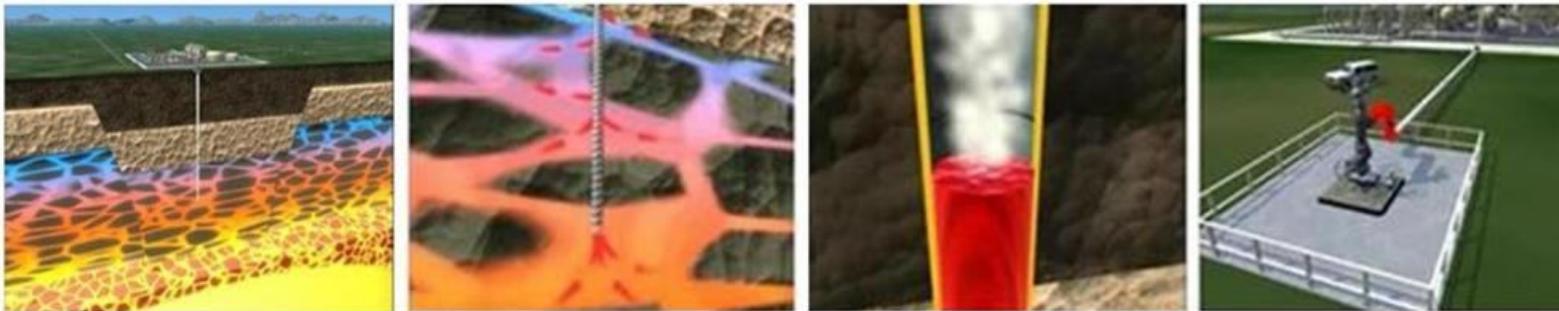




Geothermal Reservoir and Production Engineering
Knowledge And Skills

GEOHERMAL PRODUCTION ENGINEERING

This course was developed within WP 1.04 of the GEOCAP program



Figures captured from CalEnergy's video

TOPICS

-
- 1 Fundamentals of Production Engineering
 - 2 Wellbore modeling for steam well
 - 3 Wellbore modelling for two-phase flow
 - 4 Stimulation (lifting; well discharge; acidizing)
 - 5 Exercise



Geothermal Reservoir and Production Engineering Knowledge And Skills

Part-1:

Fundamentals of Production Engineering

Nenny Saptadji (ITB)

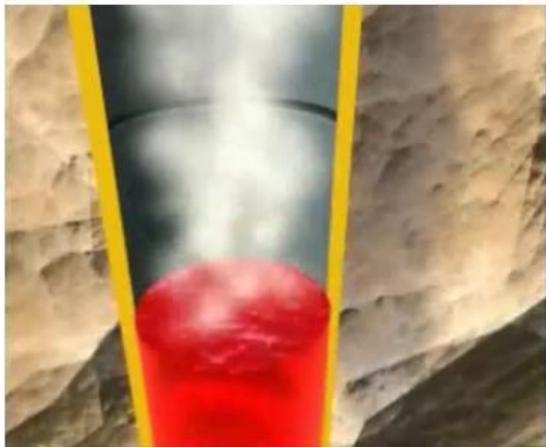
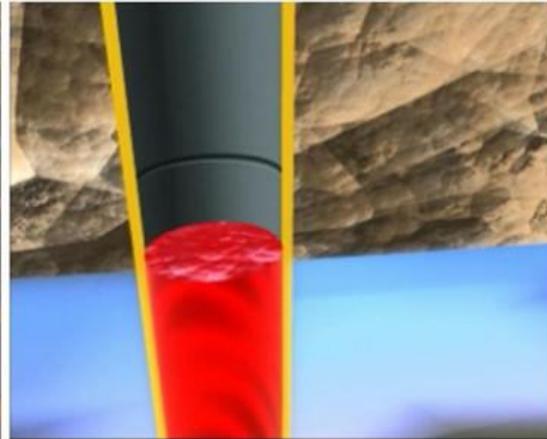
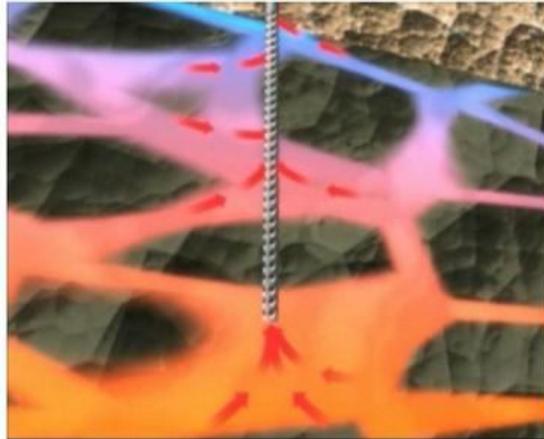
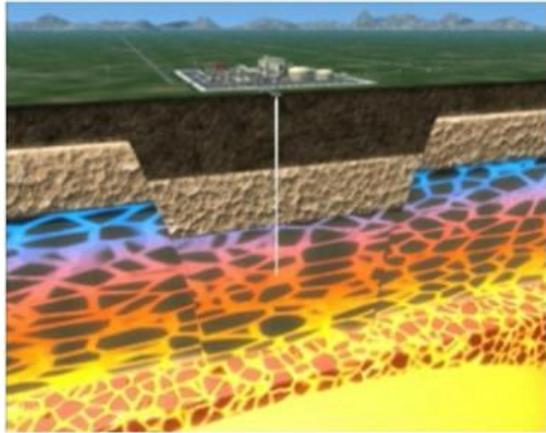
Course material is in Indonesian Language



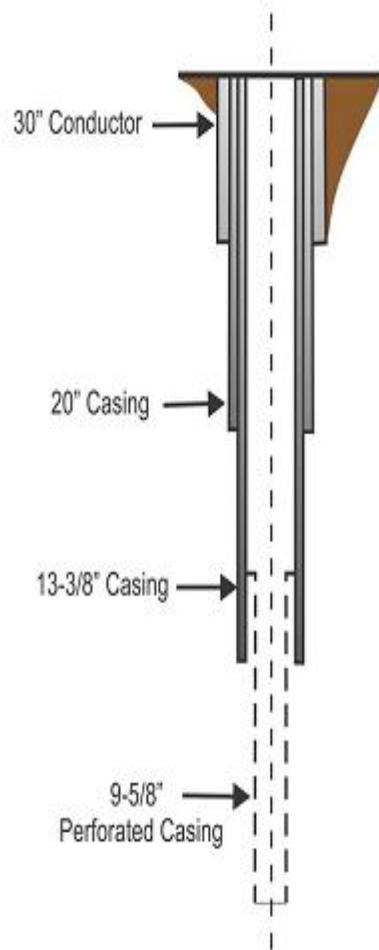
Figures captured from CalEnergy's video

Fluida Produksi

- Air
- Uap
- Campuran uap air



Laju Alir Masa Fluida (Laju Produksi)



Laju alir fluida umumnya dinyatakan sebagai laju alir masa (satuan kg/detik atau dalam satuan ton/jam), jarang dinyatakan sebagai laju alir volume spt halnya di perminyakan (untuk minyak dalam satuan bbl/hari atau utk gas dalam satuan MMSCF/day).

Laju alir masa dibedakan jadi tiga, yaitu:

- ✓ laju alir masa fluida total (Q_m atau M atau m)
- ✓ laju alir masa uap (Q_{mv} atau M_v atau m_v)
- ✓ laju alir masa air (Q_{mL} atau M_L atau m_L)

Laju Alir Panas

□ Laju alir panas fluida (Q) = $m h$ (kg/det) (kJ/kg) = kJ/det = kW

□ Laju alir panas uap:

$$Q_v = Q_{m_v} h_v = m_v h_v$$

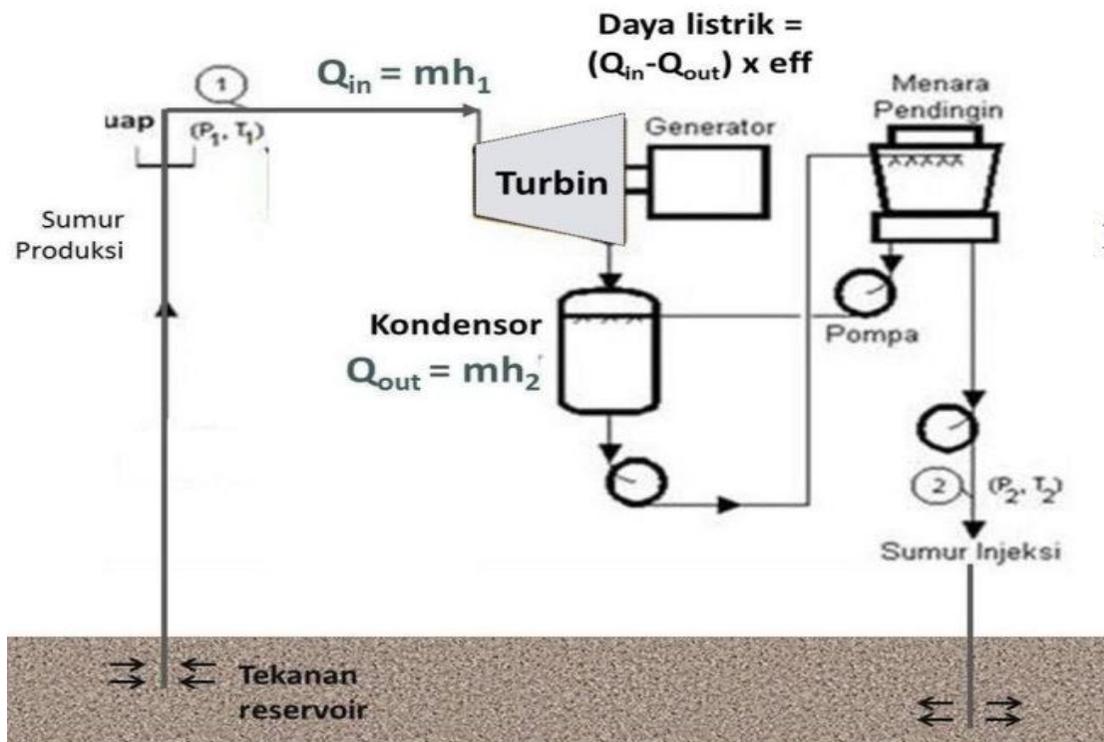
□ Laju alir panas air:

