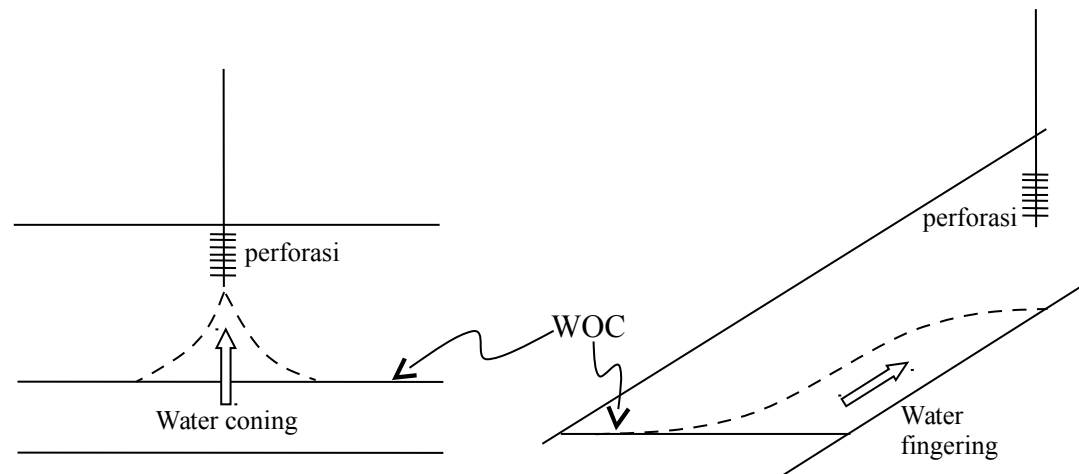


WATER CONING

- Produksi air dari suatu sumur dapat disebabkan oleh karena telah terjadi *water coning* (*cone* = kerucut) atau *water fingering*.
- Water coning → air bergerak dari bagian bawah reservoir secara vertikal menuju bagian bawah perforasi dan membentuk kerucut air sampai terjadi *water breakthrough* (air sampai di perforasi).
- Water fingering (atau *tonguing*) → terjadi pada reservoir miring yaitu jika air bergerak dan menyalip minyak yang berada di atasnya menuju bagian bawah perforasi karena *water-oil contact* (WOC) yang tidak stabil.



WATER CONING

Kondisi yang menyokong terjadi coning:

1. Tekanan sumur (p_{wf}) rendah sehingga menyebabkan *pressure drawdown* tinggi
2. Sumur atau perforasi yang terlalu dekat dengan WOC
3. Tidak ada *permeability barrier* terhadap aliran vertikal.

WATER CONING

Water coning atau *fingering* sampai terjadi water breakthrough di perforasi akan merugikan secara operasional karena:

1. Produktivitas minyak menurun – efek permeabilitas relatif
2. *Lifting cost* menjadi lebih tinggi karena fluida di sumur yang lebih berat dan pembuangan air di permukaan yang lebih banyak
3. *Recovery efficiency* menurun karena *water cut* mencapai *economic limit*.

WATER CONING

Secara historis penanganan produksi air dapat dibagi ke dalam tiga periode:

1. Produksi air dicegah atau dieliminasi

- terjadi pada masa awal diketahui bahwa produksi minyak dapat terganggu dengan terproduksinya air.
- untuk mencegah terproduksinya air:
 - (a) menempatkan barrier di bawah perforasi: *polymer cushion* atau *pancake of cement*
 - (b) mengurangi *pressure drawdown* dengan cara mengurangi laju produksi air.
- Hal yang kedua dilakukan dengan menentukan laju produksi kritis.
- Metode untuk menghitung *critical rate*: metode Meyer & Garder dan metode Chaney *et al.*

WATER CONING

2. Produksi air diperlambat

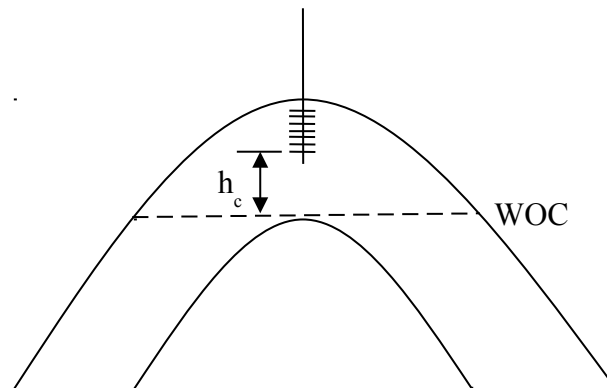
- Dilakukan jika diketahui waktu breakthrough.
- Untuk menghitung waktu breakthrough digunakan metode Sobocinski & Cornelius atau metode Bournazel & Jeanson.

3. Produksi air dibiarkan

- Saat ini praktek produksi minyak dilakukan tanpa mengindahkan produksi air asal minyak masih bisa diperoleh secara ekonomis.
- Muncul metode peramalan produksi air setelah terjadi *water breakthrough* diantaranya adalah metode Kuo & DesBrisay.

WATER CONING

- Produksi terjadi jika terdapat perbedaan tekanan Δp sebesar $(\bar{p} - p_{\text{well}})$.
- Perbedaan tekanan ini menyebabkan batas minyak-air bergerak ke atas, ke arah sumur (perforasi).
- Gerakan dalam arah vertikal terjadi terutama pada sumbu sumur.
- Kerucut air terbentuk bila Δp (psi) melebihi harga tekanan hidrostatik kolom fluida setinggi h_c (yaitu antara batas minyak-air sampai *bottom perforation*).



WATER CONING

Kerucut air (water coning) akan terbentuk jika:

$$\Delta p > 0.433 (\gamma_w - \gamma_o) h_c$$

dimana:

γ : Specific gravity

h_c : Jarak antara perforasi terbawah dengan WOC, ft

Δp : Pressure drawdown pada sumur, psi.

→ Untuk menghindari tembus air lebih awal (*premature breakthrough*) harus diusahakan agar interval perforasi terbawah tetap jauh dari WOC

WATER CONING

- Persoalan water coning menyangkut persoalan penentuan parameter-parameter yang terkait dengan proses kejadiannya.
- Parameter-parameter tersebut akan menentukan terjadi-tidaknya water coning dan kinerja reservoir.
- Dua parameter yang penting adalah: laju alir kritis dan waktu tembus air (*water breakthrough time*).

WATER CONING

Karena itu, persoalan yang harus dijawab dalam menghadapi persoalan water coning adalah:

- Berapakah laju alir kritis, yaitu laju alir maksimum agar tidak terbentuk kerucut air
- Bila kerucut air tidak bisa dihindari, berapa lama air akan sampai di perforasi, yaitu perkiraan waktu tembus air (t_{BT})
- Bagaimanakah kinerja reservoir dengan kerucut air tersebut.

