



Universitetet  
i Stavanger

## DET TEKNISK – NATURVITENSKAPELIGE FAKULTET

EKSAMEN I: PET200 / BIP160 Produksjon av Olje og Gass

DATO: 18.02.2016

VARIGHET: 4 timer

TILLATTE HJELPEMIDDEL: **Godkjent kalkulator.**

OPPGAVESETTET BESTÅR AV: **4 oppgaver**

<b>OPPGAVE 1:</b> <i>Strømning og pumper,</i>	side 2 - 3.
<b>OPPGAVE 2:</b> <i>Produksjonssystemet og strømning i reservoar</i>	side 4.
<b>OPPGAVE 3:</b> <i>Brønnstrømning og produksjon</i>	side 5 - 6.
<b>OPPGAVE 4:</b> <i>Brønnstimulering, flow styring, og gassløft</i>	side 7 - 8.

<b>VEDLEGG 1:</b> Tekst oppgave 2, 3 og 4 på engelsk	side i - v
<b>VEDLEGG 2:</b> Likninger,	side vi - viii.
<b>VEDLEGG 3:</b> Spesielle enheter	side ix.
<b>VEDLEGG 4:</b> Universell gasskonstant, R	side x.
<b>VEDLEGG 5:</b> Omregningstabeller US $\leftrightarrow$ SI	side x.
<b>VEDLEGG 6:</b> Konstanter til choke beregninger	side x.
<b>VEDLEGG 7:</b> Gradientkurvediagram D=2.875" rør	side xi.
<b>VEDLEGG 8:</b> Diagram av DSV i åpen og lukket stilling	side xii.

**MERKNADER: Alle eksamensoppgavene har lik vektning og teller hver med 25 % av totalen. Delspørsmål under oppgave 2, 3 og 4 har forskjellig vektning gitt ut fra et antall kredittpoeng tilknyttet delspørsmålet. Hver av disse oppgavene er delt inn i 30 kredittpoeng. Informasjon om vektning og kredittpoeng står angitt på hver oppgave.**

**Dersom du ikke behersker norsk 100 %:** Gjør oppmerksom på dette i begynnelsen av besvarelsen din.

**RÅD:** *Les raskt gjennom alle oppgavene før du begynner, og finn ut hva som må avklares med spørsmål til faglærerne. Planlegg tidsbruken slik at hvert hovedområde får nødvendig tid!*

FAGANSVARLIG: Thor Martin Svartås

TLF.NR. : 51 83 22 85

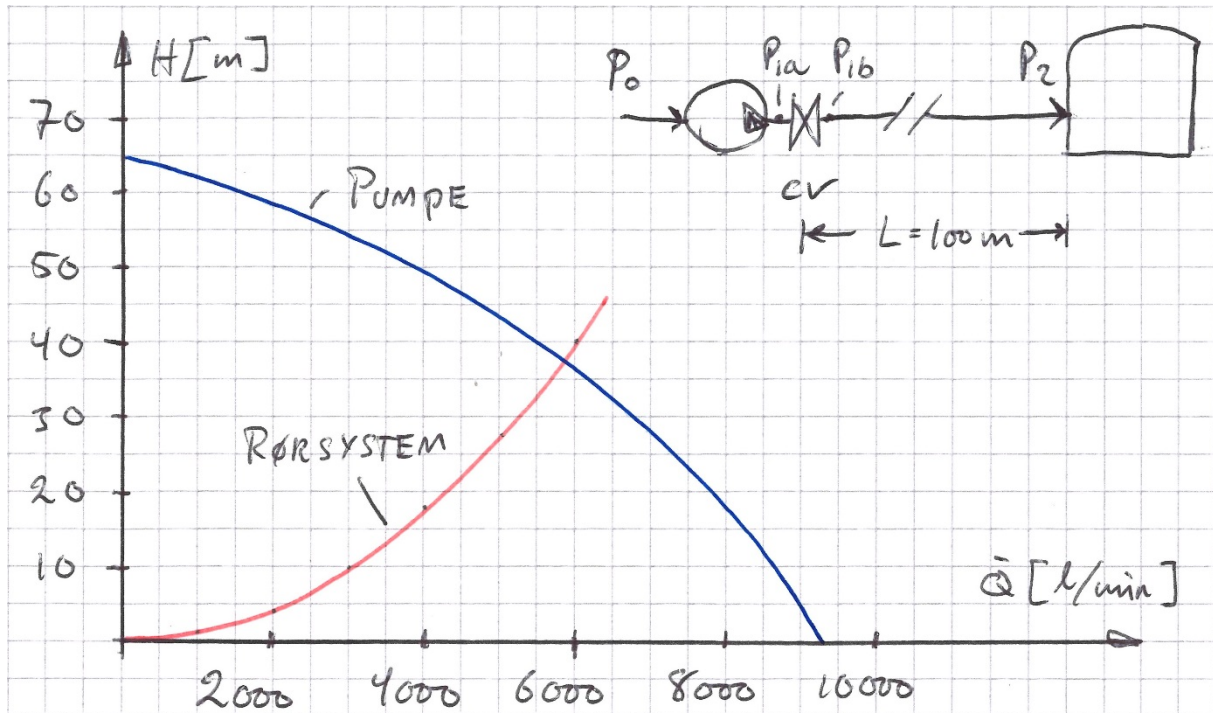
Faglærere kommer til å besøke eksamenslokalene for spørsmål knyttet til oppgavetekst rundt kl. 10 og kl. 12 på eksamensdagen.

