

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1. Dasar Hidrolika Pemboran

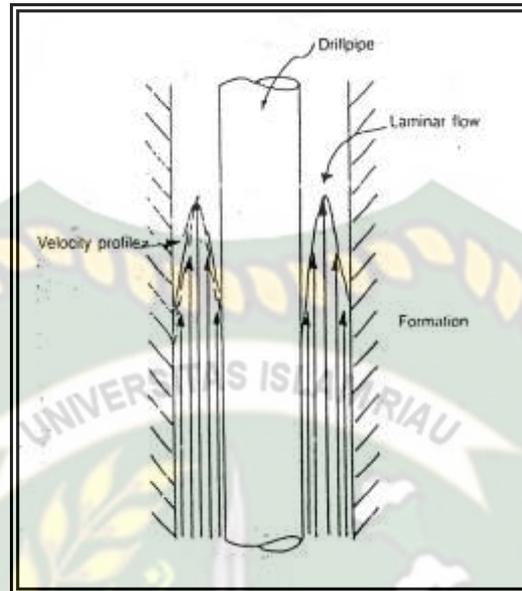
Fluida pemboran adalah suatu fluida yang bersirkulasi dalam sumur pemboran yang mempunyai berbagai fungsi yang diperlukan dalam operasi pemboran. Lumpur memegang peranan penting dalam operasi pemboran terutama dalam proses pembersihan cutting di dasar sumur dan pengangkatan cutting ke permukaan (Al-Kayiem et al, 2010). Jenis lumpur pemboran yang sesuai dengan karakteristik sumur akan mendukung keberhasilan operasi pemboran terutama pada sifat aliran, kecepatan pemboran dan pengangkatan *cutting* ke permukaan (Coussot et al., 2004; Saasen et al, 2002). Sifat aliran fluida pemboran meliputi aliran laminar dan aliran turbulen. Sedangkan jenis fluida pemboran meliputi fluida newtonian dan non-newtonian (Kelessidis, et al, 2011). Sifat dan jenis fluida pemboran yang sesuai akan mendukung keberhasilan operasi pemboran, dimana pola aliran, serta kecepatan pemboran serta keberhasilan pengangkatan cutting ke permukaan (Herianto. Dkk 2001).

##### 2.1.1. Sifat Aliran Fluida Pemboran

Jenis aliran fluida pada pipa ada dua, yaitu aliran laminar dan turbulen.

###### 1. Laminar

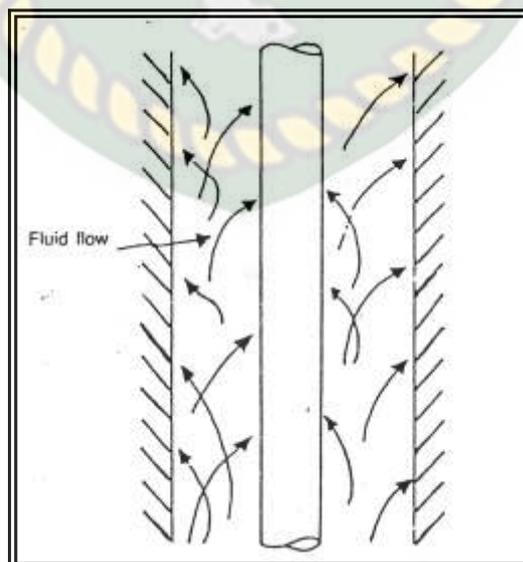
Aliran laminar yaitu suatu aliran dimana gerak aliran partikel-partikel fluidanya pada kecepatan yang agak lambat, teratur dan sejajar dengan arah aliran (dinding pipa). Partikel-partikel yang ada didekat dinding hampir tidak bergerak, sementara partikel-partikel lain yang ada ditengah bergerak lebih cepat. Aliran laminar didefinisikan sebagai aliran dengan fluida yang bergerak dalam lapisan-lapisan atau lamina-lamina dengan satu lapisan meluncur secara lancar (Fauziah, Nisa Aina 2017).



**Gambar 2.1** Aliran laminar (Rubiandini, Rudi 2010)

2. Turbulen

Aliran turbulen yaitu suatu aliran dimana fluida bergerak dengan kecepatan yang lebih cepat. Aliran turbulen didefinisikan sebagai aliran yang dimana pergerakan dari partikel-partikel fluida sangat tidak menentu karena mengalami percampuran serta putaran partikel antar lapisan (Fauziah, Nisa Aina 2017).