Namun, saat ini praktek produksi minyak sebenarnya tidak terlalu memikirkan jumlah air terproduksi → yang penting minyak tetap terproduksi dan tersedia fasilitas yang memadai untuk mengolah air (*water treating facilities*).

WATER CONING

Kedua parameter (laju alir kritis dan waktu tembus air) menyangkut:

- daerah penyerapan sumur (drainage area),
- sifat fisik fluida,
- completion interval,
- permeabilitas vertikal dan/atau horizontal.

PENENTUAN LAJU KRITIS

Metode penentuan laju alir kritis telah dilakukan oleh berbagai kalangan, diantaranya:

- Meyer dan Garder
- Chierichi *et al.*
- Schols
- Muskat dan Wyckoff
- Wheatley
- Piper dan Gonzalez
- Hoyland *et al.*
- Chaney *et al.*
- Kuo dan DesBrisay (sama dengan metode Schols).

PENENTUAN LAJU KRITIS

Pada dasarnya, semua metode menggunakan persamaan yang sama, yaitu:

$$q_c = \frac{0.003073 h^2 k_o \Delta p}{\mu_o B_o} q_{DC}$$

dimana:

q_c = laju alir kritis minyak, STB/hari

k_o = permeabilitas efektif terhadap minyak, md

h = tebal zone minyak, ft

D = ketebalan interval perforasi, ft

μ_o = viskositas minyak, cp

B_o = factor volume formasi, bbl/STB

q_{DC} = dimensionless critical rate

Δp = $\rho_w - \rho_o$ untuk system air-minyak dan $\Delta p = \rho_o - \rho_g$ untuk system minyak-gas.

PENENTUAN LAJU KRITIS

- Yang membedakan kesemua metode tersebut pada umumnya adalah dalam hal penentuan q_{DC} dalam

$$q_c = \frac{0.003073 h^2 k_o \Delta p}{\mu_o B_o} q_{DC}$$

- Di bawah ini dijelaskan beberapa dari metode untuk menghitung laju alir kritis tersebut.

Metode Meyer dan Garder

Dengan cara analitik untuk sistem isotropik, Meyer dan Garder mendefinisikan:

$$q_{DC} = \frac{1}{2 \ln(r_e/r_w)} \left(1 - \left(\frac{D}{h} \right)^2 \right)$$

Sehingga laju alir kritik minyak untuk sistem air-minyak adalah:

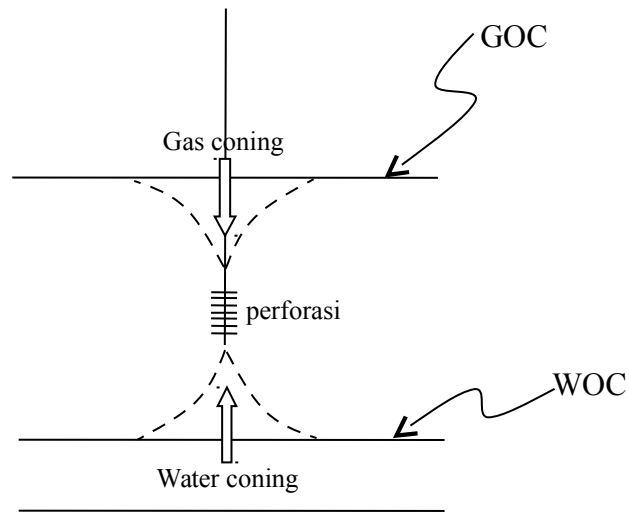
$$q_c = \frac{0.001535(\rho_w - \rho_o)k_o(h^2 - D^2)}{\mu_o B_o \ln(r_e/r_w)}$$

dimana:

ρ_w, ρ_o = masing-masing density air dan minyak, gm/cc

Metode Chaney *et al.*

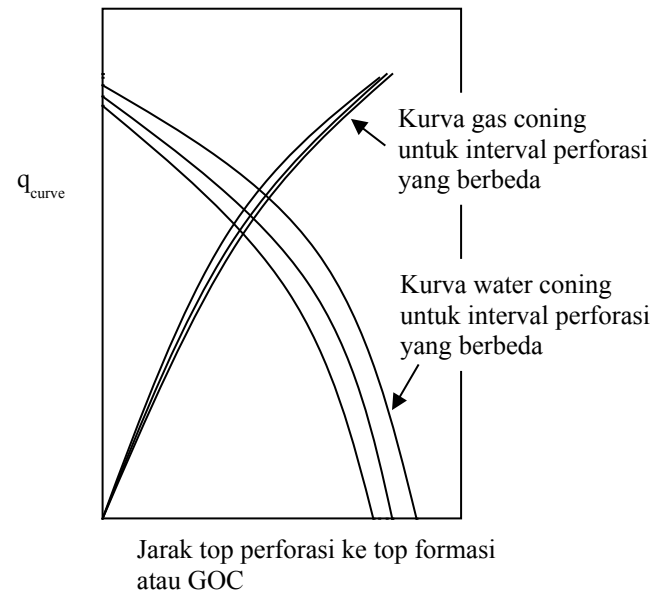
Asumsi yang digunakan oleh Meyer dan Garder sangat restriktif sehingga Chaney *et al.* menawarkan metode alternative yang didasarkan pada solusi analitik dan eksperimental. Metode Chaney *et al.* Dapat digunakan baik untuk persoalan kerucut air maupun untuk kerucut gas.



Menurut Chaney *et al.*:

$$q_c = \frac{0.00333 q_{\text{curve}} k(\rho_w - \rho_o)}{\mu_o B_o}$$

dimana q_{curve} (critical rate dari kurva) diperoleh secara grafis dan merupakan fungsi dari ketebalan zona produktif, interval perforasi, dan jarak top perforasi ke top formasi atau ke GOC (jika ada gas cap). Kurva Chaney *et al.* secara skematik ditunjukkan berikut ini.



Metode Bournazel dan Jeanson

$$q_c = \frac{0.000717 k_h (\rho_w - \rho_o) h_c}{\mu_o B_o}$$

dimana:

k_h = permeabilitas horizontal efektif terhadap minyak, md

h_c = jarak antara perforasi terbawah dengan WOC awal

Metode Schols

Schols mengembangkan persamaan empirik yang telah diverifikasi oleh simulator. Persamaan Schols diperoleh setelah ia mendapatkan:

$$q_{DC} = \frac{1}{2\pi} \left(0.432 + \frac{\pi}{\ln(r_e/r_w)} \right) \left(1 - \left(\frac{D}{h} \right)^2 \right) \left(\frac{r_e}{h} \right)^{-0.14}$$

sehingga laju alir kritis menurut Schols adalah:

$$q_c = \frac{0.003073 h^2 k_o \Delta \rho}{\mu_o B_o} \frac{1}{2\pi} \left(0.432 + \frac{\pi}{\ln(r_e/r_w)} \right) \left(1 - \left(\frac{D}{h} \right)^2 \right) \left(\frac{r_e}{h} \right)^{-0.14}$$

Atau, untuk sistem air-minyak, biasanya ditulis sebagai berikut:

$$q_c = A B C$$

dimana

$$A = \frac{(\rho_w - \rho_o) k_o (h^2 - D^2)}{(2049) \mu_o B_o}$$

$$B = 0.432 + \frac{\pi}{\ln(r_e/r_w)}$$

$$C = \left(\frac{r_e}{h} \right)^{-0.14}$$

Contoh 1: Menghitung Laju Alir Kritis

Untuk harga-harga variabel suatu reservoir bottom water berikut, hitung laju alir kritis menggunakan metode Meyer dan Garder, Chaney *et al.*, Sobocinski dan Cornelius (untuk metode ini lihat penjelasan di bawah), dan Bournazel dan Jeanson. Data: $k_o = 100$ md, $h = 50$ ft, $D = 10$ ft, $\rho_w = 1.05$ gr/cc, $\rho_o = 0.8$ gr/cc, $\mu_o = 1.0$ cp, $B_o = 1.2$ bbl/STB, $r_e = 745$ ft, $r_w = 0.25$ ft.

Penyelesaian:

Metode Meyer dan Garder:

$$q_c = \frac{0.001535(\rho_w - \rho_o)k_o(h^2 - D^2)}{\mu_o B_o \ln(r_e / r_w)}$$
$$q_c = \frac{0.001535(1.05 - 0.8)(100)(50^2 - 10^2)}{(1.0)(1.2) \ln(745 / 0.25)} = 9.6 \text{ STB/hari}$$

Metode Chaney et al.:

$$q_c = \frac{0.00333 q_{\text{curve}} k(\rho_w - \rho_o)}{\mu_o B_o}$$
$$q_c = \frac{0.00333 (280)(100)(1.05 - 0.8)}{(1.0)(1.2)} = 19.4 \text{ STB/hari}$$

Catatan: $q_{\text{curve}} = 280$ diperoleh dari kurva untuk $h = 50$ ft, $r_w = 3$ in., radius pengurasan sumur = 1000 ft, dengan interval perforasi = 10 ft (asumsi perforasi di top dari zona minyak yaitu sejauh mungkin dari WOC). Kurva ini tersedia dalam Ref. Smith, Tracy, dan Farrar halaman 13-8 (Figure 13-3).

Metode Sobocinski dan Cornelius:

Dengan $Z = 3.5$ berdasarkan formulasi $(t_d)_{BT}$ dari Kuo dan Des Brisay maka:

$$q_c = \frac{0.000877(\rho_w - \rho_o)(k_h)(h h_c)}{\mu_o B_o}$$

$$q_c = \frac{0.000877(1.05 - 0.8)(100)(50)(50 - 10)}{(1.0)(1.2)} = 36.5 \text{ STB/hari}$$

Metode Bournazel dan Jeanson:

$$q_c = \frac{0.000717k_h(\rho_w - \rho_o)h.h_c}{\mu_o B_o}$$

$$q_c = \frac{0.000717(100)(1.05 - 0.8)(50)(50 - 10)}{(1.0)(1.2)} = 29.9 \text{ STB/hari}$$

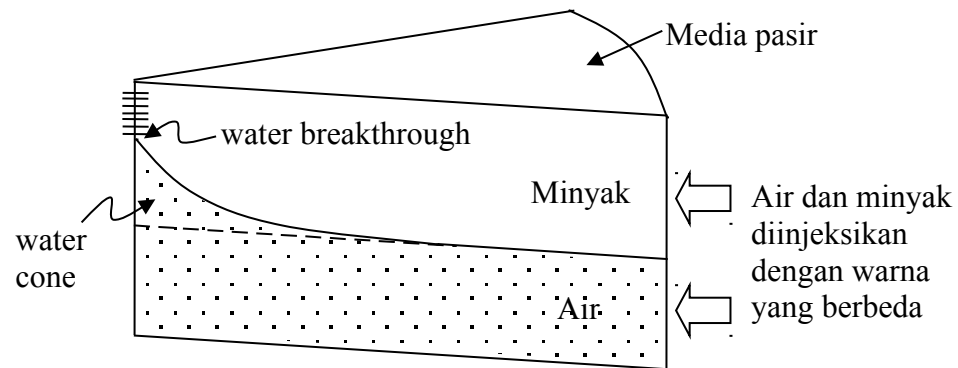
Catatan:

Terlihat bahwa perbedaan antara harga-harga q_c hasil perhitungan berbagai metode di atas cukup signifikan. Menurut Tracy, harga q_c yang dihasilkan oleh metode Bournazel dan Jeanson merupakan yang paling dekat dengan kenyataan di lapangan dibandingkan dengan harga hasil metode lainnya. Namun demikian, terlepas dari perbedaan harga q_c masing-masing metode tersebut, keempat metode kenyataannya memprediksi q_c yang relatif terlalu rendah secara ekonomis.

Penentuan Waktu Tembus Air

Metode Sobocinski dan Cornelius:

Metode ini menentukan waktu tembus air (time to breakthrough) dari air ketika laju produksi lebih besar dari laju produksi kritis. Metode ini didasarkan pada studi eksperimental yang memodelkan aliran di dekat sumur seperti ditunjukkan secara skematik berikut ini:



Berdasarkan eksperimen tersebut, Sobocinski dan Cornelius mendapatkan dimensionless cone height (Z) dan dimensionless time (t_d) masing-masing sebagai berikut:

Dimensionless cone height:

$$Z = \frac{0.00307(\rho_w - \rho_o)(k_h)(h h_c)}{\mu_o B_o q_o}$$

Dimensionless time:

$$t_d = \frac{0.00137(\rho_w - \rho_o)(k_h)(1 + M^\alpha) t}{\mu_o \phi h F_k}$$

dimana:

ρ_w, ρ_o = masing-masing densitas air dan minyak, gr/cc

k_h = permeabilitas horizontal, md

h = ketebalan zona minyak, ft

h_c = ketinggian kerucut air pada saat breakthrough yaitu sama dengan jarak dari WOC awal ke bagian bawah perforasi, ft