$$Q_L = h_L Q_{m_L} = m_L h_L$$

□ Laju alir panas total: $Q = Q_v + Q_L = m_v h_v + m_L h_L$

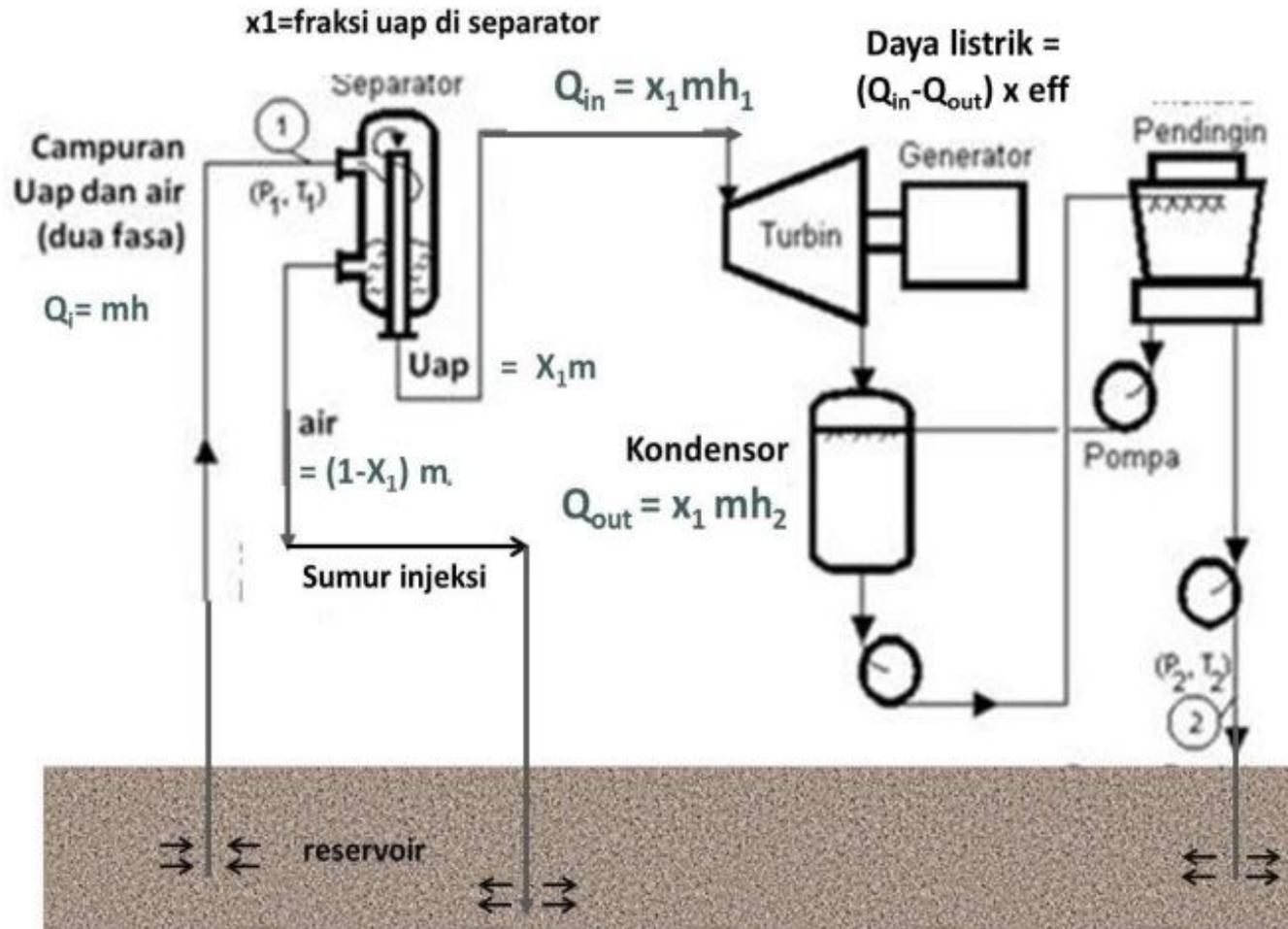
Laju Alir Masa dan laju Alir Panas Fluida dari Suatu Lapangan Geotermal

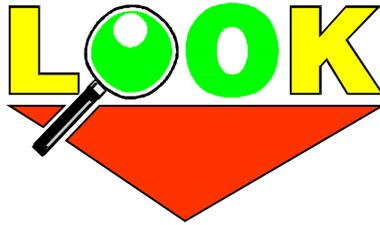
- ❖ Laju alir masa dan laju alir panas luida dari suatu lapangan panas bumi tergantung dari kapasitas PLTP.



$$m = \frac{W}{\eta(h_1 - h_2)}$$

Siklus Konversi Uap Hasil Pemisahan (*Separated Steam Cycle*)

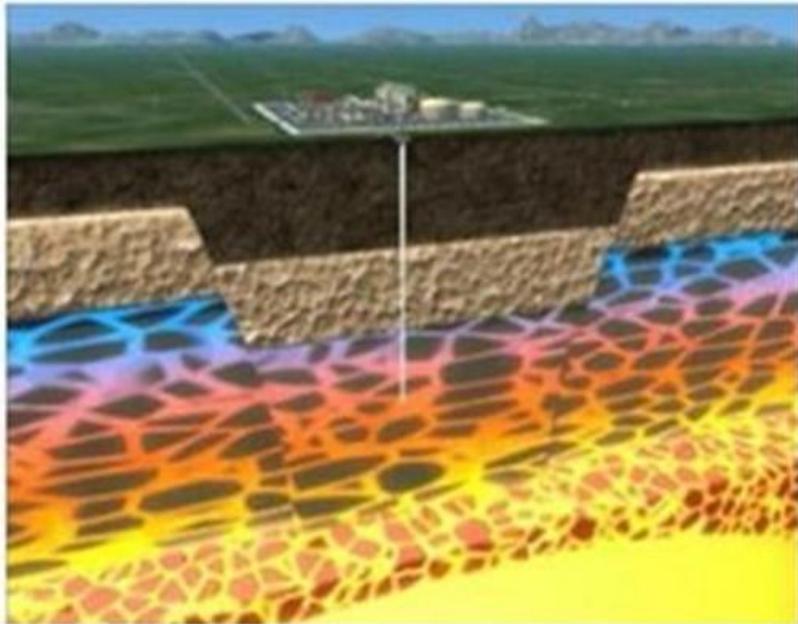




Produksi dari Lapangan Panas Bumi Dominasi Uap Kamojang

	unit-1	unit-2	unit 3	Unit 4	Total
Kapasitas (MW)	30	55	55	60	
ton/jam	215	394	394	366	1369
ton/hari	5160	9456	9456	8784	24072
steam allowance 10%	21.5	39.4	39.4	36.6	100.3
total produksi (ton/jam)	236.5	433.4	433.4	402.6	1469.3
produksi pertahun (ton/t)	2,071,740	3,796,584	3,796,584	3,526,776	12,871,068

Aliran Fluida dari Dasar Sumur ke Permukaan



Figures captured from CalEnergy's video

Dari Dasar Reservoir ke Permukaan:

- Terjadi penurunan tekanan ?
- Terjadi kehilangan massa?
- Terjadi kehilangan panas ?

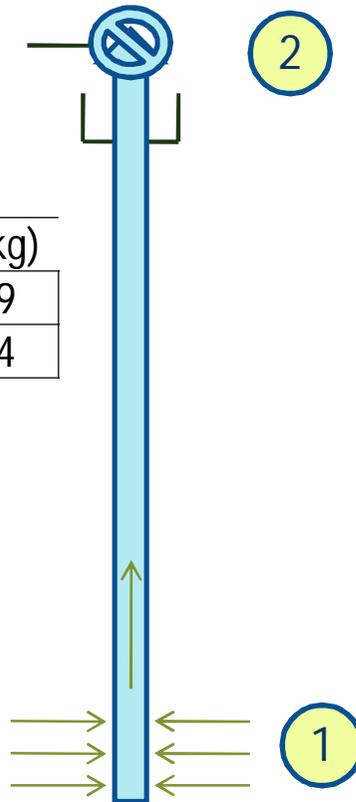
Aliran di Sumur Uap

WHP = 15 – 17 bar bar

Boiling Point

P (bar)	Ts (°C)	hg (kJ/kg)
15	198.3	2789.9
17	204.4	2793.4

Jenis Fluida ?



$P_{res} = 34 - 35 \text{ bar abs};$
 $T = 235 - 245^\circ\text{C}$

Apabila aliran dari dasar sumur hingga ke permukaan diasumsikan isenthalpic, jenis fluida di kepala sumur?

Boiling Point

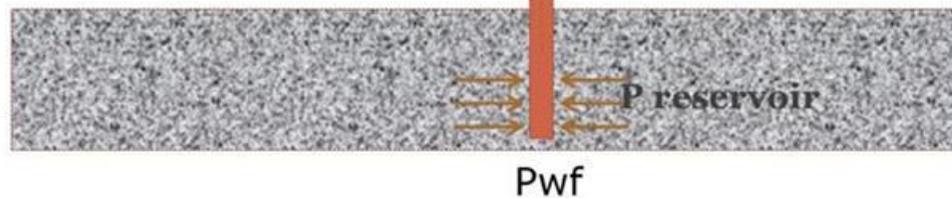
P (bar)	Ts (°C)	hg (kJ/kg)
34	240.9	2802.1
35	242.6	2801.9

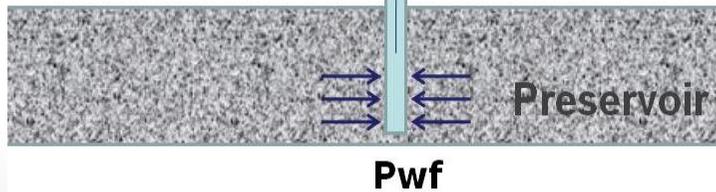
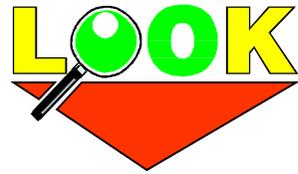
Laju Alir masa dan Entalphy Fluida dari Sumur Geotermal



Faktor-faktor yang menentukan besarnya enthalpy fluida dari sumur?

Faktor-faktor yang menentukan besarnya laju alir masa fluida dari sumur?





Laju alir masa dari reservoir ke sumur

$$m = - \frac{2\pi k h (P_r - P_{wf})}{\upsilon \mu \ln \frac{r_e}{r_w}}$$

dimana

m = laju alir massa, kg/s

kh = permeability thickness, m^3

ΔP = perbedaan tekanan ($P_r - P_{wf}$), Pa

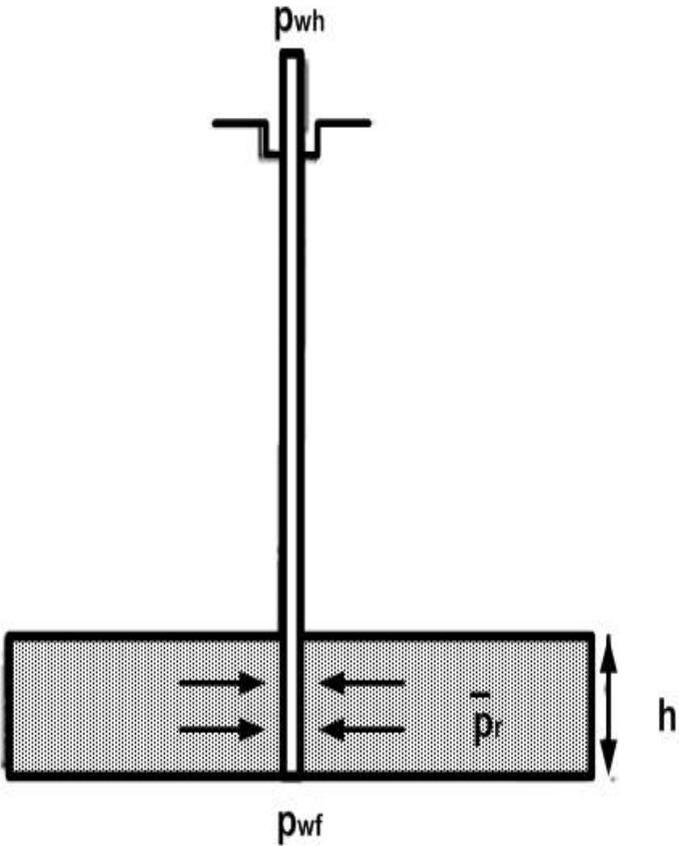
μ = viskositas fluida (dalam hal ini air), Pa.s