**Gambar 2.2** Aliran turbulen (Rubiandini, Rudi 2010)

Sifat aliran bisa juga diketahui dengan menentukan kecepatan rata-rata dan kecepatan kritisnya. Aliran laminar ditandai dengan kecepatan rata-rata lebih kecil dibandingkan dengan kecepatan kritisnya, sedangkan aliran turbulen sebaliknya, dimana kecepatan rata-ratanya lebih besar dibandingkan dengan kecepatan kritisnya. Dengan demikian untuk menentukan sifat aliran fluida pemboran dengan konsep kecepatan kritis digunakan ketentuan sebagai berikut (Kurniawan, Budi 2015):

- $V > V_c$  = aliran fluida bersifat turbulen
- $V < V_c$  = aliran fluida bersifat laminar

Kecepatan rata-rata dari fluida dapat ditentukan dengan persamaan berikut:

$$v_{DP} = \frac{24,5Q_{data}}{(ID_{DP})^2} \dots\dots\dots(2.1)$$

Kecepatan di annulus, harga d-nya adalah:

$$v_{anDP} = \frac{24,5Q_{data}}{(HD^2 - OD_{DP}^2)} \dots\dots\dots(2.2)$$

Kecepatan kritis dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

- a. Kecepatan kritis pada pipa

$$v_{cDP} = \frac{97PV + 97\sqrt{PV^2 + 8,2\rho_m (ID_{DP})^2 YP}}{\rho_m \cdot ID_{DP}} \dots\dots\dots (2.3)$$

- b. Kecepatan kritis pada annulus

$$v_{canDP} = \frac{97PV + 97\sqrt{PV^2 + 6.2\rho_m (HD - OD_{DP})^2 YP}}{\rho_m \cdot HD - OD_{DP}} \dots\dots\dots (2.4)$$

Keterangan:

- $V_c$  = kecepatan kritis, fps  
 $PV$  = *plastic viscosity*, cp  
 $HD$  = diameter lubang bor, inci  
 $OD$  = diameter luar pipa, inci  
 $ID$  = diameter dalam pipa, inci  
 $YP$  = *yield point*, lb/100 ft<sup>2</sup>

### 2.1.2. Jenis Fluida Pemboran

Fluida pemboran dapat dibagi menjadi:

1. *Newtonian Fluids*

*Newtonian fluids* adalah fluida dimana viskositasnya hanya dipengaruhi oleh tekanan dan temperatur. Misalnya air, gas dan minyak yang encer. Fluida ini mempunyai perbandingan antara *shear stress* dan *shear rate* yang konstan dinamakan  $\mu$  (viskositas). Fluida Newton terdapat hubungan linear antara besarnya tegangan geser yang diterapkan dan laju perubahan bentuk yang diakibatkan (Muhajir, Khairul 2011).

2. *Non Newtonian Fluids*

*Non Newtonian fluid* adalah fluida yang perbandingannya antara *shear stress* dengan *shear rate*-nya tidak konstan. Pendekatan model aliran yang dipakai, yaitu *Bingham Plastic* atau *Power Law* (Ahmad Firman Nashir, 2015):

a. *Bingham plastic*

Fluida pemboran dianggap sebagai *bingham plastic*, dalam hal ini sebelum terjadi aliran harus ada minimum *shear stress* yang melebihi suatu harga minimum *yield point*.

b. *Power law fluid*

Pendekatan *power law* dilakukan dengan menganggap kurva hubungan *shear stress* terhadap *shear rate*. Indeks aliran diartikan sebagai derajat (tingkat) pada fluida yang *non newtonian*. Perhitungan indeks aliran dan *indeks* konsistensi dapat menggunakan persamaan:

$$n = 3,32 \log \left( \frac{2PV + YP}{PV + YP} \right) \dots\dots\dots(2.5)$$

$$K = \frac{510(PV + YP)}{511^n} \dots\dots\dots(2.6)$$

### 2.2. Kecepatan Aliran

Kecepatan alir adalah merupakan besarnya debit aliran fluida pemboran. Kecepatan alir ini sangat dibutuhkan dalam operasi pemboran, karena dengan

terlalu kecilnya kecepatan alir lumpur akan mengakibatkan problem *pipe sticking* karena *cutting* tidak terangkat, begitu pula sebaliknya bila kecepatan alir terlalu tinggi akan mengakibatkan terjadinya aliran turbulen pada annulus pipa, dengan terjadinya pola aliran fluida turbulen jelas akan merugikan karena akan terjadi pengikisan oleh fluida terhadap *mud cake* yang telah terbentuk. Kecepatan aliran yang baik adalah diantara keduanya, yaitu tidak terlalu kecil juga tidak terlalu besar.

### 2.2.1. Kecepatan Alir Pompa

Pompa lumpur pemboran adalah bagian dari unit pemompaan sedangkan unit penggeraknya tidak terlalu menjadi permasalahan, karena apapun jenisnya tidak banyak bedanya terhadap unit pompa yang dipakai, misalnya memakai mesin uap, listrik, motor bensin, diesel dan lain-lain.