μ_o = viskositas minyak, cp

ϕ = porositas, fraksi

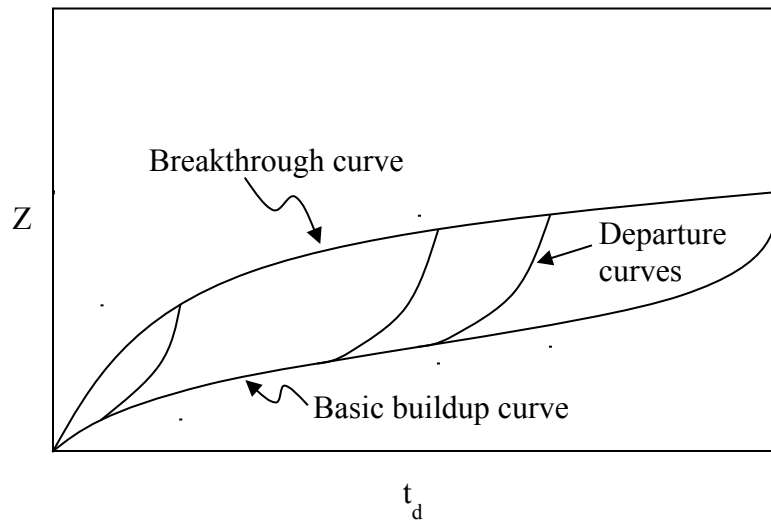
α = konstanta, dimana untuk $M < 1$ maka $\alpha = 0.5$, dan untuk $M \geq 1$, $\alpha = 0.6$. M adalah mobility ratio.

$$F_k = \frac{k_h}{k_v}$$

$$M = \frac{\lambda_w}{\lambda_o}$$

$$t_d = \frac{t}{t_{BT}}$$

Hubungan antara Z dan t_d ditunjukkan oleh kurva yang secara skematik terlihat seperti berikut ini:



Untuk menghitung time to breakthrough, t_{BT} , maka digunakan kurva “breakthrough.” Kurva-kurva “buildup” dan “departure” hanya digunakan untuk mempelajari pengembangan coning. Sobocinski dan Cornelius menemukan bahwa kerucut air umumnya terbentuk secara perlahan sampai ujung kerucut mendekati perforasi (titik dimana terjadi percepatan “cone buildup”) sehingga selanjutnya kerucut tumbuh lebih cepat. Untuk menentukan time to breakthrough dilakukan prosedur berikut:

1. Hitung Z dengan persamaan di atas.
2. Dengan harga Z tersebut, gunakan “breakthrough curve” (lihat Ref. Smith, Tracy, dan Farrar) untuk menentukan t_d .
3. Hitung t_{BT} dengan persamaan di atas, dimana:

$$t_{BT} = \frac{\mu_o \phi h F_k t_d}{0.00137(\rho_w - \rho_o)(k_h)(1 + M^\alpha)}$$

Metode Bournazel dan Jeanson:

Bournazel dan Jeanson menemukan bahwa time to breakthrough yang mereka hitung selalu lebih kecil dari yang dihitung oleh Sobocinski dan Cornelius. Oleh karena itu, mereka melakukan modifikasi terhadap persamaan Sobocinski dan Cornelius. Perubahan yang mereka lakukan adalah:

1. Membuat persamaan t_d sebagai fungsi dari Z untuk menggantikan kurva “breakthrough” $(t_d)_{BT}$ vs. Z dari Sobocinski dan Cornelius.
2. Menetapkan $\alpha = 0.7$ untuk semua harga M dalam interval $0.14 \leq M \leq 7.3$.

Jadi, menurut Bournazel dan Jeanson, time to breakthrough adalah:

$$t_{BT} = \frac{\mu_o \phi h F_k (t_d)_{BT}}{0.00137(\rho_w - \rho_o)(k_h)(1 + M^{0.7})}$$

dimana:

$$(t_d)_{BT} = \frac{Z}{3.0 - (0.7)Z}$$

Z = dimensionless cone height (Sobocinski dan Cornelius), yaitu:

$$Z = \frac{0.00307(\rho_w - \rho_o)(k_h)(h h_c)}{\mu_o B_o q_o}$$

Satuan yang digunakan sama seperti satuan yang digunakan dalam metode Sobocinski dan Cornelius.

Metode Kuo dan DesBrisay:

Kuo dan DesBrisay melakukan review terhadap hampir seluruh metode yang telah dipublikasikan sebelumnya. Selanjutnya, dengan menggunakan model coning numerik, mereka menambahkan, memodifikasi, mengembangkan sebuah korelasi untuk prediksi kinerja water coning, yaitu menghitung water-cut untuk reservoir bottom water. Menurut Kuo dan DesBrisay, kurva breakthrough dari Sobocinski dan Cornelius yang berbentuk hiperbolik dapat digantikan oleh persamaan:

$$(t_d)_{BT} = \frac{Z(16 + 7Z - 3Z^2)}{4(7 - 2Z)}$$

Berdasarkan persamaan di atas terlihat bahwa untuk harga $Z = 3.5$ maka harga $(t_d)_{BT}$ akan berharga infinite. Menurut Tracy, hal ini berarti bahwa pada harga $Z = 3.5$ (atau infinite $(t_d)_{BT}$), laju alir yang terjadi adalah laju alir kritis. Oleh karena itu, dengan memasukkan harga $Z = 3.5$ ke dalam persamaan Sobocinski dan Cornelius diperoleh:

$$3.5 = \frac{0.00307(\rho_w - \rho_o)(k_h)(h h_c)}{\mu_o B_o q_o}$$

atau

$$q_o = q_c = \frac{0.000877(\rho_w - \rho_o)(k_h)(h h_c)}{\mu_o B_o}$$

Namun, seperti dijelaskan pada bagian berikut ini, Kuo dan DesBrisay menggunakan formulasi Schols untuk menghitung laju alir kritis.

Peramalan Kinerja Reservoir Dengan Kerucut Air

Di atas telah dijelaskan bahwa berdasarkan metode yang telah dipublikasikan sebelumnya, Kuo dan DesBrisay telah mengembangkan metode untuk memperkirakan kinerja water-cut untuk reservoir bertenaga dorong bottom water. Dalam hal ini, mereka menggunakan metode Bournazel dan Jeanson untuk menghitung time to breakthrough. Berdasarkan model coning numerik yang mereka gunakan, Kuo dan DesBrisay memulai produksi air pada harga t_{BT} sama dengan setengah harga t_{BT} dari Bournazel dan Jeanson, yaitu:

$$t_{BT}^* = \frac{1}{2} t_{BT, (Bournazel \& Jeanson)}$$

Kinerja yang dihitung adalah setelah tembus air karena produksi kumulatif total sampai waktu tembus air adalah sama dengan $q_o \times t_{BT}$ tanpa ada air yang terproduksi. Untuk penentuan kinerja water cut tersebut, Kuo dan DesBrisay mendefinisikan dua parameter dimensionless, t_d dan $(WC)_d$ sebagai berikut:

$$t_d = \frac{t}{t_{BT}}$$

$$(WC)_d = \frac{WC}{(WC)_{limit}}$$

$$(WC)_{limit} = \frac{Mh_w}{Mh_w + h_0}, \text{ dengan } M = \frac{\lambda_w}{\lambda_0}$$

dimana:

t_d = dimensionless time

t = waktu nyata, hari

t_{BT} = time to breakthrough menurut Bournazel dan Jeanson, hari

$(WC)_d$ = dimensionless water cut

WC = water cut nyata, fraksi.