υ = volume spesifik air, m^3/ kg

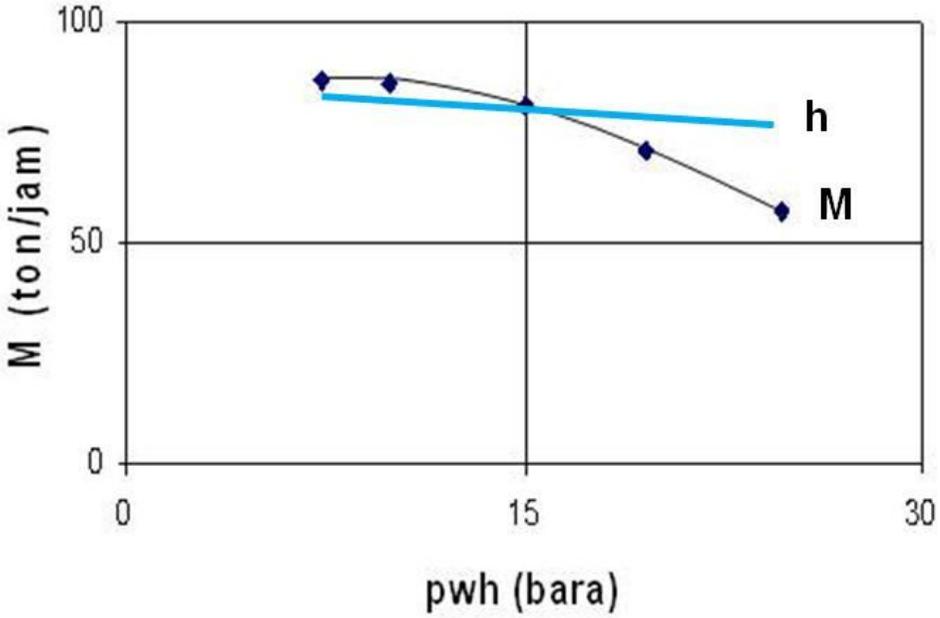
r_e = radius luar, m

r_w = radius sumur, m

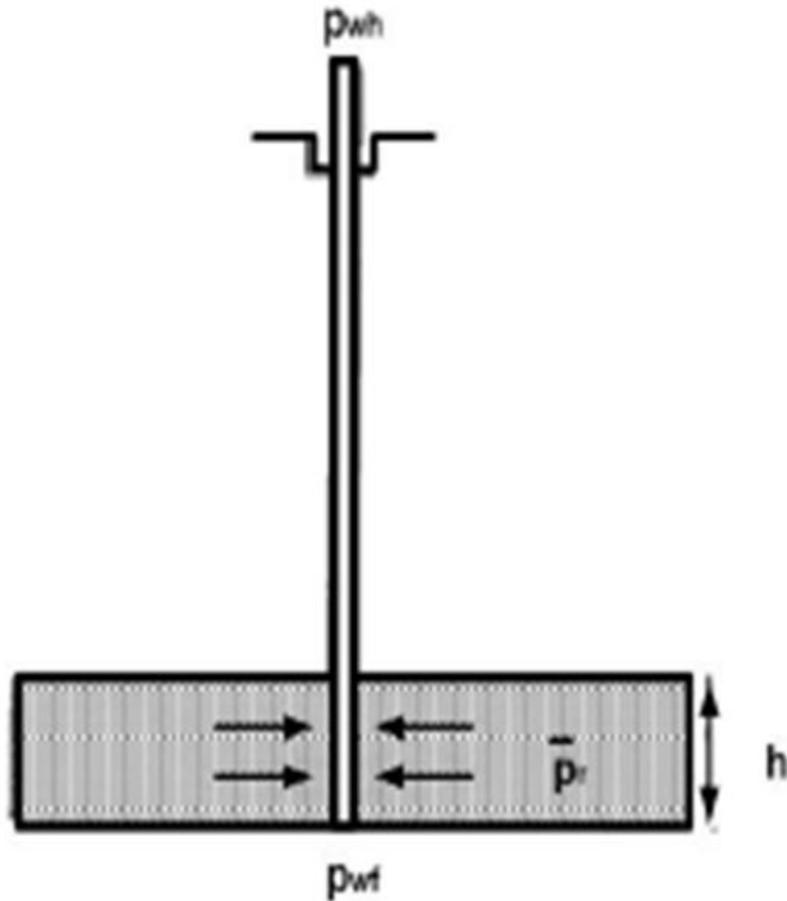
Kemampuan Produksi Sumur



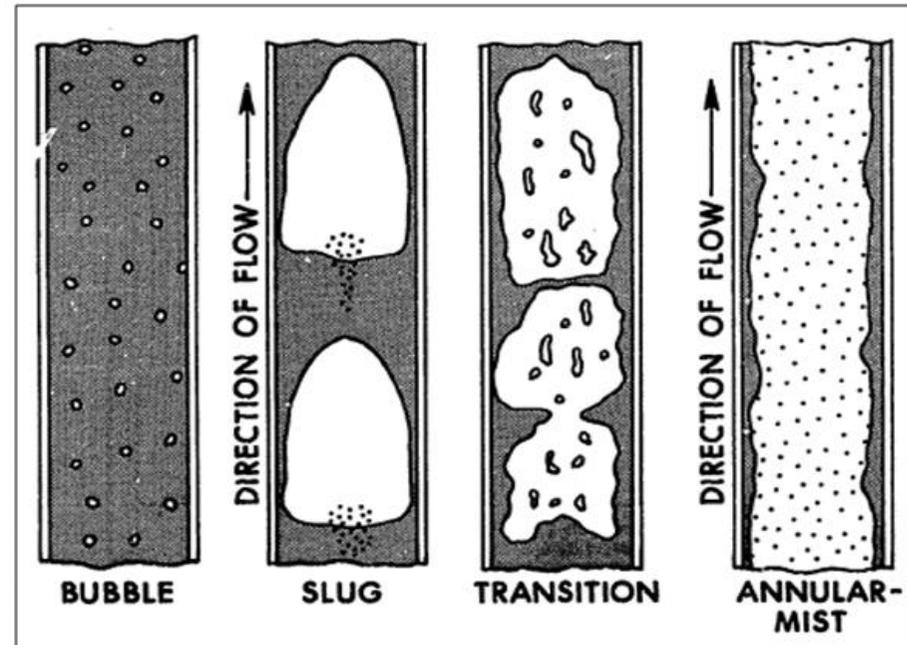
Deliverability Curve atau Output Curve



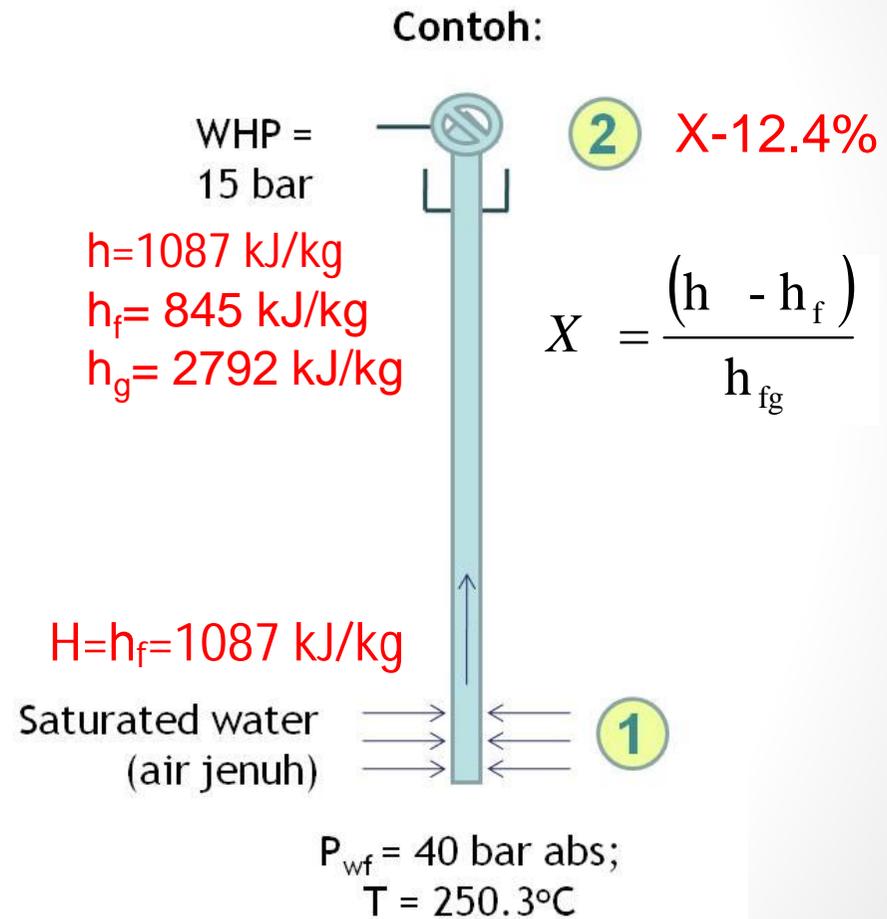
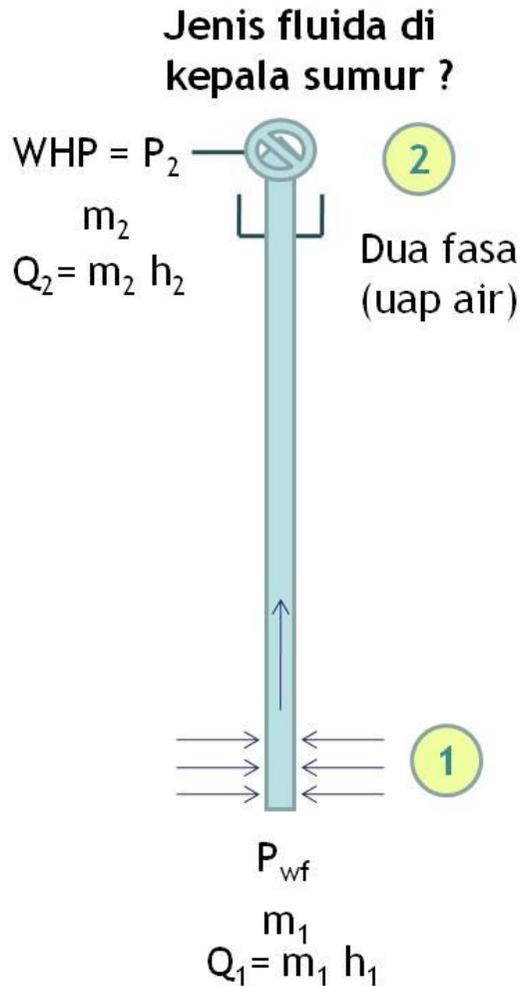
Sumur Dua Fasa



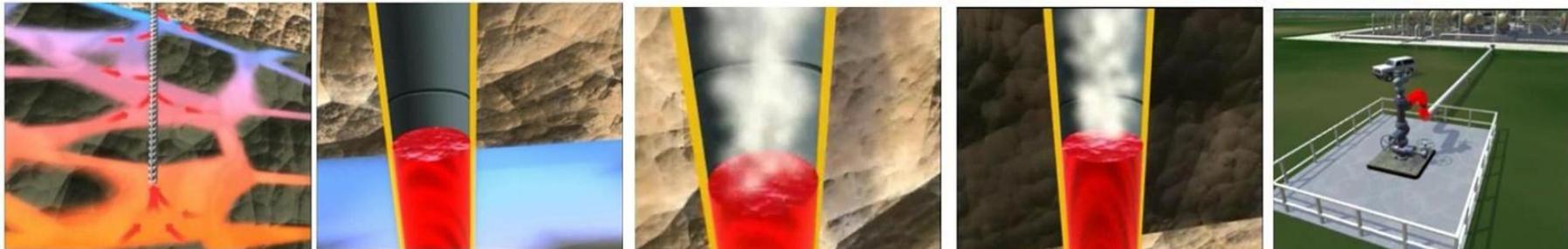
Pola aliran yang mungkin terjadi di dalam sumur