---

## Oppgave 1: Strømning og pumper

[Oppgave 1 teller som 1 oppgave à 1 time av 4 og gis vektning 1 (25 %) i bedømmelsen. Alle delspørsmål teller likt.]

----- Olje: -----



Figur 1: Pumpe- og systemkarakteristikk

Figur 1 viser karakteristikkene for en sentrifugalpumpe, og et system av rør hvor utløpstrykket  $p_2$  er likt innløpstrykket  $p_0$  for pumpen.

- I rørene går det olje med tetthet  $768 \text{ kg/m}^3$ . Ved måling observerer man en volumstrømsrate på  $6000 \text{ l/min}$  gjennom pumpen. Hva er da differansetrykket over pumpen ( $p_{1a} - p_0$ )?
- Oljen skal inn på en tank hvor trykket ( $p_2$ ) er 1 bar, det samme som før pumpen ( $p_0$ ), og raten er som i a). Rørsystemet har effektiv lengde  $L = 100 \text{ m}$ , indre rørdiameter  $DI = 160 \text{ mm}$ , og Darcy friksjonsfaktor  $f_D = 0.019$ . Se bort ifra høydeforskjeller. Hva må trykket  $p_{1b}$  etter kontrollventilen (CV) være?
- Forklar kort (bruk gjerne en skisse) kontrollventilens rolle i forhold til pumpe- og system-karakteristikkene.

----- Gass: -----

**d)** En gass med  $cp = 2000 \text{ J/kg K}$  skal kjøles ned fra  $+45 \text{ }^\circ\text{C}$  til  $+20 \text{ }^\circ\text{C}$  i en varmeveksler vha. uteluft med tilnærmet konstant temperatur. Dersom  $LMTD = 20 \text{ K}$ , hva er da lufttemperaturen?

**e)** En forutsetning for Weymouthligningen er at man kan finne gjennomsnittsverdier for temperaturen  $T$  og kompressibilitetsfaktoren  $z$  gjennom rørledningen. Forklar hvorfor man for en lang, undersjøisk rørledning kan anta at gjennomsnittstemperaturen  $T_m$  er tilnærmet lik sjøbunns-temperaturen,  $T_{omg}$ .

(hint:  $T_m = LMTD + T_{omg}$ )

**f)** En gass med relativ tetthet (=specific gravity)  $\gamma_g = 0.75$  sendes inn på en 100 km lang, undersjøisk rørledning med et trykk på 250 bar a. Rørledningens diameter  $D = 30 \text{ cm}$ . Standard rate  $q_{sc} = 5 \cdot 10^6 \text{ Sm}^3/\text{d}$ . Sjøbunnstemperaturen  $T_{omg} = 6 \text{ }^\circ\text{C}$ , og gjennomsnittlig verdi for  $z = 0.89$ . Hva blir trykket ved mottaksterminalen, dersom Weymouthligningen legges til grunn?

Weymouthligningen i SI-enheter:

$$q_{sc} = 1.185 \cdot 10^7 \cdot \left[ \frac{T_{sc}}{p_{sc}} \right] \cdot \sqrt{\frac{(p_1^2 - p_2^2) D^{5.333}}{\gamma L T z}}$$

- $q_{sc}$  i  $\text{Sm}^3/\text{d}$
- $p$  i kPa
- $T$  i K
- $L$  og  $D$  i m

Standardbetingelser i SI-systemet:  $T_{sc} = 288.15 \text{ K}$ ,  $p_{sc} = 101.325 \text{ kPa}$

## Oppgave 2: Produksjonssystemet og strømning i reservoar

Oppgavetekst på engelsk ligger i vedlegg 1 på side i dersom du synes engelsk terminologi faller lettere enn norsk. Vi anbefaler studenten å lese engelsk tekst.

[Oppgave 2 teller med faktor 1 oppgave à 1 timer av 4 og gis vektning 1 (25 %) i bedømmelsen. Ved hvert delspørsmål er det angitt et antall kredittpoeng som viser hvor mye dette teller i bedømmingen. Hele oppgaven tilsvare 30 kredittpoeng.]

Svar kortfattet på følgende spørsmål:

- a.
  - i. Skisser i et diagram / figur (prinsippskisse) og list opp de viktigste komponentene i et petroleumproduksjonssystem (4.5 kredittpoeng)
  - ii. Vis i samme diagram hvor de følgende brønnstyringskomponentene er plassert: Nedihulls Sikkerhetsventil (DSV); produksjonspakning; og brønnhodechoke (1.5 kredittpoeng).
- b.
  - i. Forklar hva som definerer en Nedihulls Sikkerhetsventil (DSV) (3 kredittpoeng)
  - ii. Forklar kort hvordan DSV'en fungerer (3 kredittpoeng) - (se figur i **vedlegg 8**)
- c. Definer og angi de generelle ligningene for følgende strømningsregimer i et oljereservoar:
  - i. Transient strømning (2 kredittpoeng)
  - ii. Stasjonær (Steady state) strømning (2 kredittpoeng)
  - iii. Pseudostasjonær (Pseudo Steady state) strømning (2 kredittpoeng)
- d. Strømningsregimer i oljereservoaret
  - i. Bruk tydelig merkede figurer for å vise trykkfordelingen fra reservoaret til brønnen under
    1. Transient strømning (1.5 kredittpoeng)
    2. Stasjonær strømning (1.5 kredittpoeng)
    3. Pseudostasjonær strømning (1.5 kredittpoeng)
  - ii. Hvilket strømningsregime har vi ved oppstart av produksjon fra en brønn, og hvorfor? (1.5 kredittpoeng)
- e. Vi har oljereservoarene A, og B ved følgende betingelser: Reservoar A,  $p_e = 7000$  psi,  $p_b = 4500$  psi; Reservoar B,  $p_e = 7000$  psi,  $p_b = 7000$  psi
  - i. Definer hvert reservoar etter oljetype (2 kredittpoeng)
  - ii. Angi IPR-ligninger for strømning av reservoarfluid til brønn for hvert reservoar (2 kredittpoeng)
  - iii. Hvilket reservoar vil gi høyest produktivitet? Forklar kort (2 kredittpoeng)

## Oppgave 3: Strømning i brønn

[Oppgave 3 teller som 1 oppgaver à 1 time av 4 og gis vektning 1 (25 %) i bedømmelsen. Ved hvert delspørsmål er det angitt et antall kredittpoeng som viser hvor mye dette teller i bedømmingen. Hele oppgaven tilsvarer 30 kredittpoeng.]

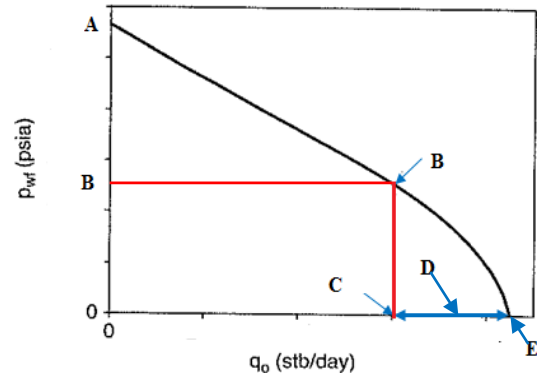
Oppgavetekst på engelsk ligger i vedlegg 1 på side ii og iii dersom du synes engelsk terminologi faller lettere enn norsk. Vi anbefaler studenten å se på engelsk tekst for å sikre riktig forståelse av oppgavestilling.

- a. To vertikale brønner; brønn A, og brønn B, med konstant diameter  $D$  produserer fra et reservoar. Brønn A produserer olje, og brønn B produserer gass.
- Angi den enkleste formen for TPR-ligninger for brønn A, og for brønn B (2 kredittpoeng)
  - Hvilke forutsetninger må gjøres for å sette opp de forenklede ligningene? (2 kredittpoeng)
  - Hvilke(t) ledd bidrar mest til det totale trykkfall i brønn A, og brønn B? (1 kredittpoeng)
  - Hvilket ledd i totaltrykkfallet må fjernes hvis vi antar at brønnen er et horisontalt rør? (1 kredittpoeng)
- b. Med tabellen som er gitt nedenfor,

$q_{o,test}$	$p_{wf,test}$	$p_{wh,test}$
0	$p_{e,init}$	
$q_{o,1}$	$p_{wf,1}$	$p_{wh,1}$
$q_{o,2}$	$p_{wf,2}$	$p_{wh,2}$
$q_{o,3}$	$p_{wf,3}$	$p_{wh,3}$

- Vis kort hvordan en IPR-kurve og en TPR-kurve kan bestemmes fra brønntestdata, hvis vi har strømning på et minimum brønnehodetrykk =  $p_{wh,min}$ . (3 kredittpoeng)
- Lag et plott av IPR- og TPR-kurvene, og indikerer på plottet brønntrykket og produksjonsraten hvor vi har stabil strømning i brønnen. (3 kredittpoeng)

- c. En brønn produserer fra et 'delvis to-fase' oljereservoar med IPR-kurven som er angitt i figuren nedenfor.  $p_e = 6500$  psi,  $p_b = 4500$  psi, og brønnen produserer 600 stb/d ved  $p_{wf} = 5000$  psi. Finn verdiene av A, B, C, D, og E. (6 kredittpoeng)



- d. Fra uttrykket for totalt trykkfall;  $\Delta P = \frac{g}{g_c} \cdot \rho \cdot \Delta z + \frac{f_M \cdot \rho \cdot u^2 \cdot L}{2 \cdot g_c \cdot D}$ , utled uttrykket

for det totale trykkfallet for enfase gasstrømning gjennom en brønn med lengde  $L$ , og en helningsvinkel i forhold til horisontalen  $\theta$ . Endelig svar må være på formen

$$\Delta P = \Delta P_{PE} + \Delta P_F = \frac{\rho_{mean} \cdot g}{g_c} \cdot L \cdot \sin \theta + \frac{8 \cdot f_M \cdot \rho_{mean}}{\pi^2 \cdot g_c \cdot D^5} \cdot \left( q_{sc} \cdot Z_{mean} \cdot \left( \frac{T_{mean}}{T_{sc}} \right) \left( \frac{p_{sc}}{p_{mean}} \right) \right)^2 \cdot L$$

Vis alle trinnene som fører til det endelige svaret! - (sc = standard conditions). (8 kredittpoeng)

**Tips: Gassen er kompressibel. Derfor:  $\rho, u, q = f(p, V, T)$ .**

- e. Beregn  $\Delta P_{PE}$  og  $\Delta P_{KE}$  for strømning av olje i et produksjonsrør som har en innsnevring (i.e  $D_1 \neq D_2$ ). Diameteren på innløpet  $D_1 = 2.875$  inch, og på utløpet  $D_2 = 2.259$  inch, oljens strømningsrate  $Q_o = 1000$  bbl/d, viskositet  $\mu_o = 1.2$  cp, tetthet  $\rho_o = 51.48$  lbm/ft<sup>3</sup>, helningsvinkel i forhold til horisontalen,  $\theta = 75^\circ$ ,  $\varepsilon = 0.001$ , og lengde  $L = 1000$  ft. (4 kredittpoeng)

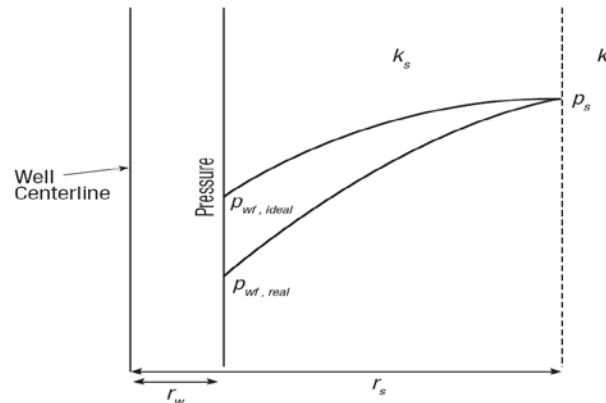
## Oppgave 4: Gassløft, Brønnstimulering, og flow kontroll

[Oppgave 4 teller som 1 oppgaver à 1 timer av 4 og gis vektning **1 (25 %)** i bedømmelsen. Ved hvert delspørsmål er det angitt et antall kredittpoeng som viser hvor mye dette teller i bedømmingen. Hele oppgaven tilsvarer 30 kredittpoeng.]

Oppgavetekst på engelsk ligger i vedlegg 1 på side iv og v dersom du synes engelsk terminologi faller lettere enn norsk. Vi anbefaler studenten å se på engelsk tekst for å sikre riktig forståelse av oppgavestilling.

- a. Brønnperforering
  - i. Hva er en perforering av en olje- og gassbrønn? (1.5 kredittpoeng)
  - ii. Drøft kort 3 viktige faktorer ved perforering av en brønn (4.5 kredittpoeng)
  
- b. Sandkontroll
  - i. Forklar kort hva som forårsaker sandproduksjon i olje- og gassbrønner (1 kredittpoeng)
  - ii. List opp 2 problemer assosiert med sandproduksjon (2 kredittpoeng)
  - iii. Angi 2 måter for å kontrollere sandproduksjon (2 kredittpoeng)
  - iv. Hva blir  $d_{50}$ -sand brukt til, i forbindelse med sandkontroll? (1 kredittpoeng)
  
- c. Frakturering (oppsprekking)
  - i. Forklar kort og illustrerer de 3 trinnene i en fraktureringsprosess (3 kredittpoeng)
  - ii. Frakturering gjøres vanligvis vha. sand eller proppants. Hva er kravet til sand/proppants **permeabilitet** og **hardhet** i forhold til reservoaret, for å sikre god konduktivitet i sprekkene? (2 kredittpoeng)
  - iii. Et reservoar med permeabilitet  $k_R$ , har blitt frakturert. Resulterende sprekk lengde for en rektangulær sprekk er 254,62 m. Hva blir sprekk lengde for en elliptisk sprekk? (1 kredittpoeng)

- d. Et reservoar med følgende reservoar- og fluid data:
- Viskositet olje,  $\mu_o = 1.5$  cp, volumfaktor olje,  $B_o = 1.7$ , Relativ tetthet olje,  $\gamma_o = 0.78$ ,  $GOR = R_s = 1000$  scf/stb
  - Reservoar tykkelse mot brønn,  $h = 100$  ft, permeabilitet,  $k = 75$  mD, porøsitet  $\phi = 0.2$
  - Brønnens radius,  $r_w = 4.5$  in, dreneringsradius reservoar,  $r_e = 1000$  ft
  - Produksjonsrøret har diameter 2.875" (2.875 tommer).
- i. Utled uttrykket for trykkfallet grunnet skin,  $\Delta p_s$ , i nærbrønnområdet for et reservoar, som illustrert i figuren nedenfor.



Near-wellbore zone. Ideal and real flowing bottomhole pressures.

Figuren viser trykkresponsen til en brønn ved en gitt produksjonsrate,  $q_o$ , med trykk,  $p_s$ , ved radius  $r_s$ , i nærbrønnområdet. Trykket ved brønnen uten skin er  $p_{wf,ideal}$ , og trykket ved brønn med skin  $p_{wf,real}$ . (3 kredittpoeng)

- ii. Reservoar- og fluid data er som gitt over. Reservoaret har en skin-sone på 3 ft, og permeabilitet i skin-sonen er 15 mD. Beregn skinfaktoren,  $s$ , og trykkfallet grunnet skin,  $\Delta p_s$ , for en strømningsrate på  $q_o = 600$  stb/d. (3 kredittpoeng)
- e. Gassløft
- Hva er effekten av gassløft på TPR for en brønn? Illustrer dette med TPR-kurver for økende gassinjeksjonsrater  $q_{g1} < q_{g2} < q_{g3}$ . (2 kredittpoeng)
  - På hvilket tidspunkt under gassløft vil en ytterligere økning i gassinjeksjonsraten  $q_g$ , være urealistisk? (1 kredittpoeng)
  - Gass injiseres i en brønn for å holde produksjonen på 600 stb/d, ved et brønnhodetrykk på  $p_{wh} = 1500$  psi. Oljens naturlige GLR = 1000 scf/stb. Dersom nødvendig GLR for gassløft er 2000 scf/stb; beregn trykkfallet over brønnen under gassløft (bruk gradientkurvedigrammet i **vedlegg 7**, for å vise løsningen). Beregn gassinjeksjonsraten. (3 kredittpoeng).



## Vedlegg 1: Engelsk oppgavetekst oppgave 2, 3 og 4

**OBS Merk:** Hver oppgave teller likt, men hvert delspørsmål vektet med et antall kredittpoeng (points) som definert i oppgavetekst på norsk foran.

### Question 2 Petroleum production system and flow in reservoir

- a.**
- i. Sketch on a diagram and list the main elements of a petroleum production system (4.5 points)
  - ii. Show where on the diagram the following well equipment are placed: The, Downhole safety valve (DSV); the production packer; and wellhead choke (1.5 points).
- b.**
- i. Define a Downhole safety valve (DSV) (3 points).
  - ii. Describe briefly how the DSV works (3 points) - (see figure in vedlegg 8)
- c.** Define and give the general equations for the following flow regimes in an oil reservoir:
- i. Transient flow (2 points)
  - ii. Steady state flow (2 points)
  - iii. Pseudo-steady state flow (2 points)
- d.** Flow regimes in the reservoir
- i. Use clearly labeled figures to show the pressure distribution from the reservoir to the well during
    1. Transient flow (1.5 points)
    2. Steady state flow (1.5 points)
    3. Pseudo-steady state flow (1.5 points)
  - ii. What flow regime would we have upon start-up of a well, and why? (1.5 points)
- e.** We have oil reservoirs A, and B with the following conditions: Reservoir A,  $p_e = 7000$  psi,  $p_b = 4500$  psi; Reservoir B,  $p_e = 7000$  psi,  $p_b = 7000$  psi
- i. Define each reservoir according to fluid type (2 points)
  - ii. Give the IPR equations that represent the flow of reservoir fluid to a well for each reservoir (2 points)
  - iii. Which reservoir will give higher productivity? Explain briefly (2 points)

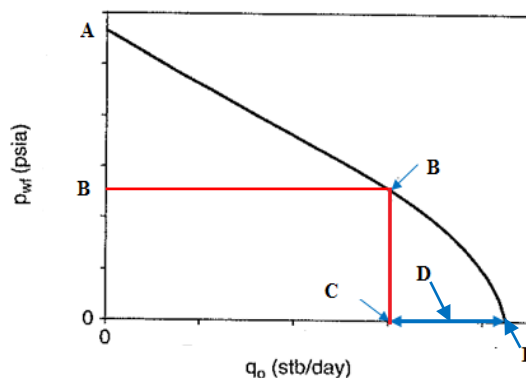
### Question 3: Well flow

- a. Two vertical wells well A, and well B, of constant diameter  $D$  are producing from a reservoir. Well A produces oil, and well B produces gas.
- Give the simplest form of TPR equations for well A, and for well B (2 points)
  - What assumptions must be made to get the simplified equations? (2 points)
  - Which term contributes the most to the total pressure in well A, and well B (1 point)
  - What term in the total pressure drop equation must be removed if we assume the well to be a horizontal pipe? (1 point)

- b. With the table given below,

$q_{o,test}$	$p_{wf,test}$	$p_{wh,test}$
0	$p_{e,init}$	
$q_{o,1}$	$p_{wf,1}$	$p_{wh,1}$
$q_{o,2}$	$p_{wf,2}$	$p_{wh,2}$
$q_{o,3}$	$p_{wf,3}$	$p_{wh,3}$

- Briefly outline how a IPR-curve and TPR-curve can be determined from well test data, if we flow the well at a minimum wellhead pressure =  $p_{wh,min}$  (3 points)
  - Make a plot of the IPR and TPR curves, and indicate on the plot the flowing well pressure and production rate at which we have stable flow to the well. (3 points)
- c. A well produces from a 'partial two-phase' oil reservoir with the IPR curve given in the figure below.  $p_e = 6500$  psi,  $p_b = 4500$  psi, and the well produces 600 stb/d of oil at  $p_{wf} = 5000$  psi. Find the values of A, B, C, D, and E. (6 points)



- d. From the expression for total pressure drop;  $\Delta P = \frac{g}{g_c} \cdot \rho \cdot \Delta z + \frac{f_M \cdot \rho \cdot u^2 \cdot L}{2 \cdot g_c \cdot D}$ ,

derive the expression for total pressure drop for single phase gas flow across a well with length L, and an angle of inclination to the horizontal  $\theta$ . Final answer must be in the form

$$\Delta P = \Delta P_{PE} + \Delta P_F = \frac{\rho_{mean} \cdot g}{g_c} \cdot L \cdot \sin \theta + \frac{8 \cdot f_M \cdot \rho_{mean}}{\pi^2 \cdot g_c \cdot D^5} \cdot \left( q_{sc} \cdot Z_{mean} \cdot \left( \frac{T_{mean}}{T_{sc}} \right) \left( \frac{p_{sc}}{p_{mean}} \right) \right)^2 \cdot L$$

Show all steps leading to the final answer! (sc = standard conditions) (8 points)

**Tip: Gas is a compressible fluid. Thus:  $\rho$ ,  $u$ ,  $q = f(p, V, T)$ .**

- e. Calculate  $\Delta P_{PE}$  and  $\Delta P_{KE}$  for flow of oil in a production tubing which has a constriction (i.e  $D_1 \neq D_2$ ). The diameter at the inlet  $D_1 = 2.875$  inch, and outlet  $D_2 = 2.259$  inch, the oil flowrate  $Q_o = 1000$  bbl/d, viscosity  $\mu_o = 1.2$  cp, density  $\rho_o = 51.48$  lbm/ft<sup>3</sup>, angle of inclination to the horizontal,  $\theta = 75^\circ$ ,  $\varepsilon = 0.001$ , and length  $L = 1000$  ft. (4 points)

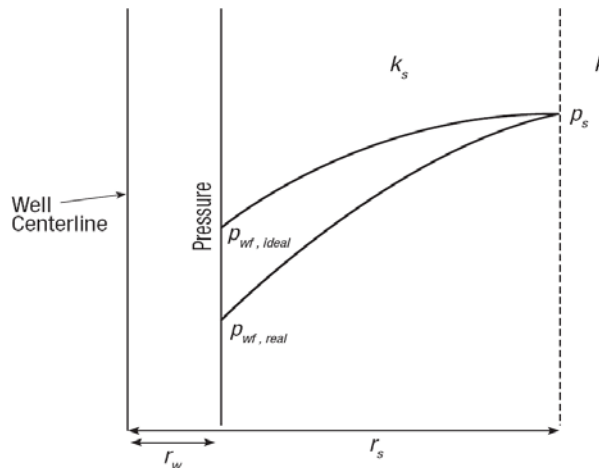
### Question 4 Gaslift, Production enhancement, and flow control:

- a. Well perforation
  - i. What is a perforation of an oil and gas well? (1.5 points)
  - ii. