbulen untuk fluida Bingham plastic

Dengan menghitung perpotongan dari kedua persamaan garis lurus pada kurva diatas maka akan didapat nilai flow rate optimum dari pompa. Sebagai

pembuktiannya, nilai flow rate yang diperoleh dapat dimasukkan kembali kedalam persamaan kehilangan tekanan

untuk mengetahui apakah aliran laminar atau turbulen.

Dengan mensubstitusi kedua persamaan di atas, maka didapat :

$$0.0292 x + 27.259 = 0.1383 x - 36.256$$

$$x = 582.172 \approx 582 \text{ gpm}$$

Maka nilai optimum dari flow rate pompa lumpur untuk model fluida Bingham plastic adalah 582 gpm.

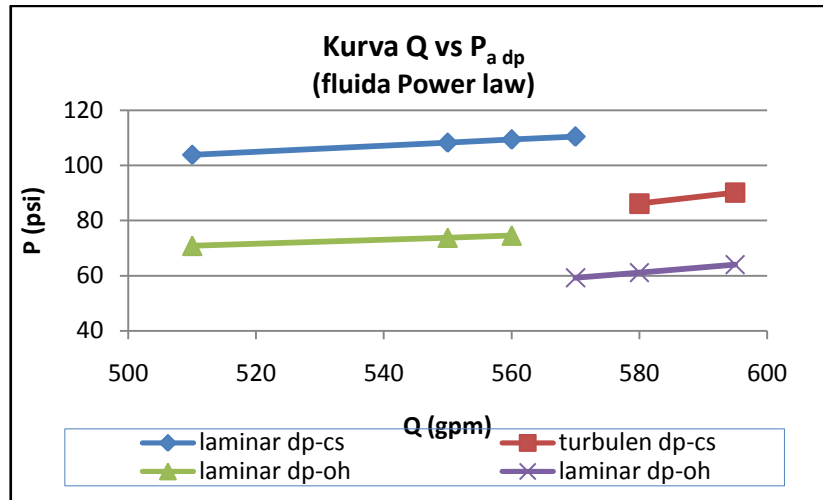
Dengan cara yang sama dengan di atas, dapat ditentukan nilai flow rate pompa lumpur yang optimum untuk model fluida Power law. Tabel hasil perhitungannya sebagai berikut :

Tabel III.5 Hasil perhitungan optimasi pompa pada annulus sumur Z dengan fluida Power law

Q		anulus dp - cs			anulus dp - oh			anulus dc - oh		
GPM /in	Q @ 8.5" (gpm)	V' (ft/min)	P _{dp-cs} (psi)		V' (ft/min)	P _{dp-oh} (psi)		V' (ft/min)	P _{dc-oh} (psi)	
30	255	92.36	70.95	lam	132.22	48.37	lam	188.25	26.09	lam
40	340	123.15	83.12	lam	176.30	56.67	lam	251.00	30.57	lam
50	425	153.94	93.99	lam	220.37	64.96	lam	313.75	34.56	lam
60	510	184.73	103.92	lam	264.44	70.85	lam	376.50	38.22	lam
70	595	215.51	90.23	turb	308.52	64.07	turb	439.25	41.63	lam
		V _c = 207.78 ft/min			V _c = 292.39 ft/min			V _c = 502.510 ft/min		

Tabel III.6 Flow rate vs Kehilangan tekanan di P_{dp-oh} dan P_{dp-cs} (fluida Power law)

Q (gpm)	P _{dp-cs} (psi)		P _{dp-oh} (psi)	
510	103.92	lam	70.85	lam
550	108.33	lam	73.86	lam
560	109.41	lam	74.59	lam
570	110.48	lam	59.30	turb
580	86.18	turb	61.19	turb
595	90.23	turb	64.07	turb



Gambar 3.3 Kurva Q vs P anulus untuk fluida Power law

Dari tabel hasil perhitungan dan kurva, ternyata menunjukkan grafik yang sangat berbeda dengan model fluida Bingham plastic. Oleh karena itu, untuk menentukan nilai optimum dari *flow rate* pompa lumpur dengan melihat pada tabel hasil perhitungan. Nilai *flow rate* pompa optimum yang diambil adalah nilai tertinggi dari pompa sebelum terjadinya aliran turbulen baik itu di anulus antara *drillpipe* dan *casing* maupun antara *drillpipe* dan *open hole*. Oleh karena itu, nilai *flow rate* optimum untuk fluida Power law dapat ditentukan di angka 560 gpm.

Perhitungan *cutting transport*

Sebelum melakukan perhitungan ada beberapa batasan parameter yang

ditentukan agar bisa diperoleh suatu *tren* yang memuaskan. Pertama adalah batasan rentang diameter partikel (*cutting*), disini akan ditentukan diameter *cutting* dengan ukuran 0.1, 0.3, 0.5 dan 1 in. Parameter yang kedua adalah densitas *cutting*, di mana ditentukan dari formasi sumur Z yang telah ditunjukkan pada Tabel III.1, yaitu batuan dengan *Spesifik Gravity* 2.2, 2.5, 2.75 dan 3 yang merupakan nilai rata-rata dari densitas lapisan batuan pada formasi produktif di sumur Z (Tabel III.7).

Tahap-tahap perhitungan *cutting transport* dan konsentrasi *cutting* adalah untuk fluida Bingham plastic. Contoh perhitungan berikut ini adalah berdasarkan data-data sebagai berikut :

Fluida	Bingham plastic
d_p	0.1 in
ρ_p	2.2 (18.33 ppg)
ρ_f	11.25 ppg
Q	582 gpm
ID casing	9.625 in
OD drillpipe	5 in
PV	20 cp
YP	23 lb/100 ft ²

Tabel III.7 *Specific Gravity* lapisan produktif sumur Z

Formasi	Lapisan batuan	Specific Gravity
Air Benakat	Batu lempung	2.2 – 2.9
	<i>Glaucanit</i>	2.6
Gumai	Batu lempung <i>globigerina</i>	2.2 – 2.9
	Batu lempung gampingan	2.2 – 2.6
Baturaja (BRF)	Batu lempung	2.2 – 2.9
	<i>Marly</i>	2.2
Talang Akar (TAF)	Batu Pasir	2.2 – 2.8
	<i>Shale</i>	2.2 – 2.8
Lemat	<i>Tuff</i>	2.4 – 2.6
	<i>Agglomerat</i>	2.75
	Batu lempung	2.2 – 2.9
	<i>Andesit</i>	2.5 – 2.8
	<i>Shale</i>	2.4 – 2.8
Basement	<i>Gneissic granit</i>	2.6 – 2.9
	<i>Quartz diorite</i>	2.6 – 3

1. Hitung kecepatan anular :

$$V' = \frac{24.5Q}{ID^2 - OD^2}$$

$$= \frac{24.5(582)}{(9.625)^2 - (5)^2}$$

$$= 210.81 \text{ ft/min}$$

2. Menghitung viskositas efektif :

$$\mu_e = PV + \frac{g_c YP D}{360v}$$

$$= 20 + \frac{(32.2)(23)(4.625)}{360(210.81)}$$

$$= 20.05 \text{ cp}$$

3. Menghitung kecepatan slip *cutting* :

$$V_s = 174.7 \frac{d_p \times (\rho_p - \rho_f)^{0.667}}{\rho_f^{0.333} \times \mu_e^{0.333}}$$

$$= 174.7 \times \frac{(0.1)(18.33 - 11.25)^{0.667}}{(11.25)^{0.333} (20.05)^{0.333}}$$

$$= 10.6 \text{ ft/min}$$

4. Menghitung *cutting transport* :

$$V_t = V_a - V_s$$

$$= 210.81 - 10.6$$

$$= 200.2 \text{ ft/min}$$

Hasil perhitungan selengkapnya untuk pengangkatan *cutting* untuk fluida Bingham dapat dilihat pada Tabel III.8 sampai dengan III.10

Tabel III.8 Hasil perhitungan *cutting transport* pada annulus *drillpipe* dan *casing* (Bingham)

annulus dp - cs				
d _p (in)	V _t (ft/min)			
	ρ _p = 2.2	2.5	2.75	3
0.1	200.20	197.83	196.01	194.30
0.3	178.99	171.88	166.42	161.28
0.5	157.78	145.93	136.83	128.26
1	104.76	81.05	62.85	45.71

Tabel III.9 Hasil perhitungan *cutting transport* pada annulus *drillpipe* dan *open hole* (Bingham)

anulus dp - oh				
d _p (in)	V _t (ft/min)			
	ρ _p = 2.2	2.5	2.75	3
0.1	286.50	284.13	282.31	280.60
0.3	265.29	258.17	252.71	247.57
0.5	244.07	232.21	223.11	214.54
1	191.03	167.32	149.11	131.96

Tabel III.10 Hasil perhitungan *cutting transport* pada annulus *drill collar* dan *open hole* (Bingham)

anulus dc - oh				
d _p (in)	V _t (ft/min)			
	ρ _p = 2.2	2.5	2.75	3
0.1	412.39	410.02	408.20	406.49
0.3	391.17	384.06	378.60	373.45
0.5	369.95	358.09	348.99	340.41
1	316.90	293.18	274.97	257.82

Hasil perhitungan pengangkatan *cutting* untuk fluida Power law dengan Q optimum 560 gpm dapat dilihat Tabel III.11 sampai III.13

Tabel III.11 Hasil perhitungan *cutting transport* pada annulus *drillpipe* dan *casing* (Power law)

anulus dp - cs				
d _p (in)	V _t (ft/min)			
	ρ _p = 2.2	2.5	2.75	3
0.1	199.32	195.07	193.99	192.96
0.3	183.81	179.55	176.29	173.21
0.5	171.12	164.03	158.58	153.46
1	139.40	125.22	114.33	104.08

Tabel III.12 Hasil perhitungan *cutting transport* pada annulus *drillpipe* dan *open hole* (Power law)

anulus dp - oh				
d _p (in)	V _t (ft/min)			
	ρ _p = 2.2	2.5	2.75	3
0.1	283.39	281.83	280.63	279.51
0.3	269.43	264.75	261.16	257.78
0.5	255.48	247.68	241.69	236.05
1	220.58	204.99	193.01	181.73

Tabel III.13 Hasil perhitungan *cutting transport* pada annulus *drill collar* dan *open hole* (Power law)

anulus dc - oh				
d _p (in)	V _t (ft/min)			
	ρ _p = 2.2	2.5	2.75	3
0.1	405.55	403.79	402.44	401.17
0.3	389.83	384.56	380.51	376.70
0.5	374.11	365.32	358.58	352.22
1	334.37	317.24	303.75	291.04

IV. Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat diambil dari studi kasus pada penulisan tesis ini adalah sebagai berikut :

1. Kapasitas flow rate pompa pada model fluida Power law lebih kecil dibandingkan model Bingham, tetapi menunjukkan efektifitas yang lebih baik untuk sistem sirkulasi pemboran.
2. Lumpur pemboran KCl-Polymer yang didesain pada sumur Z untuk kedalaman 3250 m dan lubang 8.5" sudah tepat dengan dari kondisi formasi batuan dan keefektifan dari hasil perhitungan.
3. Menunjukkan bahwa model yang tepat untuk fluida pemboran adalah model Power law
4. *Cutting* dengan variasi densitas dan diameter dari formasi produktif sumur Z bisa ditangani oleh pemodelan kedua model fluida Bingham dan Power law.

5. Model fluida Power law menunjukkan efektifitas yang lebih baik dalam hal pengangkatan *cutting*, karena mempunyai rentang *velocity transport* yang lebih luas.

DAFTAR PUSTAKA

- _____ (-) : *Drilling Engineering*, Heriot-Watt University.
- _____ (1994) : *Drilling Fluid Manual*, Amoco Production Company.
- _____ (2002) : *Drilling Formulae*, GlobalSantaFe.
- _____ (2009) : *Drilling Fluids and Health Risk Management*, IPIECA/OGP
- Annis, Max R., dan Smith, Martin V. (1974) : *Drilling Fluids Technology*, Exxon Company, USA.
- Bourgoyne Jr., Adam T., Millheim, Keith K., Chenevert, Martin E., dan Young Jr., F. S. (1991) : *Applied Drilling Engineering*, Society of Petroleum Engineers.
- Darley, H. C. H. dan Gray, George R. (1988) : *Composition and Properties of Drilling and Completion Fluids*, Gulf Professional Publishing.
- Gabolde, G., dan Nguyen, J.-P. (1999) : *Drilling Data Handbook*, Editions Technip, Paris.
- Gatlin, Carl (1960) : *Petroleum Engineering; Drilling and Well Completion*, Prentice-Hall, Inc.
- Mitchell, Bill, Dr. (1995) : *Advanced Oil Well Drilling Engineering*, USA Library of Congress.
- Moore, Preston L (1986) : *Drilling Practice Manual*, PenWell Publishing Company.
- Rabia, Hussain (1989) : *Rig Hydraulics*, Textbook, Entrae.
- <http://www.tapcoinc.com> : Bulk Material Density Table
- <http://www.edumine.com> : Average Specific Gravity of Various Rock Types

^{*)} Penulis adalah Pejabat Fungsional Widyaiswara Pusdiklat Migas.