Sumur Dua Fasa



Didasar Sumur			Di Kepala Sumur				
P (bara)	T (°c)	h (kJ/kg)	P (bara)	T (°c)	h_f (kJ/kg)	h_{fg} (kJ/kg)	X
40	250.3	1087	15	198.3	845	1947	12.4%
			14	195	830	1960	13.1%
			13	191.6	815	1972	13.8%
			12	188	798	1986	14.6%
			11	184.1	781	2000	15.3%
			10	179.9	763	2015	16.1%



Perlu dilakukan pemodelan sumur, untuk mengetahui perubahan P, T, X dan pola aliran dari dasar sumur hingga ke kepala sumur



Geothermal Reservoir and Production Engineering
Knowledge And Skills

Part – 2:

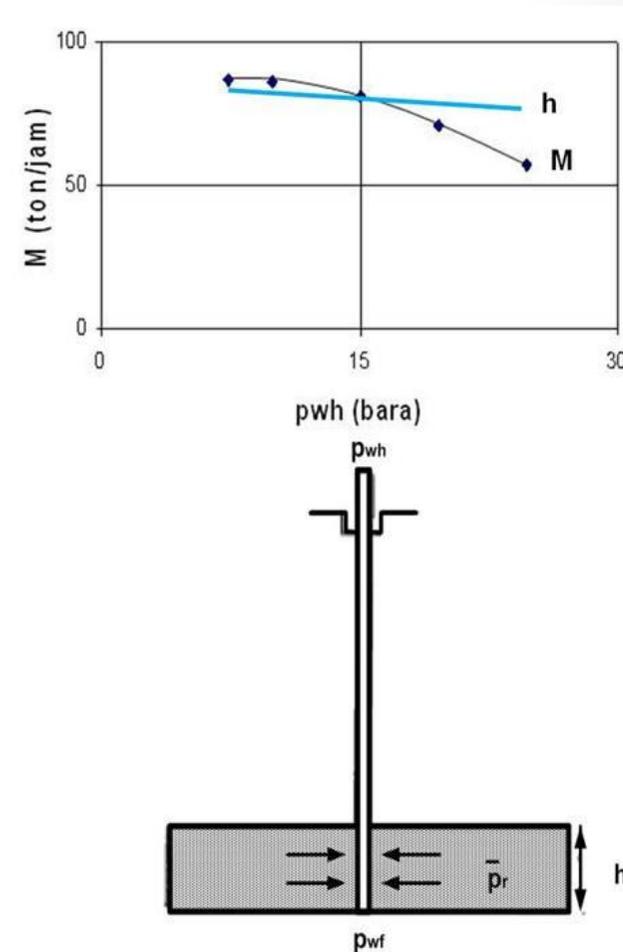
Wellbore Modelling for Steam Well

Nenny Saptadji (ITB)
Nurita Putri Hardiani (ITB)
Heru Berian Pratama (ITB)

Course material is in Indonesian Language

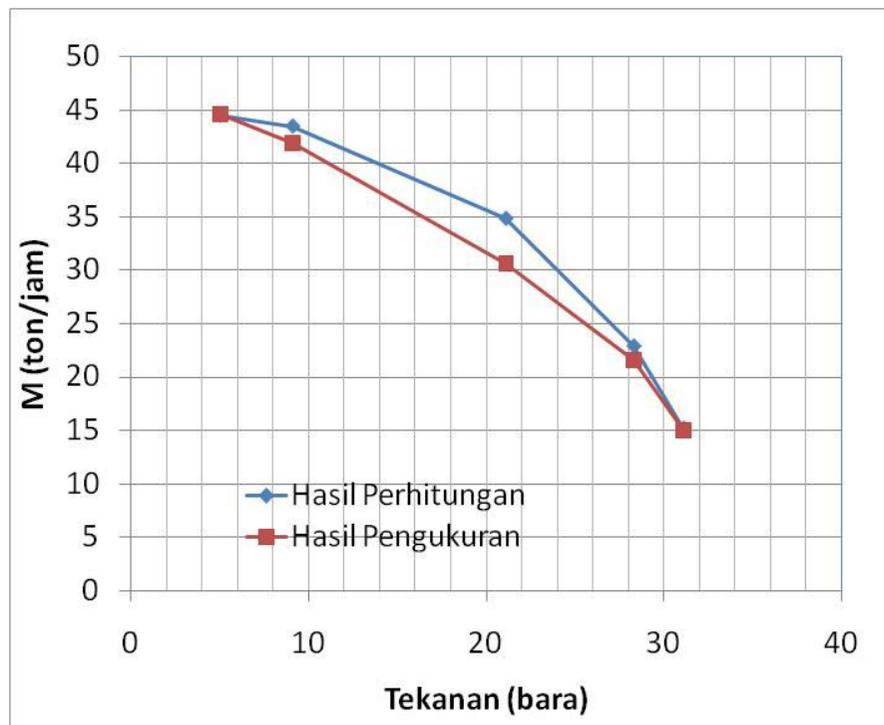
TUJUAN PEMODELAN SUMUR

Tujuan pemodelan atau simulasi sumur: Mengembangkan suatu model sumur yang mampu menirukan kemampuan produksi sumur, yang kemudian dapat digunakan untuk memprediksi kemampuan produksi sumur di masa yad atau pada kondisi lain yang berbeda



UJI VALIDASI

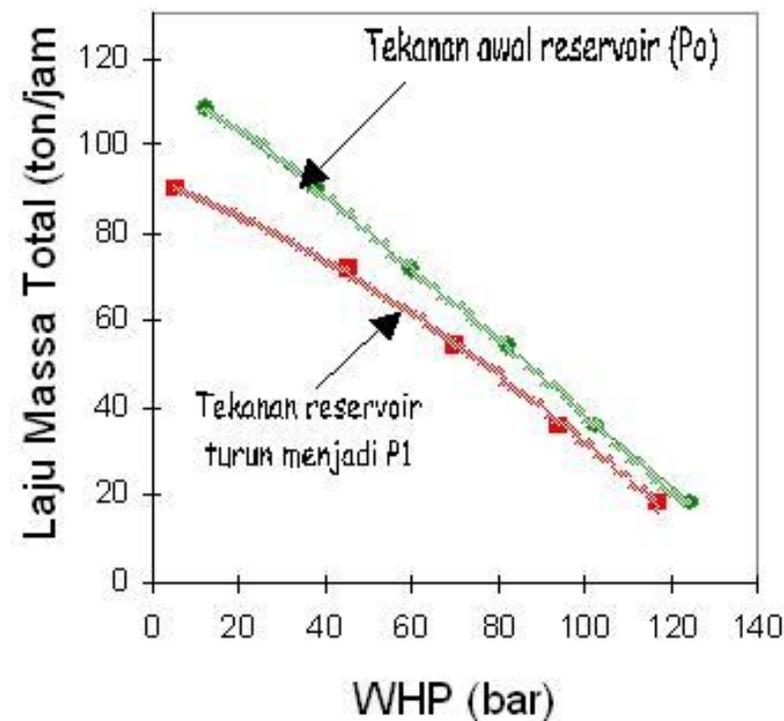
Sebelum digunakan untuk prediksi, model harus diuji validasi-nya dengan membandingkan hasil perhitungan model dengan data hasil pengukuran di lapangan (observed data).



Model disebut “valid” bila hasil perhitungan sama dengan atau mendekati data lapangan

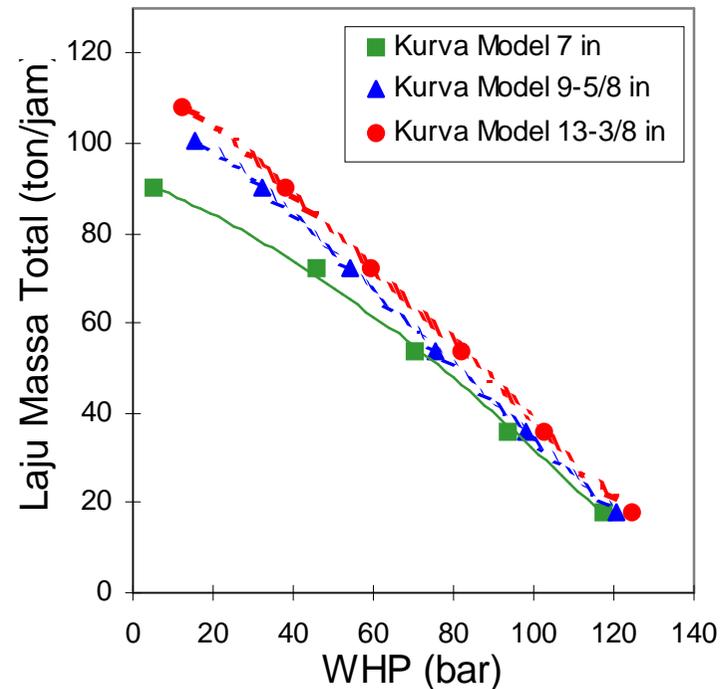
KEGUNAAN MODEL SUMUR

1. Dengan pemodelan sumur dapat dibuat prediksi perubahan kemampuan produksi sumur sebagai akibat dari penurunan tekanan reservoir



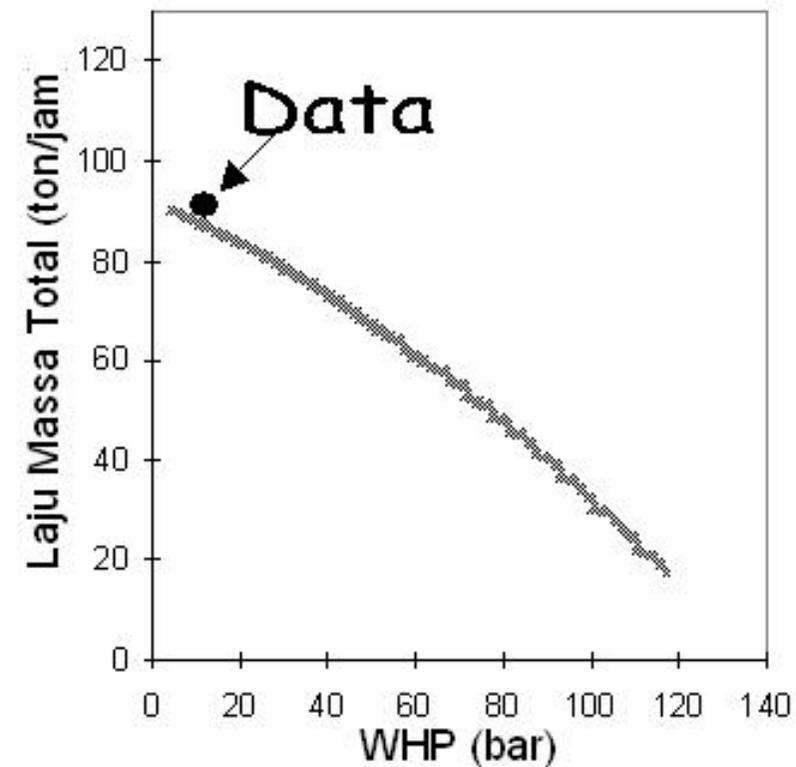
KEGUNAAN MODEL SUMUR

2. Model suatu sumur dapat juga digunakan untuk memperkirakan kemampuan produksi sumur baru yang akan dibor dengan ukuran lubang berbeda, misalnya untuk memperkirakan kemampuan produksi dari sumur berdiameter besar (bighole).