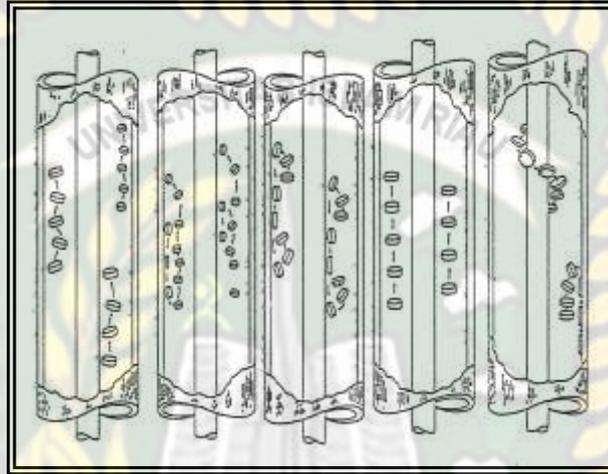
Unit pompa dikenal dua jenis dilihat dari mekanisme pemindahan dan pendorongan lumpur pemboran, yaitu pompa sentrifugal dan pompa torak (*piston*). Pompa yang sering dipakai dalam operasi pemboran adalah pompa jenis torak (*piston*) karena mempunyai beberapa kelebihan dari sentrifugal, misalnya dapat dilalui fluida pemboran yang berkadar solid tinggi dan abrasif, pemeliharaan dan sistem kerjanya tidak terlalu rumit atau keuntungan dapat dipakainya lebih dari satu macam liner sehingga dapat mengatur laju alir dan tekanan pompa yang diinginkan.

Dilihat dari jumlah pistonnya, pompa bisa *simplex* (1 piston), *duplex* (2 piston), *triplex* (3 piston) dengan arah kerja dapat berupa *single acting* (1 arah kerja) atau *double acting* (2 arah kerja). Pabrik pembuat pompa biasanya telah memberikan spesifikasi dari pompa yang akan digunakan tentang tekanan dan kecepatan maksimum untuk ukuran liner yang bermacam-macam.

### 2.2.2. Kecepatan Alir di Anulus

Pahat yang dipakai selalu menggerus batuan formasi dan menghasilkan *cutting* saat operasi pemboran berlangsung, sehingga semakin banyak pula *cutting* yang dihasilkan. *Cutting* yang dihasilkan perlu untuk segera diangkat ke permukaan agar tidak menimbulkan masalah *pipe sticking*.

Lumpur pemboran dalam *rotary drilling* masuk lewat dalam pipa dan keluar ke permukaan lewat anulus sambil mengangkat *cutting*, seperti terlihat pada gambar 2.3, sehingga perhitungan kecepatan minimum aliran yang diperlukan untuk mengangkat *cutting* ke permukaan (*slip velocity*) harus di atas kecepatan jatuh *cutting*.



**Gambar 2.3** Pengangkatan partikel oleh fluida (Rubiandini, Rudi 2010)

Kecepatan slip adalah kecepatan minimum dimana *cutting* dapat mulai terangkat atau dalam prakteknya merupakan pengurangan antara kecepatan lumpur dengan kecepatan jatuh dari *cutting*. Kecepatan slip didapatkan dengan memasukkan kondisi yang biasa ditemui dalam operasi pemboran :

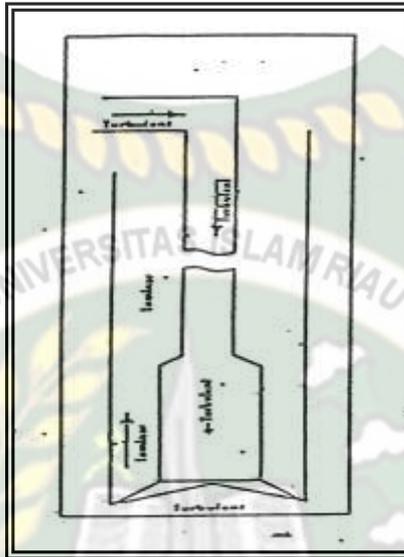
$$V_s = \frac{82,87 D_s^2 (\rho_s - \rho_f)}{\mu_a} \dots\dots\dots(2.7)$$

Keterangan :

- $v_s$  = kecepatan slip partikel, fps
- $D_s$  = diameter partikel, in
- $\rho_s$  = densitas partikel, ppg
- $\rho_f$  = densitas fluida, ppg
- $\mu_a$  = *apparent viscosity*, cp

Aliran lumpur di anulus dalam kondisi operasi pemboran normal diperlihatkan pada gambar 2.4 Dinding lubang bor yang belum tercasing mempunyai selaput tipis yang berfungsi sebagai pelindung yang disebut *mud*

*cake*, agar selaput tipis yang sangat berguna tersebut tidak terkikis oleh aliran lumpur, maka aliran lumpur di annulus harus diusahakan laminar.



**Gambar 2.4** Pola aliran dalam sumur pendoran (Rubiandini, Rudi 2010)

Lumpur yang mengalir di annulus mempunyai kecepatan kritis yang menentukan batas antara pola aliran laminar dan turbulen. Pola aliran turbulen merupakan pola aliran yang mempunyai kecepatan lebih besar dari kecepatan kritisnya, begitu juga sebaliknya. Kecepatan kritis lumpur di annulus dapat dihitung dengan persamaan:

$$v_{cDP} = \frac{97PV + 97\sqrt{PV^2 + 8.2\rho_m (ID_{DP})^2 YP}}{\rho_m \cdot ID_{DP}} \dots\dots\dots(2.8)$$

Keterangan :

- Vc = kecepatan kritis, fps
- $\rho_m$  = densitas lumpur, ppg
- PV = *plastic Viscosity*, cp
- ID = diameter dalam pipa, inci
- YP = *yield Point*, lb/100 ft<sup>2</sup>

### 2.3. Kehilangan Tekanan Pada Sistem Sirkulasi

Kehilangan tekanan pada sistem sirkulasi terjadi akibat friksi dalam pipa dan anulus yang dipengaruhi oleh laju alir dan luas area yang dilewati fluida pemboran melalui bit (Tandepadang, Juryanto 2012).

Besarnya kehilangan tekanan pada sistem sirkulasi lumpur pemboran dapat dilakukan dengan cara menghitung kehilangan tekanan pada pahat yang digunakan untuk mengurangi tekanan pompa guna mendapatkan harga kehilangan tekanan parasitiknya. Besarnya kehilangan tekanan yang terjadi pada saat sirkulasi lumpur pemboran berlangsung perlu diketahui (Novrianti, Mursyidah, M. Iqbal Ramadhan 2015):

- Kehilangan tekanan mempengaruhi besarnya *hydraulic horse power* yang harus diberikan untuk sirkulasi lumpur.
- Kehilangan tekanan mempengaruhi hilang lumpur, gugurnya dinding lubang bor dan juga *blow out*.
- Kehilangan tekanan yang besar merugikan daya yang seharusnya diperlukan untuk pahat dan akan mempengaruhi laju penembusan.

Fluida pemboran yang paling umum digunakan adalah fluida non newtonian jenis bingham *plastic*. Secara garis besar kehilangan tekanan sistem sirkulasi terbagi dalam 4 bagian, yaitu: kehilangan tekanan pada *surface connection*, kehilangan tekanan di dalam pipa, kehilangan tekanan pada pahat dan kehilangan tekanan pada anulus (Ochoa, Marylin Viloría 2006).

#### 2.3.1. Kehilangan Tekanan Pada *Surface Connection*

kehilangan tekanan pada *surface connection* dihitung berdasarkan equivalensi dari kehilangan tekanan di *drill pipe*. Kombinasi alat-alat ini dibagi menjadi empat kelas, yang masing-masing diberi equivalensi terhadap panjang dari *drill pipe*, seperti pada tabel 2.1.

$$P_{sc} = E \cdot \rho^{0.8} \cdot Q^{1.8} \cdot PV^{0.2} \dots\dots\dots (2.9)$$

Keterangan :

P<sub>sc</sub> = kehilangan tekanan pada *surface connection*, psi

E = konstanta yang didapat dari tipe *surface connection*

- $\rho_m$  = densitas lumpur, ppg
- $Q$  = laju alir lumpur, gpm
- $PV$  = plastic viscosity, cp

**Tabel 2.1** Equipment pada Surface Connection (Rabia, H. 1985)

Case	Stand Pipe	Hose	Swivel, etc.	Kelly	Eq. Length 3.826-in. ID
1	40 ft Long 3 in ID	45 ft Long 2 in ID	20 ft Long 2 in ID	40 ft Long 2,25 in ID	2.600 ft
2	40 ft Long 3,5 in ID	55 ft Long 2,5 in ID	25 ft Long 2,5 in ID	40 ft Long 3,25 in ID	946 ft
3	45 ft Long 4 in ID	55 ft Long 3 in ID	25 ft Long 2,5 in ID	40 ft Long 3,25 in ID	610 ft
4	45 ft Long 4 in ID	55 ft Long 3 in ID	30 ft Long 3 in ID	40 ft Long 4 in ID	424 ft

**Tabel 2.2** Harga Konstanta E (Rabia, H. 1985)

Equipment Surface Connection	Harga Konstanta E	
	Imperial Unit	Metric Unit
1	$2,5 \times 10^{-4}$	$8,8 \times 10^{-6}$
2	$9,6 \times 10^{-5}$	$3,3 \times 10^{-6}$
3	$5,3 \times 10^{-5}$	$1,8 \times 10^{-6}$
4	$4,2 \times 10^{-5}$	$1,4 \times 10^{-6}$

**2.3.2. Kehilangan Tekanan di Dalam Pipa**

Besar kehilangan tekanan di dalam pipa dapat dihitung berdasarkan pola alirannya :

- Alirannya Laminer, maka persamaan yang digunakan adalah:

$$P_{DP} = \frac{\mu_p L_{DP} V_{DP}}{1.500 \cdot di^2} + \frac{\sigma_y L_{DP}}{225 \cdot di} \dots\dots\dots(2.10)$$

- Aliran Turbulent, maka persamaan yang digunakan adalah:

$$P_{DP} = \frac{8.91 \times 10^{-5} \rho_m^{0,8} Q^{1,8} PV^{0,2} L_{dp}}{(ID^{4,8})} \dots\dots\dots(2.11)$$

### 2.3.3. Kehilangan Tekanan pada Pahat

Kehilangan tekanan pada pahat merupakan faktor yang sangat menentukan dalam hidrolika lumpur pemboran. Perhitungan kehilangan tekanan dilakukan dengan prinsip kesetimbangan energi yang masuk dan keluar melalui *nozzle* pahat. Asumsi-asumsi yang digunakan adalah sebagai berikut:

1. Perubahan tekanan mengabaikan perubahan sudut
2. Kecepatan *upstream* diabaikan dan disetarakan dengan *nozzle velocity* ( $v_n$ )
3. Pengaruh gesekan diabaikan

Persamaan yang digunakan di lapangan adalah:

$$P_b = P_{avg} - P_p \dots\dots\dots(2.12)$$

Keterangan :

- $P_b$  = kehilangan tekanan pada pahat, psi  
 $P_{avg}$  = tekanan pompa, HP  
 $P_p$  = *parasitic pressure loss*

Persamaan optimasi adalah:

$$P_b = \frac{z}{z+2} P_{opt} \dots\dots\dots(2.13)$$

Keterangan :

- $P_b$  = kehilangan tekanan pada pahat, psi  
 $z$  = faktor pangkat  
 $P_{opt}$  = tekanan pompa optimal

### 2.3.4. Kehilangan Tekanan pada Anulus

- Aliran Laminer

Kehilangan tekanan pada anulus dapat dicari dengan persamaan:

$$P_{DP} = \frac{PVL_{DP} V_{anDP}}{60.000 (HD - OD_{DP})^2} + \frac{YP L_{DP}}{225 (HD + OD_{DP})} \dots\dots\dots(2.14)$$

- Aliran Turbulen

Kehilangan tekanan pada anulus DC dan DP dapat dicari dengan persamaan:

$$P_{DP} = \frac{8,91 \times 10^{-5} \rho_m^{0.8} Q^{1.8} PV^{0.2} L_{dp}}{(DH - OD)^3 (DH + OD)^{1.8}} \dots\dots\dots(2.15)$$

Keterangan :

- L = panjang pipa DP/DC, ft
- DH = diameter *hole*
- OD = *outside* diameter
- $\rho_m$  = densitas lumpur

#### 2.4. Hidrolika Pahat

Pada system hidrolika lumpur pemboran antara lain bertujuan untuk mendapatkan (*horsepower*) *bit hydraulic* maksimum, menambah gaya impak jet, meningkatkan efek pembersihan pada dasar lubang bor, dan mengangkat serbuk bor dari annulus ke permukaan sehingga dapat membantu meningkatkan laju pemboran (Guan et al, 2015). Hidrolika pahat merupakan indikator yang menyatakan efek yang ditimbulkan oleh beberapa parameter seperti kecepatan fluida pemboran yang melewati *bit nozzle* dan tekanan yang hilang sepanjang sistem sirkulasi (lim, kiem ming & chukwu, 1996). Fluida yang telah mengandung *cutting* tersebut menyentuh gigi pahat sebagai fungsi membersihkan dan mendinginkan pahat. Sistem kerja *Jet Bit* diharapkan tidak akan menimbulkan penggilingan/pemecahan ulang (*regrinding*) sehingga efektifitas pahat maupun laju penembusan pemboran (ROP) menjadi lebih optimal.

Sumur GPS Lapangan CGH memiliki sifat atau tipe pemboran berarah (*directional drilling*) maka hidrolika pahat menggunakan konsep BHI, karena konsep BHI pada prinsipnya mengatur besarnya gaya yang bekerja pada dasar lubang dengan anggapan semua momentum diteruskan ke dasar lubang bor mengikuti arah pahat (Arif Rachman, Hakim 2012). Besarnya kehilangan daya pompa pada bit antara (BHI/HPs)  $\pm 48$  % (Baker Hughes INTEQ, 1998). Dengan memaksimalkan tumbukan pada dasar lubang maka konsep ini cenderung akan mengikuti arah pahat dan aliran fluida pada dasar lubang bor, sehingga pada lintasan berinklinasi konsep BHI akan bekerja secara maksimal.

Penentuan ukuran nozzle yang merupakan fungsi dari densitas lumpur, rate optimum dan kehilangan tekanan di pahat dijabarkan dalam bentuk persamaan :

$$A = \left[ \frac{\rho_m \times Q_{opt}^2}{10858 P_b} \right]^{0.5} \dots\dots\dots(2.16)$$

Keterangan :

- $\rho_m$  = densitas lumpur, ppg
- $Q_{opt}$  = laju alir optimum, gpm
- $P_b$  = *pressure loss* di bit, psi

Besarnya faktor pangkat (Z) bisa juga ditentukan dengan mengacu pada pendapat (Rabia, H. 1985) sebesar 1,8 dan konstanta kehilangan tekanan ( $K_p$ ) harus terlebih dulu ditentukan sebelum melakukan perhitungan yaitu dengan menggunakan persamaan berikut ini:

$$K_p = \frac{P}{Q^z} \dots\dots\dots(2.17)$$

Keterangan :

- Z = faktor pangkat
- Q = laju alir pompa, gpm
- P = tekanan kerja pompa, psi

#### 2.4.1. *Bit Hydraulic Impact (BHI)*

Prinsip dasar dari konsep ini menganggap bahwa semakin besar *impact* (tumbukan sesaat) yang diterima batuan formasi dari lumpur yang dipancarkan dari pahat semakin besar pula efek pembersihannya, sehingga metode ini berusaha untuk mengoptimalkan *impact* pada bit (Rubiandini, Rudi 2010).

Langkah-langkah untuk menentukan optimasi dengan konsep BHI adalah sebagai berikut:

##### a. Kondisi Lapangan

1. Menghitung kehilangan tekanan di pahat dengan persamaan (2.12):

$$P_b = P_{avg} - P_p$$

2. Menghitung BHI data

$$BHI_{data} = \frac{Q_{data} P_B}{1.714} \dots\dots\dots(2.18)$$

3. Menghitung HPS data

$$HPS_{data} = \frac{Q_{data} P_{data}}{1.714} \dots\dots\dots(2.19)$$

4. Menghitung seberapa besar daya pada pahat yang digunakan untuk membersihkan dasar lubang sumur selama pemboran berlangsung, yaitu dengan membandingkan antara harga  $BHI_{data}$  dengan besar daya pompa yang ada di permukaan (HPS).

$$\frac{BHI_{data}}{HPS_{data}} \times 100 \% \dots\dots\dots(2.20)$$

b. Kondisi Optimasi

1. Menghitung kehilangan tekanan di pahat dengan persamaan (2.13):

$$P_b = \frac{Z}{Z+2} P_m$$

2. Menghitung rate optimum ( $Q_{opt}$ ) dengan persamaan:

$$Q_{opt} = \left[ \frac{2P_m}{(z+2)K_p} \right]^{\frac{1}{z}} \dots\dots\dots(2.21)$$

Jika ( $Q_{opt}$ ) lebih kecil dari ( $Q_{mak}$ ) maka, ( $Q_{opt}$ ) = ( $Q_{mak}$ ).

3. Menghitung daya yang diperlukan di permukaan (HPS) dengan Persamaan

$$HPS_{opt} = \frac{P_{maks} \cdot Q_{opt}}{1.714} \dots\dots\dots(2.22)$$

4. Menghitung besarnya harga  $BHI_{opt}$  dengan Persamaan:

$$BHI_{opt} = \frac{Q_{opt} P_{Bopt}}{1.714} \dots\dots\dots(2.23)$$

5. Menghitung seberapa besar daya pada pahat optimal yang digunakan untuk membersihkan dasar lubang sumur selama pemboran berlangsung, yaitu dengan membandingkan antara harga  $BHI_{opt}$  dengan besar daya pompa yang ada di permukaan  $HPS_{opt}$ .

$$\frac{BHI_{opt}}{HPS_{opt}} \times 100 \% \dots\dots\dots(2.24)$$

#### 2.4.2. Perencanaan Laju Optimum

Optimalisasi operasi pengeboran dapat diperoleh dengan meningkatkan kecepatan pengeboran (Musa dan Egbon, 2011). Variabel utama yang harus ditentukan dalam perencanaan hidrolika pada pahat dimulai dari tekanan pompa optimum dan penentuan laju alir lumpur optimum (I. King, Principia; C.Bratu, 1990). Laju sirkulasi mempunyai efek pada pembersihan lubang bor, stabilitas lubang dan laju penembusan pemboran (ROP).

#### 2.5. Metode Analisis Pengangkatan *Cutting*

Metode yang dipakai dalam menganalisis keberhasilan pengangkatan *cutting* ada 3 (Prayogo Rizal Zulmi, 2016):

1. *Cutting Transport Ratio* (Ft)
2. *Cutting Concentration* (Ca)
3. *Particle Bed Index* (PBI)

Ketiga metode tersebut mengacu pada 3 parameter yang berbeda, namun ketiganya menentukan keberhasilan pengangkatan *cutting* dari anulus ke permukaan, oleh karena itu agar di dapatkan hasil yang baik maka analisa pengangkatan *cutting* tersebut harus optimal. Nilai *cutting transport ratio* dinyatakan optimum jika harga Ft > 90 %, *cutting concentration* (Ca) dinyatakan optimum jika harga Ca < 5 %, dan *particle bed index* (PBI) dinyatakan optimum jika PBI ≥ 1 (Baker Hughes INTEQ 1998).

##### 2.5.1. Kecepatan Kritis Lumpur

Lumpur yang mengalir di anulus mempunyai kecepatan kritis yang menentukan batas antara pola aliran laminar dan turbulen. Pola aliran turbulen merupakan pola aliran yang mempunyai kecepatan lebih besar dari kecepatan kritisnya, begitu juga sebaliknya. Kecepatan kritis lumpur di anulus dapat dihitung dengan persamaan (2.4):

$$V_{can} = \frac{97PV + 97\sqrt{PV^2 + 6,2\rho_m (HD - OD_{DP})^2 YP}}{\rho_m \cdot HD - OD_{DP}}$$

Keterangan :

$V_{can}$  = Kecepatan kritis anulus, fps

$\rho_m$  = Densitas lumpur, ppg

PV = *Plastic Viscosity*, cp

HD = Diameter lubang, inci

Dp = Diameter luar pipa, inci

YP = *Yield Point*, lb/100 ft<sup>2</sup>

### 2.5.2. Kecepatan Aliran Lumpur di Anulus

Lumpur yang mengalir di dalam anulus mempunyai kecepatan alir, yang dapat diukur dengan persamaan (2.2):

$$v_{an} = \frac{24,5Q_{data}}{(HD^2 - ODdp^2)}$$

Keterangan :

$V_{an}$  = kecepatan lumpur di annulus, fps

Q = laju alir pompa, gpm

### 2.5.3. Kecepatan Slip *Cutting*

kecepatan slip dihitung dengan persamaan:

$$V_s = \frac{82,87D_s^2(\rho_s - \rho_f)}{\mu_a} \dots\dots\dots(2.25)$$

Keterangan:

$v_s$  = kecepatan slip partikel, fps

$D_s$  = diameter partikel, in

$\rho_s$  = densitas partikel, ppg

$\rho_f$  = densitas fluida, ppg

$\mu_a$  = *apparent viscosity*, cp

*Apparent Viscosity* dapat ditentukan dengan persamaan:

$$\mu_{anDP} = \frac{K}{144} \left( \frac{DH - ODDp}{VanDP} \right)^{1-n} \left( \frac{2 + 1/n}{0,0208} \right)^n \dots\dots\dots(2.26)$$

Keterangan :

- $\mu_a$  = *apparent viscosity*, cp
- K = indeks konsistensi, eq cp
- n = indeks *power law*
- $v_a$  = kecepatan lumpur di annulus, fps
- HD = diameter lubang, in
- Dp = diameter luar pipa bor, inci

Indeks konsistensi dapat dihitung dengan persamaan:

$$K = \frac{510(PV + YP)}{511^n} \dots\dots\dots(2.27)$$

#### 2.5.4. *Cutting Transport Ratio*

Kecepatan slip *cutting* menyebabkan kecepatan *cutting* terangkat lebih lambat dari kecepatan lumpur di anulus. Kecepatan aliran *cutting* di anulus dapat dihitung dengan persamaan:

$$F_t = \frac{v_a - v_s}{v_a} \dots\dots\dots(2.28)$$

Keterangan:

- $v_p$  = kecepatan partikel *cutting*, fps
- $v_a$  = kecepatan aliran lumpur di annulus, fps
- $v_s$  = kecepatan slip *cutting*, fps
- $F_t$  = *ratio transport cutting*, %

*Cutting* akan terangkat ke permukaan jika harga rasio transportnya positif, untuk kecepatan slip sama dengan nol maka rasio transport bernilai satu yang berarti *cutting* mempunyai kecepatan yang sama dengan lumpur. Rasio transport turun jika kecepatan slip meningkat.

Rasio transport merupakan parameter yang paling baik untuk menggambarkan kapasitas pengangkatan *cutting* oleh lumpur pemboran. Rasio

transport dapat ditingkatkan dengan cara mengurangi kecepatan slip *cutting* atau dengan meningkatkan kecepatan lumpur di annulus (namun juga harus diperhatikan kecenderungan pola aliran menjadi turbulen).

Rasio transport tidak menggambarkan kondisi kebersihan lubang, tetapi dengan meningkatkan rasio transport akan menurunkan konsentrasi *cutting* di annulus. Batas minimal rasio transport adalah 90 %.

#### 2.5.5. *Cutting Concentration*

Konsentrasi *cutting* di annulus dapat ditentukan setelah harga rasio transport diketahui. Konsentrasi *cutting* di annulus diatas 5 % akan menimbulkan masalah seperti penurunan laju penembusan pemboran (ROP) dan *pipe sticking*.

Konsentrasi *cutting* di annulus dapat ditentukan dengan persamaan sebagai berikut:

$$C_a = \frac{(ROP)D^2}{14.7F_tQ} 100\% \dots\dots\dots(2.29)$$

Keterangan :

- $C_a$  = konsentrasi *cutting*, %
- ROP = laju penembusan, fph
- D = diameter pahat, inci
- $F_t$  = rasio transport *cutting*, %
- Q = laju alir lumpur, gpm

Konsentrasi *cutting* di atas 5% dapat diturunkan dengan meningkatkan laju alir lumpur atau meningkatkan rasio transportnya.

#### 2.5.6. *Particle Bed Index*

Analisa pengangkatan *cutting* pada operasi pemboran berarah harus mempertimbangkan adanya inklinasi lintasan lubang terhadap gaya gravitasi bumi yang menyebabkan timbulnya vektor kecepatan *cutting* ke arah dinding lubang bor sehingga *cutting* akan membentuk endapan. Hal ini dikarenakan pada sumur berarah dengan pola aliran lumpur laminar, adanya penyimpangan lintasan sudut lubang bor terhadap gravitasi bumi penyebab adanya kecepatan slip, yang

menyebabkan terjadinya dua arah kecepatan serbuk bor yang merupakan penguraian dari vektor kecepatan slip *cutting*, yaitu  $v_{sa}$  yang searah dengan lintasan sumur dan  $v_{sr}$  yang tegak lurus terhadap lintasan lubang bor, sehingga di dapat persamaan:

$$v_{sa} = v_s \cos \phi \dots\dots\dots(2.30)$$

$$v_{sr} = v_s \sin \phi \dots\dots\dots(2.31)$$

Keterangan:

- $v_{sa}$  = kecepatan slip searah lintasan sumur, fps
- $v_{sr}$  = kecepatan slip radial, fps
- $v_s$  = kecepatan slip searah gravitasi bumi, fps
- $\phi$  = sudut inklinasi lintasan sumur

*Cutting* akan mengendap dalam waktu  $T_s$  dengan adanya  $v_{sr}$  yang dapat ditentukan dengan persamaan:

$$T_s = \frac{1}{12} \frac{(Dh - Dp)}{v_{sr}} \dots\dots\dots(2.32)$$

Keterangan :

- $T_s$  = waktu yang dibutuhkan *cutting* untuk mengendap, sec
- $Dh$  = diameter lubang bor, inci
- $Dp$  = diameter pipa bor, inci

Seberapa jauh jarak yang ditempuh sebelum *cutting* mengendap, dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$L_c = (v_a - v_{sa}) T_s \dots\dots\dots(2.33)$$

Keterangan :

- $L_c$  = jarak yang ditempuh *cutting*, ft
- $v_a$  = kecepatan lumpur di annulus, fps
- $v_{sa}$  = kecepatan slip searah lintasan sumur, fps
- $T_s$  = waktu yang dibutuhkan *cutting* untuk mengendap, sec

*Cutting* telah mengendap sebelum sampai di permukaan jika  $L_c$  lebih pendek dari kedalaman lintasan sumur pada inklinasi tersebut.

*Particle Bed Index (PBI)* merupakan perbandingan waktu antara pengendapan dan waktu tempuh sampai permukaan, dan dapat dinyatakan dalam persamaan:

$$PBI = \frac{1}{12} \frac{(HD - OD)(V_{an} - V_{sa})}{L_c \times V_{sr}} \dots\dots\dots(2.34)$$

Keterangan:

- PBI = *particle Bed Index*
- HD = diameter lubang, inci
- Dp = diameter pipa bor, inci
- V<sub>a</sub> = kecepatan lumpur di anulus
- V<sub>sa</sub> = kecepatan slip searah lintasan sumur, fps
- L<sub>c</sub> = jarak yang ditempuh, ft
- V<sub>sr</sub> = kecepatan slip radial, fps

Setelah harga PBI ditentukan, maka selanjutnya dapat dipakai sebagai acuan sebagai berikut:

- PBI ≥ 1, menunjukkan tidak terjadi pengendapan *cutting*
- PBI = 1, menunjukkan hampir terjadi pengendapan *cutting*
- PBI ≤ 1, menunjukkan *cutting* mengalami pengendapan