Untuk menghitung $(WC)_{limit}$, diperlukan asumsi tambahan. Asumsi tersebut adalah bahwa hanya terjadi aliran air pada arah vertikal dengan tekanan konstan dan luas permukaan konstan. Dengan asumsi ini, maka dengan menggunakan material balance diperoleh:

$$h_o = H_o \left[1 - \left(\frac{N_p}{N} \right) \frac{1 - S_{wc}}{1 - S_{wc} - S_{or}} \right]$$
$$h_w = H_w + H_o \left[\left(\frac{N_p}{N} \right) \frac{1 - S_{wc}}{1 - S_{wc} - S_{or}} \right]$$

dimana:

H_o = original oil zone thickness (antara WOC dengan top dari zone minyak), ft

H_w = original water zone thickness, ft

h_o, h_w = masing-masing ketebalan zone minyak dan air pada saat ini, ft

S_{wc} = Saturasi air konat, fraksi

S_{or} = Saturasi minyak residual, fraksi

N_p = Produksi minyak kumulatif, STB

N = Isi awal minyak di tempat, STB

Selanjutnya, hubungan antara dimensionless water cut $(WC)_d$ dengan waktu sebagai berikut :

$$(WC)_d = 0 \quad \text{untuk } t_d < 0.5$$

$$(WC)_d = 0.94 \log t_d + 0.29 \quad \text{untuk } 0.5 \leq t_d \leq 5.7$$

$$(WC)_d = 1.0 \quad \text{untuk } t_d > 5.7$$

Metode peramalan water cut dengan metode Kuo dan DesBrisay ini dilakukan dengan cara coba-coba dengan prosedur sebagai berikut:

1. Tentukan laju produksi kritis menggunakan persamaan Bournazel dan Jeanson:

$$q_c = \frac{0.000717(k_h)(\rho_w - \rho_o)(h)(h_c)}{\mu_o B_o} \text{ STB/hari}$$

h_c adalah jarak antara WOC dengan lubang perforasi terbawah, ft

Catatan: peramalan dilakukan ketika $q_T > q_c$, sehingga terjadi coning. Sebelum tembus air maka yang terjadi adalah $q_o = q_T$

2. Tentukan t_{BT} dengan prosedur sebagai berikut:

Hitung Z dengan metode Sobocinski dan Cornelius:

$$Z = \frac{0.00307(\rho_w - \rho_o)(k_h)(h.h_c)}{\mu_o B_o q_o}$$

Berdasarkan harga Z tersebut, hitung waktu breakthrough dengan metode Bournazel dan Jeanson:

$$(t_d)_{BT} = \frac{Z}{3.0 - (0.7)Z}$$

Hitung waktu breakthrough dengan metode Bournazel dan Jeanson, yaitu menggunakan persamaan Sobocinski dan Cornelius dengan $\alpha = 0.7$, yaitu:

$$t_{BT} = \frac{\mu_o \phi h F_k (t_d)_{BT}}{0.00137(\rho_w - \rho_o)(k_h)(1 + M^{0.7})}$$

$$\text{dimana: } F_k = \frac{k_h}{k_v}$$

3. Gunakan waktu tembus air t_{BT} sama dengan setengah harga t_{BT} dari Bournazel dan Jeanson di atas, yaitu:

$$t_{BT}^* = \frac{1}{2} t_{BT}$$

4. Hitung produksi kumulatif minyak sampai waktu tembus air berdasarkan batasan t_{BT}^* di atas, sehingga:

$$N_{p|_{BT}} = (t_{BT}^*) q_T, \text{ STB}$$

5. Lakukan peramalan mulai dari waktu tembus air dengan anggapan pertambahan produksi minyak sebesar ΔN_p selama Δt_{ang} .

$$N_{p_{j+1}} = N_{p|_{BT}} + \Delta N_p$$

atau

$$n_{j+1} = n_j + \Delta n, \text{ dimana } n_j = \frac{N_{p_j}}{N}$$

6. Tentukan h_w dan h_o dengan menggunakan metode Kuo dan DesBrisay:

$$h_w = H_w + H_o \left[n_{j+1} \left(\frac{1 - S_{wc}}{1 - S_{wc} - S_{or}} \right) \right]$$

$$h_o = H_o \left[1 - n_{j+1} \left(\frac{1 - S_{wc}}{1 - S_{wc} - S_{or}} \right) \right]$$

7. Hitung $(WC)_{lim}$, dimana:

$$(WC)_{limit} = \frac{Mh_w}{Mh_w + h_o}$$

8. Tentukan $(WC)_d$. Untuk ini diperlukan t_d dimana:

$$t_d = \frac{t_{BT}^* + \Delta t}{t_{BT}^*}$$

Berdasarkan harga t_d ini pilih persamaan $(WC)_d$ berikut:

$$\begin{aligned} (WC)_d &= 0 && \text{jika } t_d < 0.5 \\ (WC)_d &= 0.94 \log t_d + 0.29 && \text{jika } 0.5 \leq t_d \leq 5.7 \\ (WC)_d &= 1.0 && \text{jika } t_d > 5.7 \end{aligned}$$

9. Tentukan water cut nyata dimana:

$$(WC) = (WC)_d (WC)_{lim}$$

dan gunakan definisi water cut, yaitu:

$$(WC) = f_w$$

10. Hitung laju alir minyak dengan water cut di atas:

$$q_{oj+1} = (1 - f_{wj+1}) q_T$$

Ingat bahwa sampai waktu breakthrough, yang terproduksi hanya minyak, sehingga laju alir minyak sampai waktu breakthrough adalah

$$q_{oj} = q_o|_{BT} = q_T$$

Gunakan laju alir minyak rata-rata sebagai berikut:

$$\bar{q}_o = \frac{q_{oj+1} + q_{oj}}{2}$$

11. Hitung waktu yang dibutuhkan untuk mendapatkan tambahan kumulatif minyak jika laju alir minyak adalah laju alir rata-rata:

$$\Delta t_{hit} = \frac{\Delta N_p}{\bar{q}_o}$$

12. Bandingkan Δt_{hit} dengan Δt_{ang}

$$\frac{|\Delta t_{ang} - \Delta t_{hit}|}{\Delta t_{ang}} < \varepsilon . \text{ Bila memenuhi lanjutkan dengan selang produksi selanjutnya. Jika tidak memenuhi kembali ke Langkah 8.}$$

Contoh 2: Peramalan Kinerja Reservoir Dengan Water Coning 1

Suatu reservoir minyak dengan bottom water drive dan berpotensi terjadi water coning memiliki data sebagai berikut:

$H_o = 42$ ft, $H_w = 60$ ft, $q_t = 100$ STB/hari, $k_h = 90$ md, $F_k = k_h/k_v = 10$, $M = \lambda_w/\lambda_o = 3.27$, N (volume minyak pada daerah pengurasan sumur) = 4.2×10^6 STB, $S_{wc} = 0.288$, $S_{or} = 0.331$. Tembus air (breakthrough) terjadi pada $t_{BT} = 104.5$ hari. Peramalan untuk $\Delta t_1 = 61$ hari setelah tembus air menghasilkan $(\Delta N_p)_1 = 5000$ STB dengan $q_o = 60.6$ STB/hari. Jika peramalan selanjutnya yang menghasilkan $(\Delta N_p)_2 = 5000$ STB dengan menggunakan anggapan Δt , $(\Delta t)_{ang} = 92$ hari, tentukan apakah anggapan $\Delta t_{ang} = 92$ hari tersebut sudah memenuhi kriteria:

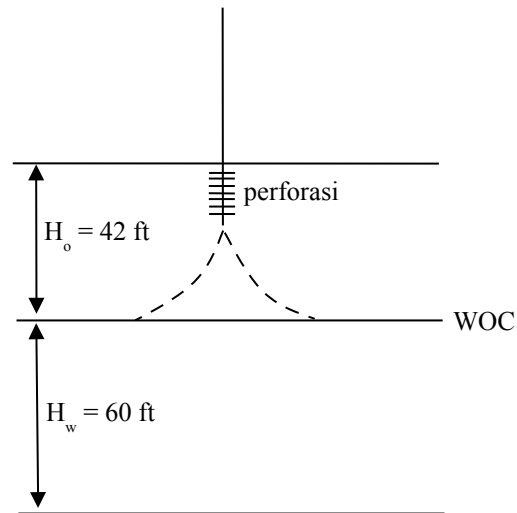
$$\frac{\Delta t_{ang} - \Delta t_{hit}}{\Delta t_{ang}} < \varepsilon , \text{ dimana } \varepsilon = 0.05.$$

Jika tidak, lakukan perhitungan dengan menggunakan:

$$\Delta t_{ang}^* = \frac{\Delta t_{ang} - \Delta t_{hit}}{2}$$

Penyelesaian:

Secara skematik reservoir bottom water tersebut jika terjadi water coning terlihat sebagai berikut:



Dalam melakukan peramalan untuk timestep yang kedua maka gunakan data hasil peramalan timestep pertama:

Dari data pada timestep pertama diketahui:

Anggap $t_{BT}^* = 104.5$ hari, maka produksi kumulatif minyak sampai waktu tembus air berdasarkan batasan t_{BT}^* di atas adalah:

$$N_{p|_{BT}} = (t_{BT}^*) q_T, \text{ STB}$$

$$N_{p|_{BT}} = (104.5)(100) = 10,450 \text{ STB}$$

sehingga dengan pertambahan produksi minyak $\Delta N_p = 5000 \text{ STB}$ selama $\Delta t = 61$ hari dengan $q_o = 60.6 \text{ STB/hari}$.

$$N_{p_j} = N_{p|_{BT}} + \Delta N_p$$

$$N_{p_j} = 10,450 + 5000 = 15,450 \text{ STB}$$

atau

$$n_j = \frac{N_{p_j}}{N} = \frac{15,450}{4.2 \times 10^6} = 3.68 \times 10^{-3}$$

Sekarang, untuk peramalan pada timestep kedua dengan pertambahan produksi minyak $\Delta N_p = 5000$ STB selama $\Delta t_{ang} = 92$ hari .

$$N_{p_{j+1}} = N_{p_j} + \Delta N_{p_2}$$

$$N_{p_{j+1}} = 15,450 + 5000 = 20,450 \text{ STB}$$

atau

$$n_{j+1} = \frac{N_{p_{j+1}}}{N} = \frac{20,450}{4.2 \times 10^6} = 4.87 \times 10^{-3}$$

Maka diperoleh h_w dan h_o setelah timestep kedua:

$$h_w = H_w + H_o \left[n_{j+1} \left(\frac{1 - S_{wc}}{1 - S_{wc} - S_{or}} \right) \right]$$

$$h_w = 60 + 42 \left[4.87 \times 10^{-3} \left(\frac{1 - 0.288}{1 - 0.288 - 0.331} \right) \right] = 60.39 \text{ ft}$$

$$h_o = H_o \left[1 - n_{j+1} \left(\frac{1 - S_{wc}}{1 - S_{wc} - S_{or}} \right) \right]$$

$$h_o = 42 \left[1 - 4.87 \times 10^{-3} \left(\frac{1 - 0.288}{1 - 0.288 - 0.331} \right) \right] = 41.61 \text{ ft}$$

Sehingga

$$(WC)_{\text{limit}} = \frac{Mh_w}{Mh_w + h_o}$$

$$(WC)_{\text{limit}} = \frac{(3.27)(60.39)}{(3.27)(60.39) + 41.61} = 0.826$$

dan karena

$$t_d = \frac{t_{BT}^* + \Delta t}{t_{BT}^*}$$

$$t_d = \frac{t_{BT}^* + \Delta t_1 + \Delta t_2}{t_{BT}^*}$$

$$t_d = \frac{104.5 + 61 + 92}{104.5} = 2.464, \text{ yaitu berada pada selang } 0.5 \leq t_d \leq 5.7$$

maka:

$$(WC)_d = 0.94 \log t_d + 0.29$$

$$(WC)_d = 0.94 \log (2.464) + 0.29 = 0.658$$

Dengan demikian water cut nyata dapat dihitung, dimana:

$$(WC) = (WC)_d(WC)_{\text{lim}}$$

$$(WC) = f_w = (0.658)(0.826) = 0.5435$$

Sehingga:

$$q_{oj+1} = (1 - f_{wj+1})q_T$$

$$q_{oj+1} = (1 - 0.5435)(100) = 45.65$$

Sampai waktu breakthrough, yang terproduksi hanya minyak:

$$q_{oj-1} = q_o|_{BT} = q_T = 100 \text{ STB/hari}$$

Sedangkan setelah breakthrough berdasarkan data pada timestep pertama:

$$q_{oj} = q_o|_{\text{after BT}} = 60.6 \text{ STB/hari}$$

Sehingga laju alir minyak rata-rata:

$$\bar{q}_o = \frac{q_{oj+1} + q_{oj}}{2}$$

$$\bar{q}_o = \frac{45.65 + 60.6}{2} = 53.1 \text{ STB/hari}$$

dan waktu yang dibutuhkan untuk mendapatkan tambahan kumulatif minyak sebesar $\Delta N_p = 5000 \text{ STB}$ jika laju alir minyak rata-rata = 53.1 STB/hari adalah:

$$\Delta t_{\text{hit}} = \frac{\Delta N_p}{\bar{q}_o}$$

$$\Delta t_{\text{hit}} = \frac{5000}{53.1} = 94.16 \text{ hari}$$

dan bila dibandingkan dengan Δt_{ang}

$$\frac{|92 - 94.16|}{92} = 0.0235, \text{ yaitu memenuhi kriteria ketelitian } \varepsilon < 0.05.$$

Contoh 3: Peramalan Kinerja Reservoir Dengan Water Coning 2

Suatu reservoir minyak dengan bottom water drive dan berpotensi terjadi water coning memiliki data sebagai berikut:

$H_o = 42$ ft, $H_w = 60$ ft, $h_c = 21$ ft, $q_t = 100$ STB/hari (konstan dari sebelum sampai sesudah breakthrough), $k_h = 90$ md, $F_k = k_h/k_v = 10$, $M = \lambda_w/\lambda_o = 3.27$, $S_{wc} = 0.288$, $S_{or} = 0.337$, $\phi = 0.25$, $D = 21$ ft, $r_e = 1053$ ft, $r_w = 0.29$ ft, $\mu_o = 1.44$, $\rho_w = 1.095$ gr/cc, $\rho_o = 0.861$ gr/cc, $Bo = 1.102$ bbl/STB, $\epsilon = 0.05$.

Lakukan peramalan kinerja reservoir menggunakan prosedur Kuo dan DesBrisay.

Penyelesaian:

Prosedur peramalan memerlukan data N yang terhitung sebagai:

$$N = \frac{\pi(r_e^2 - r_w^2)h\phi(1 - S_{wc})}{5.615 B_o} \text{ STB}$$

$$N = \frac{\pi(1053^2 - 0.29^2)(42)(0.25)(1 - 0.288)}{5.615(1.102)} = 4.21 \times 10^6 \text{ STB}$$

Dengan mengikuti prosedur peramalan dari Kuo and DesBrisay, maka diperoleh hasil perhitungan sebagai berikut:

$$1. \quad q_c = \frac{0.000717(90)(1.095 - 0.861)(42)(21)}{(1.44)(1.102)} = 8.4 \text{ STB/hari}$$

$$2. \quad Z = \frac{0.00307(1.095 - 0.861)(90)(42)(21)}{(1.44)(1.102)(100)} = 0.359$$

$$(t_d)_{BT} = \frac{0.359}{3.0 - (0.7)(0.359)} = 0.131$$

$$t_{BT} = \frac{(1.44)(0.25)(42)(10)(0.131)}{0.00137(1.095 - 0.861)(90)(1 + 3.27^{0.7})} = 208.5 \text{ hari}$$

$$3. \quad t_{BT}^* = \frac{1}{2}(208.5) = 104.5 \text{ hari}$$

$$4. \quad N_p|_{BT} = (104.5)(100) = 10,450 \text{ STB}$$

$$5. \quad \text{Anggapan } \Delta N_p = 5000 \text{ STB selama } \Delta t_{ang} = 40 \text{ hari:}$$

Untuk timestep pertama setelah breakthrough

$$N_{p_j} = N_p|_{BT} = 10,450 \text{ STB, sehingga}$$

$$N_{p_{j+1}} = N_{p_j} + \Delta N_p = 10,450 + 5000 = 15,450 \text{ STB, atau}$$

$$n_{j+1} = \frac{15,450}{4.21 \times 10^6} = 0.00367$$

$$6. \quad h_w = 60 + 42 \left[0.00367 \left(\frac{1 - 0.288}{1 - 0.288 - 0.337} \right) \right] = 60.29 \text{ ft}$$

$$h_o = 42 \left[1 - 0.00367 \left(\frac{1 - 0.288}{1 - 0.288 - 0.337} \right) \right] = 41.71 \text{ ft}$$

$$7. \quad (WC)_{limit} = \frac{(3.27)(60.29)}{(3.27)(60.29) + 41.71} = 0.825$$

$$8. \quad t_d = \frac{104.5 + 40}{104.5} = 1.383, \text{ yaitu berada pada selang } 0.5 \leq t_d \leq 5.7, \text{ sehingga}$$

$$(WC)_d = 0.94 \log(1.383) + 0.29 = 0.421$$

$$9. \quad (WC) = f_w = (0.421)(0.825) = 0.348$$

$$10. \quad q_{oj+1} = (1 - 0.348)(100) = 62.2 \text{ STB/hari}$$

Untuk timestep pertama setelah breakthrough:

$$q_{oj} = q_o|_{BT} = 100 \text{ STB/hari, sehingga}$$

$$\bar{q}_o = \frac{100 + 62.2}{2} = 81.1 \text{ STB/hari}$$

$$11. \Delta t_{hit} = \frac{5000}{81.1} = 61.7 \text{ hari}$$

$$12. \frac{|40 - 61.7|}{40} = 0.54, \text{ yaitu lebih besar dari kriteria ketelitian } \varepsilon = 0.05.$$

13. Gunakan anggapan baru dimana $\Delta t_{ang} = \Delta t_{hit} = 61.7$ hari. Kembali ke Langkah 8.

$$8. t_d = \frac{104.5 + 61.7}{104.5} = 1.590, \text{ yaitu berada pada selang } 0.5 \leq t_d \leq 5.7, \text{ sehingga}$$

$$(WC)_d = 0.94 \log(1.590) + 0.29 = 0.479$$

$$9. (WC) = f_w = (0.479)(0.825) = 0.395$$

$$10. q_{oj+1} = (1 - 0.395)(100) = 60.5 \text{ STB/hari}$$

Untuk timestep pertama setelah breakthrough:

$$q_{oj} = q_o|_{BT} = 100 \text{ STB/hari, sehingga}$$

$$\bar{q}_o = \frac{100 + 60.5}{2} = 80.25 \text{ STB/hari}$$

$$11. \Delta t_{hit} = \frac{5000}{80.25} = 62.3 \text{ hari}$$

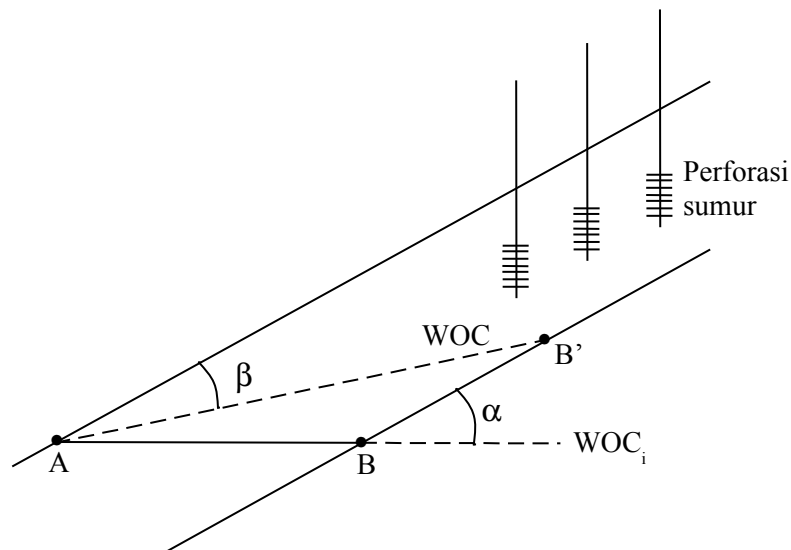
$$12. \frac{|61.7 - 62.3|}{61.7} = 0.0097, \text{ yaitu memenuhi kriteria ketelitian } \varepsilon = 0.05.$$

13. Lanjutkan peramalan, yaitu kembali ke Langkah 5. Begitu seterusnya. Tabel berikut adalah contoh hasil peramalan tersebut. Bagaimanakah perhitungan tersebut jika $\Delta N_p = 1000$ STB?

Tabel: Hasil Perhitungan Metode Kuo dan DesBrisay Untuk Contoh 3

j	t (hari)	N_{pj}	h_{wj}	h_{oj}	(WC)	\bar{q}_j	ϵ
BT	104.1	10,407	60.00	42.00	0.000	100.00	-
1	165.8	15,407	60.29	41.71	0.396	80.189	0.01058
2	260.5	20,407	60.39	41.61	0.549	52.746	0.00099
3	391.0	25,407	60.48	41.52	0.686	38.245	0.00182
4	597.1	30,407	60.58	41.42	0.830	24.204	0.00232
5	888.8	35,407	60.67	41.33	0.828	17.137	0.00023
6	1179.3	40,407	60.77	41.23	0.828	17.213	0.00007
7	1470.7	45,407	60.86	41.14	0.829	17.158	0.00003
8	1763.0	50,407	60.96	41.04	0.829	17.103	0.00015
9	2056.3	55,407	61.05	40.95	0.830	17.049	0.00007
10	2350.5	60,407	61.14	40.86	0.830	16.994	0.00008

Pada awal bab ini telah disinggung tentang fenomena tembus air yang diakibatkan oleh kejadian *fingering* (atau *tonguing*). Fingering terjadi akibat ketidakstabilan water-oil contact pada reservoir bottom water yang mempunyai kemiringan. Karena sumur produksi berada di atas water-oil contact (berada di bagian atas struktur) dari reservoir yang miring, dan mungkin pula ditambah oleh akibat gejala geologi dan/atau efek kapileritas, maka water-oil contact juga dapat berada dalam keadaan tidak horizontal. Untuk melakukan analisis batas air minyak yang tidak horizontal tersebut, tinjau skema berikut:



Jika produksi dilakukan pada laju yang terlalu tinggi, maka water-oil contact dapat menjadi tidak stabil karena air bergerak menuju sumur produksi pada bagian bawah struktur mendahului minyak yang berada pada bagian atas struktur. Akibatnya water-oil contact yang semula pada posisi A-B menjadi A-B' seperti terlihat pada gambar skematik di atas. Untuk reservoir yang mempunyai lapisan tunggal, hal ini hanya akan terjadi jika terdapat keadaan *unfavorable*, yaitu mobility ratio, M , lebih besar dari 1.0. Dalam hal ini, air lebih mudah bergerak dibandingkan

dengan minyak. Karena pada umumnya densitas air lebih besar daripada densitas minyak maka gravity force akan menyebabkan air cenderung tetap bergerak di bawah minyak. Akan tetapi jika laju alir sangat tinggi, maka akan terjadi ketidakseimbangan dinamis antara viscous force dan gravity force sehingga dengan keadaan unfavorable ($M > 1$) water-oil contact menjadi tidak stabil. Sebaliknya, pada laju alir yang rendah maka water-oil contact akan stabil dan bidang kontak bergerak secara horizontal. Jadi, yang dimaksud dengan water-oil contact stabil adalah sudut antara bidang kontak dengan bidang struktur (yaitu sudut α) adalah konstan. Jika karena sesuatu hal seperti disebutkan di atas bidang kontak tidak horizontal, maka water-oil contact yang stabil artinya sudut β (yaitu sudut antara bidang kontak dengan bidang struktur) konstan. Dengan kata lain, water-oil contact yang tidak stabil artinya sudut β berkurang terhadap waktu yang dalam hal ini disertai keadaan dimana air mendahului minyak. Penjelasan lebih lanjut mengenai hal ini akan disampaikan pada Bab V: Segregation Drive.

Hubungan antara sudut β , sudut α , gravity forces, dan mobility ratio adalah:

$$\tan \beta = \frac{[G - (M - 1)] \tan \alpha}{G}$$

dimana

$$G = \frac{0.488(\gamma_w - \gamma_o)k A k_{rw} \sin \alpha}{q_t \mu_w}$$

$$M = \frac{k_w / \mu_w}{k_o / \mu_o} = \frac{k_{rw} / \mu_w}{k_{ro} / \mu_o}$$

Observasi:

- Jika $M = 1.0$, maka water-oil contact akan tetap stabil, berapapun laju produksi
- Jika $M < 1.0$, maka water-oil contact pasti stabil, tidak mungkin tidak stabil. Kenyataannya, sudut β akan cenderung lebih besar dibandingkan dengan sudut α .

- Jika $G > (M-1)$, maka water-oil contact akan stabil.
- Jika $G < (M-1)$, maka water-oil contact akan tidak stabil

Jadi, ketidakstabilan hanya akan terjadi jika $M > 1$. Dengan asumsi $M > 1$, maka ketidakstabilan tersebut akan terjadi ketika $G = (M-1)$. Oleh karena itu, "laju alir kritis," yaitu laju maksimum supaya water-oil contact tetap dalam keadaan stabil diperoleh dengan substitusi $G = M - 1$ pada persamaan di atas untuk mendapatkan $(q_t)_{\text{critical}}$, yaitu:

$$\frac{k_{rw}/\mu_w}{k_{ro}/\mu_o} - 1 = \frac{0.488(\gamma_w - \gamma_o)k A k_{rw} \sin \alpha}{q_t \mu_w}$$

atau

$$(q_t)_{\text{critical}} = \frac{0.488(\gamma_w - \gamma_o)k A \sin \alpha}{\frac{\mu_o}{k_{ro}} - \frac{\mu_w}{k_{rw}}}$$