KEGUNAAN MODEL SUMUR

3. Pemodelan sumur perlu dilakukan untuk memprediksi laju alir masa pada beberapa tekanan kepala sumur lain (membuat kurva produksi), khususnya apabila uji produksi hanya dapat dilakukan dalam waktu singkat.



Deliverability sumur geotermal

Deliverability sumur panasbumi dominasi uap:

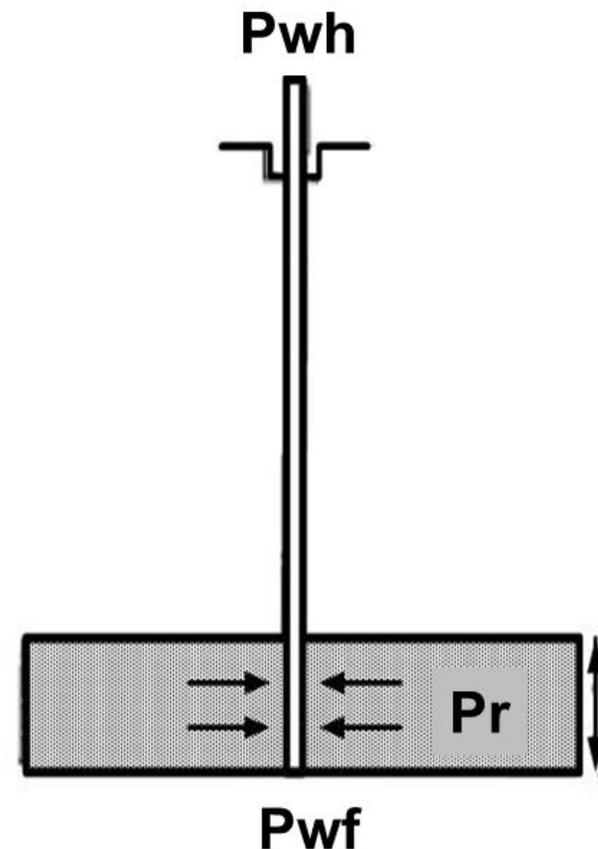
$$m = C(\overline{p_r}^2 - p_{wf}^2)^n$$

n = konstanta yang menunjukkan pengaruh faktor turbulensi pada aliran

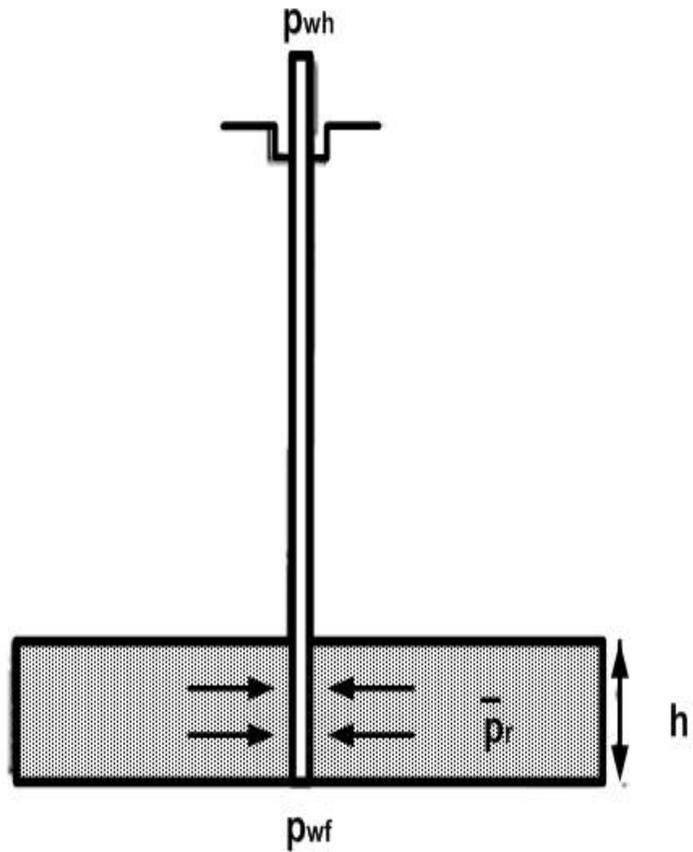
C = konstanta yang menunjukkan kemampuan sumur, ton/(day.bar²ⁿ)

Konstanta n memiliki nilai antara 0,5 – 1,0.

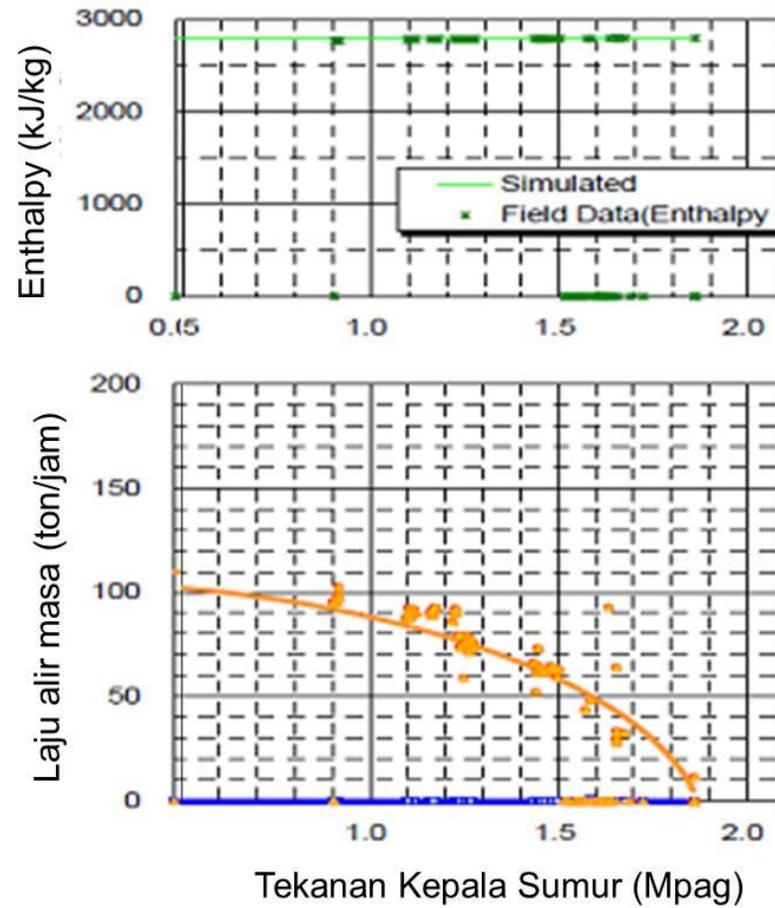
- Jika $n = 0,5$ aliran yang terjadi adalah turbulen,
- Jika $n = 1$ maka aliran yang terjadi adalah laminar



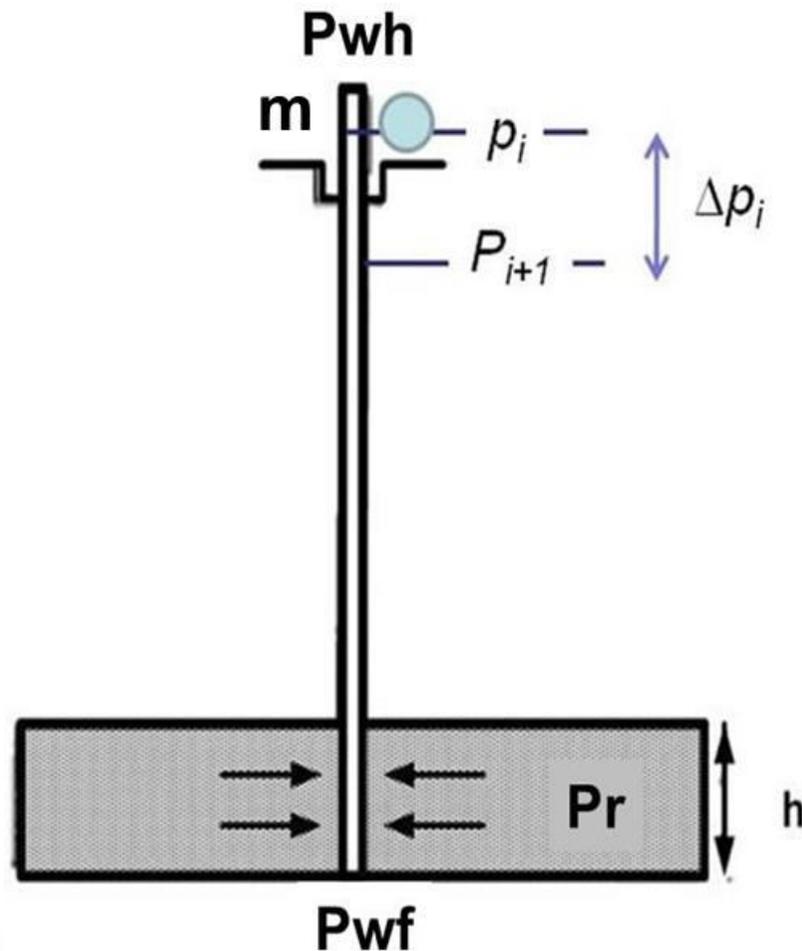
Example:



$$m = C(\overline{p_r^2} - p_{wf}^2)^n$$



PERHITUNGAN TEKANAN ALIR DI DALAM SUMUR DARI TEKANAN KEPALA SUMUR



- ❖ Jika dari uji produksi diketahui pada tekanan alir kepala sumur **P_{wh}** atau **WHP**, laju alirnya **m** , maka dapat diprediksi atau dihitung tekanan alir di dalam sumur hingga di dasar sumur (**P_{wf}**).
- ❖ Perhitungan dilakukan dari atas ke bawah atau *top down*):

PENENTUAN TEKANAN ALIR DI DALAM SUMUR

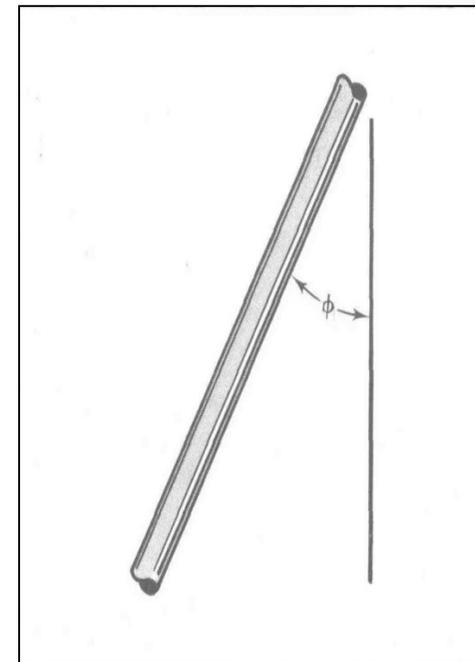
Perhitungan gradien tekanan total:

$$\frac{dp}{dz} = \frac{g}{g_c} \rho \cos \theta + \frac{f \rho v^2}{2g_c d} + \frac{\rho v dv}{g_c dz}$$

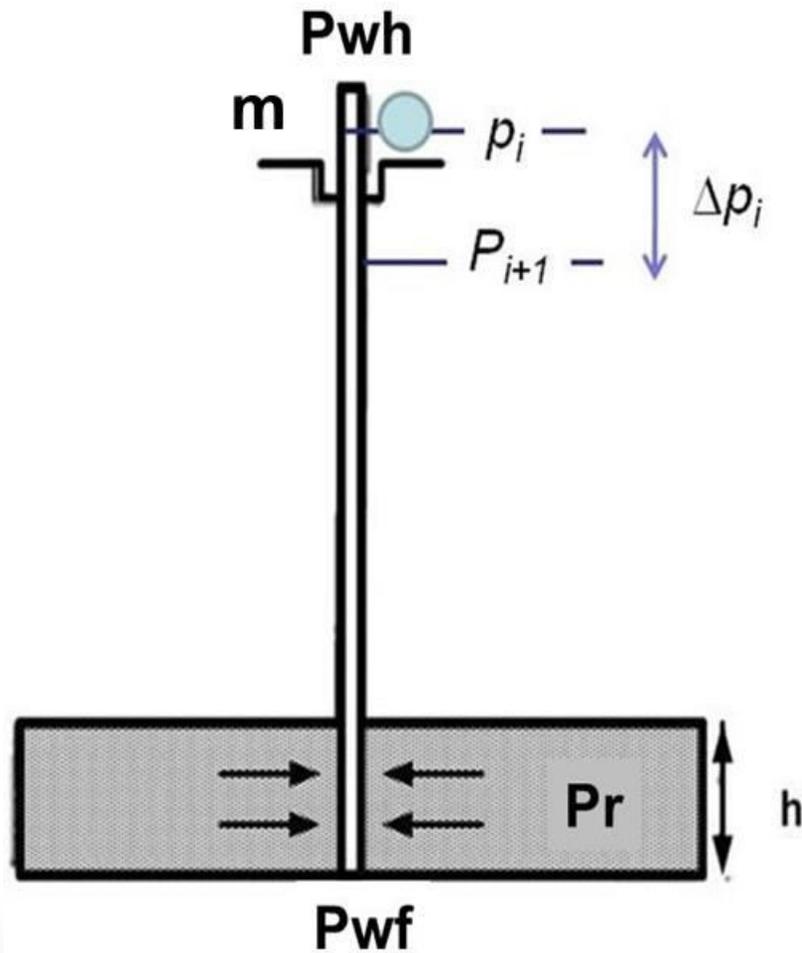
Gradien tekanan yang diakibatkan oleh elevasi

Gradien tekanan akibat akselerasi.

Besar gradien tekanan akibat friksi ini sangat dipengaruhi oleh kecepatan fluida di dalam pipa.



PENENTUAN TEKANAN ALIR DI DALAM SUMUR



Gradien tekanan total:

$$\frac{dp}{dz} = \frac{\frac{g}{g_c} \rho \cos \theta + \frac{f \rho v^2}{2 g_c d}}{1 - \frac{\rho_g v^2}{g_c \bar{p}}}$$

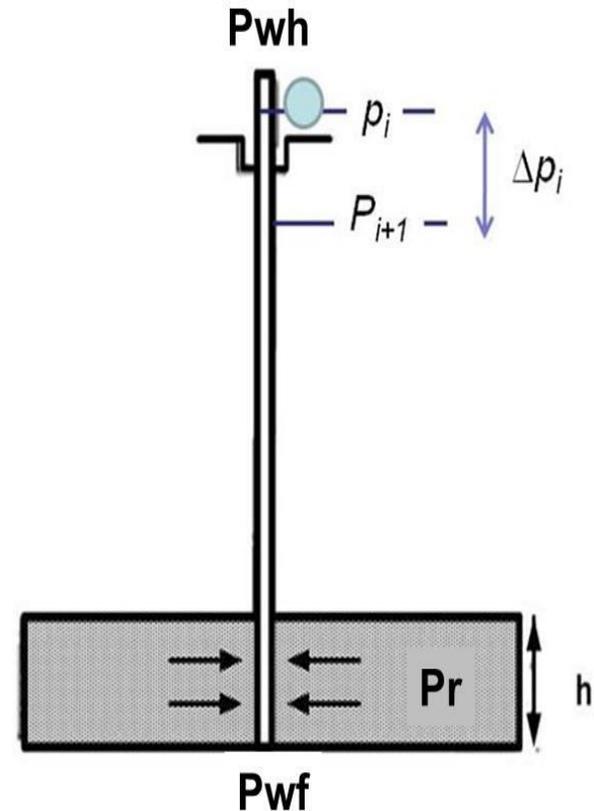
Dimana **kecepatan alir uap, v**

$$v = \frac{m}{\rho_g ((\pi / 4) d^2)}$$

- Faktor gesekan (f) merupakan salah satu besaran yang mempengaruhi gradien tekanan akibat friksi.
- Faktor gesekan atau friksi pada aliran turbulen merupakan fungsi dari kekasaran relatif (ϵ/d) dan Bilangan Reynold (N_{Re}) sedangkan pada aliran laminar hanya merupakan fungsi dari N_{Re} .

- N_{Re} digunakan sebagai parameter untuk membedakan antara aliran laminar dan turbulen dan didefinisikan sebagai:

$$N_{Re} = \frac{\rho v d}{\mu}$$



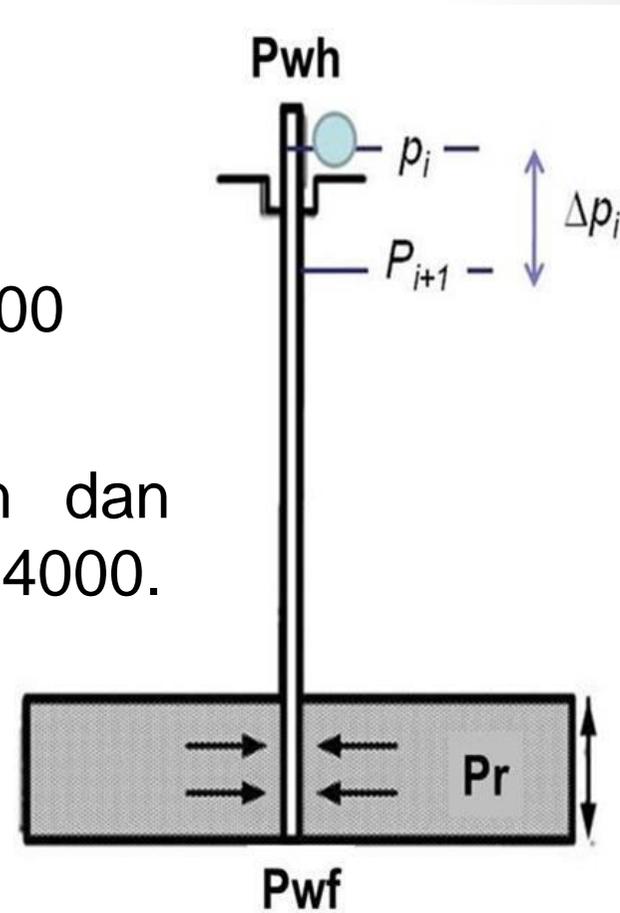
Bilangan Reynold (N_{Re}):

$$N_{Re} = \frac{\rho v d}{\mu}$$

- Aliran laminar terjadi jika $N_{Re} < 2000$
- Aliran turbulen jika $N_{Re} > 4000$.
- Daerah transisi antara turbulen dan laminar terjadi pada $2000 < N_{Re} < 4000$.

Untuk aliran laminar faktor gesekan sbb:

$$f = 64 / N_{Re}$$

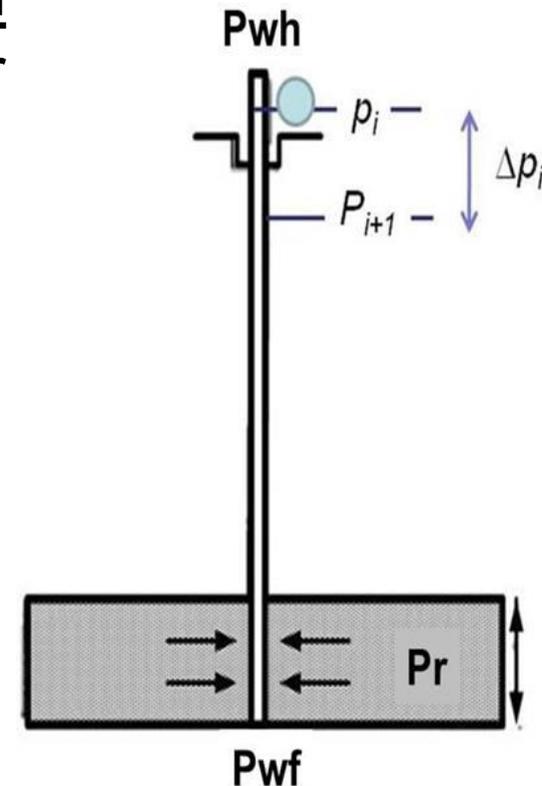


Faktor gesekan pada aliran turbulen untuk pipa yang halus dan kasar didekati dengan formula yang berbeda

- Faktor gesekan pada pipa halus dapat ditentukan dengan persamaan yang dikembangkan oleh Drew, Koo, dan McAdams, yaitu

$$f = 0.0056 + 0.5 N_{Re}^{-0.32}$$

berlaku pada selang Bilangan Reynold, $3000 < N_{Re} < 3 \times 10^6$.

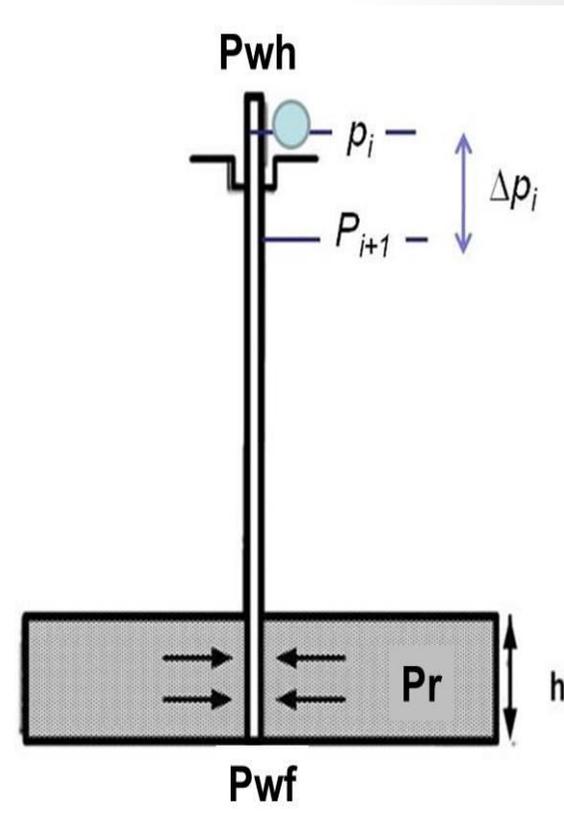


- Pada tahun 1939 Colebrook dan White memperkenalkan persamaan faktor gesekan pada aliran melalui **pipa kasar** yang berlaku untuk seluruh regim aliran turbulen

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 1.74 - 2 \log\left(\frac{2\varepsilon}{d} + \frac{18.7}{N_{Re} \sqrt{f}}\right)$$

ε = kekasaran absolut

d = diameter dalam pipa



Untuk mendapatkan solusi persamaan tersebut, perlu dilakukan iterasi hingga absolut perbedaan faktor gesekan solusi (f_c) dengan faktor gesekan anggapan (f_g) berada pada batas toleransi yang diinginkan.

Proses iterasi dilakukan dengan mengubah persamaan tersebut menjadi:

$$f_c = \left[\frac{1}{1.74 - 2 \log \left(\frac{2\varepsilon}{d} + \frac{18.7}{N_{\text{Re}} \sqrt{f_g}} \right)} \right]^2$$

PROSEDUR PERHITUNGAN TEKANAN ALIR DI DALAM SUMUR

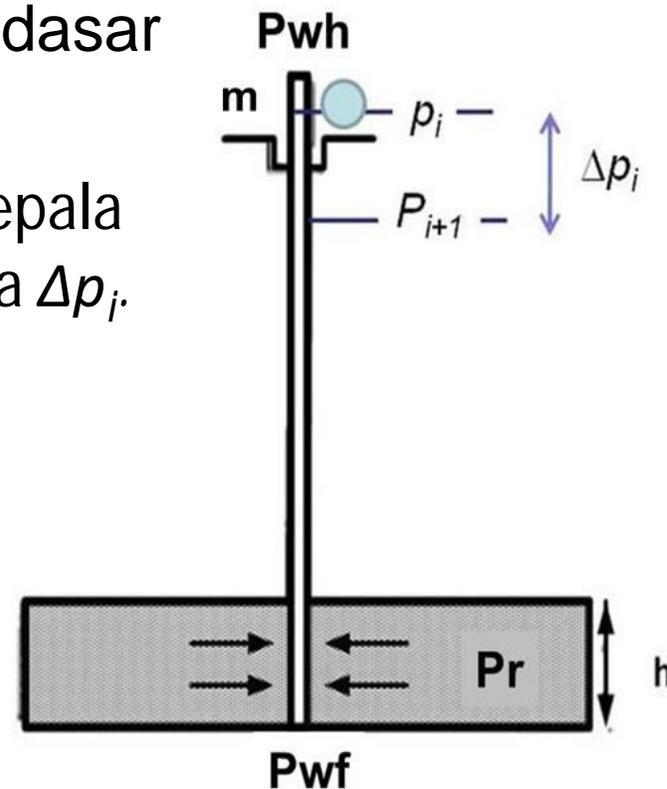
Jika diketahui tekanan alir kepala sumur dan ingin ditentukan tekanan alir dasar sumur (*top down*):

1. Berdasarkan harga tekanan alir kepala sumur (p_i), perkirakan suatu harga Δp_i .
2. Tentukan tekanan p_{i+1}

$$p_{i+1} = p_i + \Delta p_i$$

3. Tentukan tekanan rata-rata,

$$\bar{p} = p_{i+1} + \frac{\Delta p_i}{2}$$

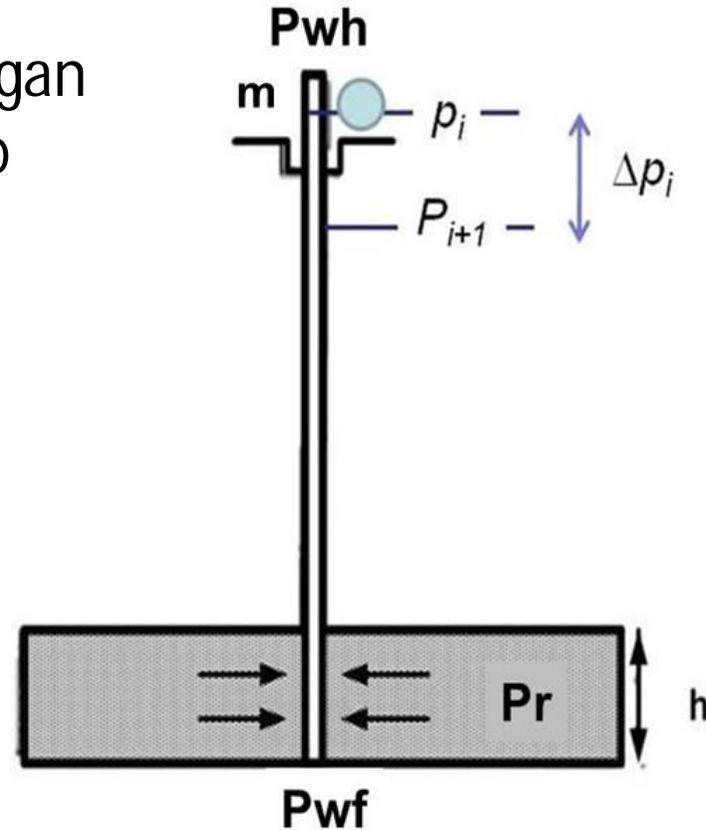


PROSEDUR PERHITUNGAN TEKANAN ALIR DI DALAM SUMUR

4. Tentukan T_{si} , ρ_g , dan μ_g pada dengan menggunakan korelasi tabel uap
5. Tentukan kecepatan alir uap, v

$$v = \frac{m}{\rho_g ((\pi / 4)d^2)}$$

6. Tentukan N_{Re} dan f



PROSEDUR PERHITUNGAN TEKANAN ALIR DI DALAM SUMUR

7. Tentukan gradien tekanan total

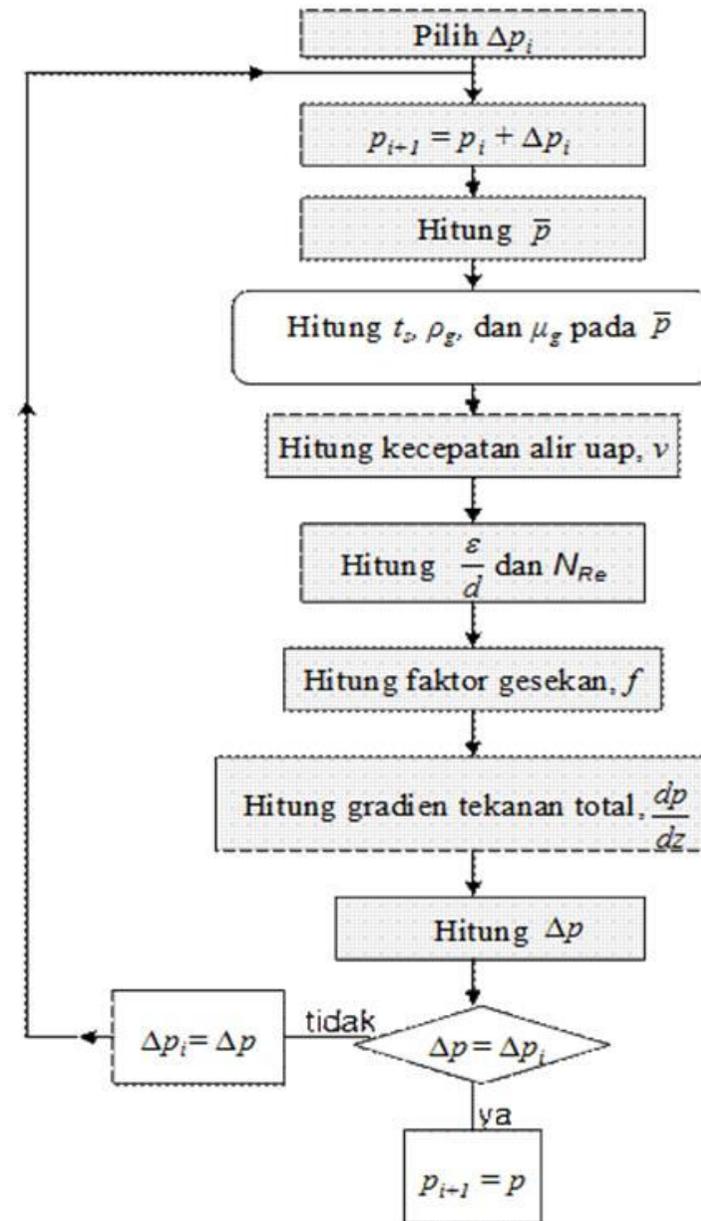
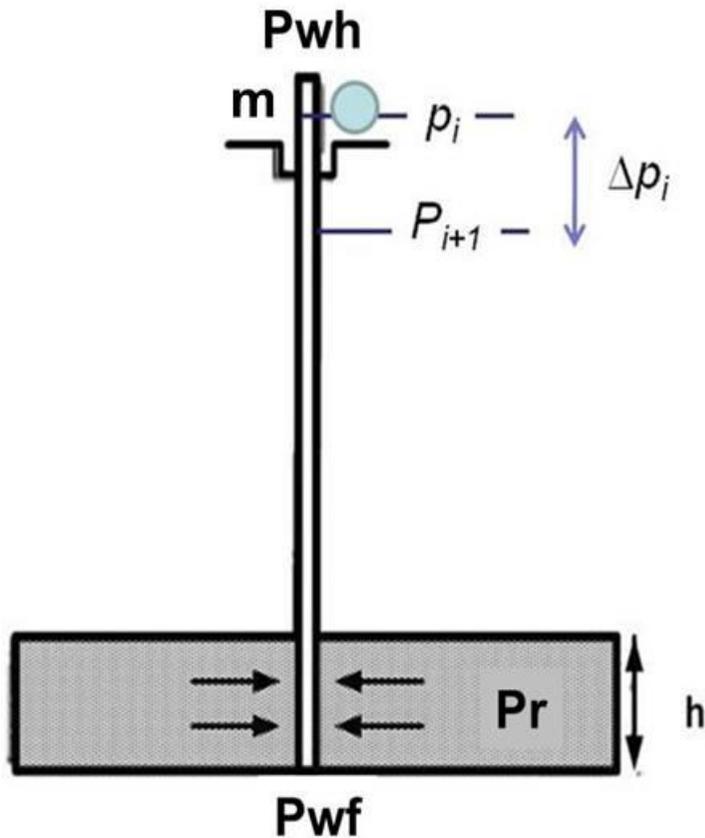
$$\frac{dp}{dz} = \frac{\frac{g}{g_c} \rho \cos \theta + \frac{f \rho v^2}{2 g_c d}}{1 - \frac{\rho g v^2}{g_c \bar{p}}}$$

8. Tentukan Δp

$$\Delta p = z \left(\frac{dp}{dz} \right)$$

9. Periksa apakah $\Delta p = \Delta p_i$. Jika $\Delta p \neq \Delta p_i$ maka tetapkan $\Delta p_i = \Delta p$ dan ulangi perhitungan dari langkah ke-2. Begitu seterusnya hingga diperoleh $\Delta p = \Delta p_i$ sesuai dengan toleransi yang telah ditentukan.

PROSEDUR PERHITUNGAN TEKANAN ALIR DI DALAM SUMUR



METODA

Deliverability sumur panasbumi dominasi uap:

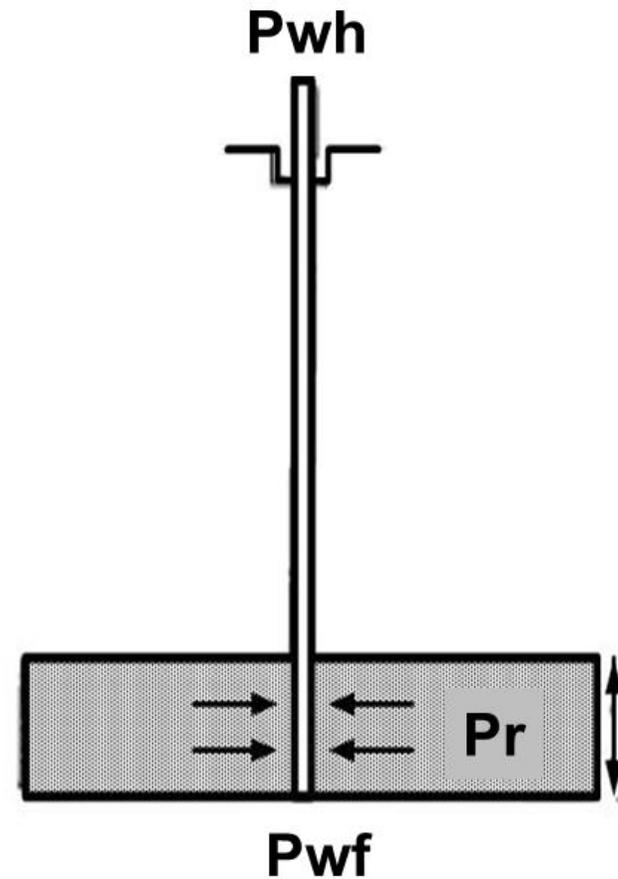
$$m = C(\overline{p_r^2} - p_{wf}^2)^n$$

n = konstanta yang menunjukkan pengaruh faktor turbulensi pada aliran

C = konstanta yang menunjukkan kemampuan sumur, ton/(day.bara²ⁿ)

Konstanta n memiliki nilai antara 0,5 – 1,0.

- Jika $n = 0,5$ aliran yang terjadi adalah turbulen,
- Jika $n = 1$ maka aliran yang terjadi adalah laminar



Langkah-langkah perhitungan

1. Hitung tekanan alir dasar sumur (P_{wf}) dari hubungan antara m terhadap tekanan kepala sumur (P_{wh} atau WHP) yang diperoleh dari uji aliran (uji produksi)

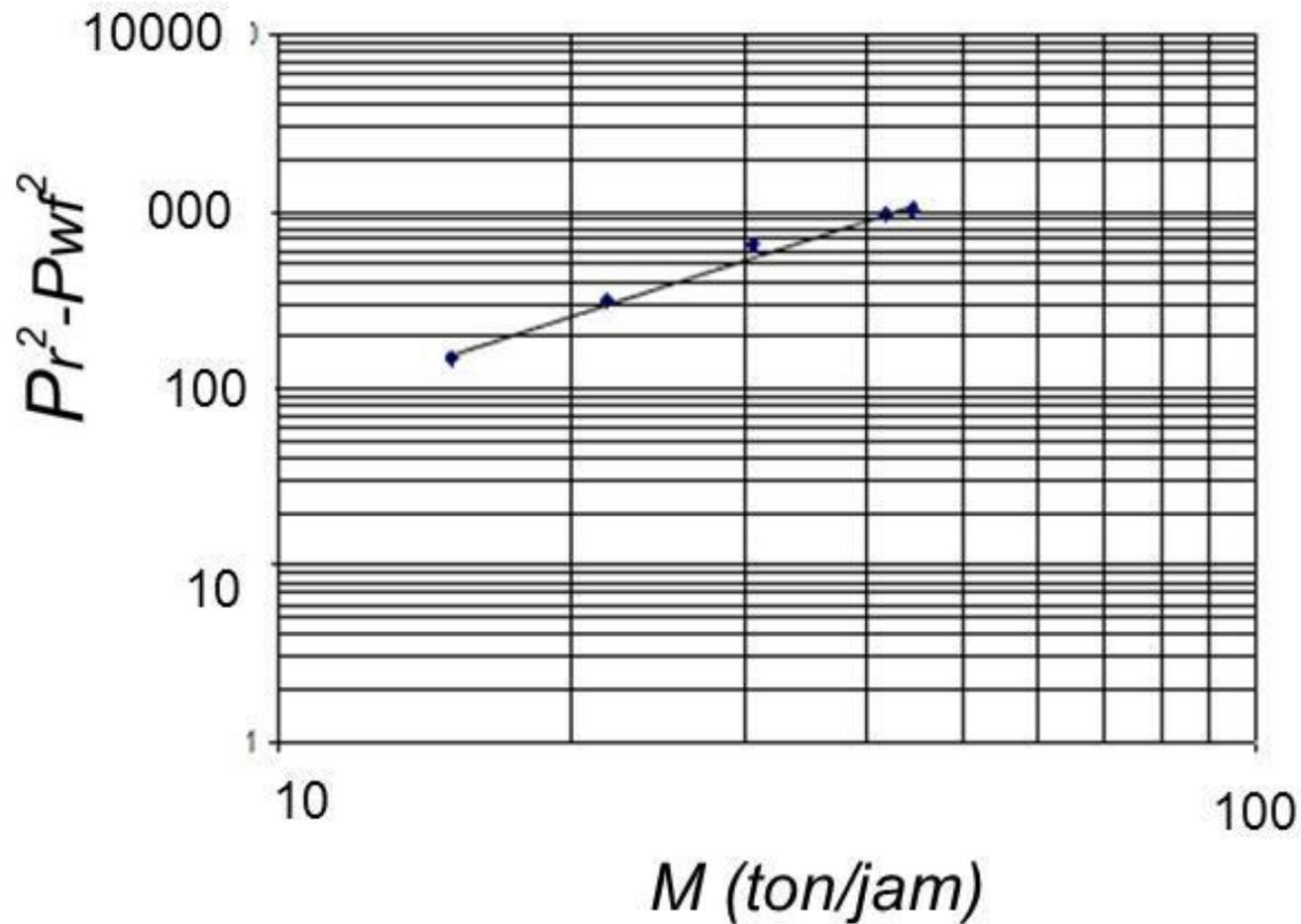
Dari Uji Produksi		Hasil Perhitungan	
WHP (bara)	M (ton/jam)	DP (bar)	P_{wf} (bara)
P_{wh1}	m_1		
P_{wh2}	m_2		
P_{wh3}	m_3		
P_{wh4}	m_4		
P_{wh5}	m_5		

2. Hitung $P_r^2 - P_{wf}^2$

Pr (bar)	Dari Uji Sumur		Hasil Perhitungan	
	WHP	M (ton/jam)	Pwf (bar)	$p_r^2 - p_{wf}^2$
P _{r1}	P _{wh1}	m ₁	P _{wf1}	
	P _{wh2}	m ₂	P _{wf2}	
	P _{wh3}	m ₃	P _{wf3}	
	P _{wh4}	m ₄	P _{wf4}	
	P _{wh5}	m ₅	P _{wf5}	

3. Plot $P_r^2 - P_{wf}^2$ diplot terhadap m pada skala log-log

4. Plot $P_r^2 - P_{wf}^2$ terhadap m pada skala log-log akan menunjukkan suatu garis lurus yang memiliki $slope = 1/n$. Tentukan besarnya n



5. Apabila harga n sudah ditentukan, maka harga C sbb:

$$C = \frac{m}{(p_r^2 - p_{wf}^2)^n}$$

6. Tuliskan persamaan *deliverability* -nya

7. Hitung m dengan menggunakan persamaan dari no. 4

$$m = C(\overline{p_r^2} - p_{wf}^2)^n$$

Pr (bar)	Dari Uji Sumur		Hasil Perhitungan		
	WHP	M (ton/jam)	Pwf (bar)	$p_r^2 - p_{wf}^2$	M (ton/jam)
Pr1	P _{wh1}	m ₁	P _{wf1}		
	P _{wh2}	m ₂	P _{wf2}		
	P _{wh4}	m ₄	P _{wf4}		

8. Plot Pwh vs M dari hasil pengujian dan hasil perhitungaan:

Excercise

Part - 2

Latihan - 1:

Memprediksi Kedalaman Zona Rekah (Feed Points)

Sebuah sumur dibor di lapangan dominasi uap. Diameter casing adalah 0.330 m dengan kekasaran pipa 4.6×10^{-5} m. Sumur tersebut memproduksi uap 15 kg/detik pada Tekanan Kepala Sumur 8 bar abs. Drawdown dapat dinyatakan dengan persamaan berikut:

$$m = C (P_r^2 - P_w^2)^{0.75}$$

Dimana:

- m = laju alir masa uap (kg/det)
- P_r = tekanan reservoir (bara)
- P_w = tekanan alir dasar sumur @ feed point (bara)
- C = konstanta = $0.23 \text{ kg/s/bar}^{1.5}$

Apabila tekanan reservoir adalah 20 bar abs, hitunglah kedalaman zona rekah (feed points). Lakukan perhitungan satu kali saja, yaitu $D_p =$ tekanan di feed point – tekanan di kepala sumur

Gunakan asumsi berikut:

- Diameter casing 0.33 meter (anggap tidak berubah mulai dari permukaan)
- Di semua titik di sumur fluida adalah satu fasa pada keadaan jenuh (saturated steam).
- Di dalam sumur tidak terjadi kehilangan panas.

Latihan-2:

Memprediksi Tekanan Alir di Depan *Feed Points*

A geothermal well is drilled to 2000 m in a vapour-dominated reservoir. The casing has a diameter of 0.199 m and surface roughness of 4.6×10^{-5} m. The well delivers 12 kg/s of dry steam at a wellhead pressure of 7 bar absolute.

Assuming:

- a) Single phase saturated steam at all points in the well
- b) No wellbore heat transfer
- c) The feed point is at 1500 m

Determine using one pressure increment, the feed pressures

Latihan-3: Simulasi Sumur

Sebuah sumur panasbumi “YYY-4” di uji produksi dengan kombinasi tekanan alir kepala sumur (p_{wh}) sebagai berikut:

P_{wh} (bara)	M (ton/jam)
5.08	44.6
9.16	41.9
21.16	30.6
28.36	21.6
31.16	15.0

KOP, m	150
Casing produksi 9 5/8 "	
ID, in	9.313
Roughness, m	0.000045
MD, m	0-600
Inklinasi, derajat	11.2
Blind Liner	
ID, in	6.539
Roughness, m	0.000045
MD, m	565.9-652
Inklinasi, derajat	30.5
Slotted Liner	
ID, in	6.539
Roughness, m	0
MD, m	652-852
Inklinasi, derajat	30.5

Apabila tekanan reservoir (P_r) saat pengujian dilakukan adalah 35 bara.

1. Buatlah prediksi perubahan produksi sumur, bila tekanan reservoir turun menjadi 32 bara dan 30 bara. Gambarkan prediksi output curve untuk kedua kondisi tekanan reservoir tersebut.
2. Apabila dilokasi dekat sumur tersebut akan dibor sumur berdiameter besar (big hole) dengan konfigurasi serupa, namun casingnya 13 3/8 inch dan liner 9 5/8 inch, buatlah prediksi kemampuan produksi dari sumur tersebut, berdasarkan pada kemampuan produksi sumur standard.

Untuk penyederhanaan perhitungan geometri sumur dapat dibagi menjadi empat segmen yaitu:

Sumur Standard:

1. Casing 9 5/8" vertikal, MD = 150 m.
2. Casing 9 5/8", inklinasi sebesar 11.2°, MD = 150-565.9 m.
3. Blind liner 7", inklinasi sebesar 30.5°, MD = 565.9-652 m.
4. Slotted liner 7", inklinasi sebesar 30.5°, MD = 652-852 m.

Sumur Bighole:

1. Casing 13 3/8" vertikal, MD = 150 m.
2. Casing 13 3/8", inklinasi sebesar 11.2°, MD = 150-565.9 m.
3. Blind liner 9 5/8", inklinasi sebesar 30.5°, MD = 565.9-652 m.
4. Slotted liner 9 5/8", inklinasi sebesar 30.5°, MD = 652-852 m.



**Geothermal Graduate Program
Institut Teknologi Bandung (ITB
Jl. Ganesa 10 Bandung, 40132 - Indonesia**

**Nenny Saptadji, nenny.saptadji@geothermal.itb.ac.id
Nurita Putri Hardiani, nurita_putri@geothermal.itb.ac.id
Heru Berian Pratama, hb.pratama@gmail.com**

Terimakasih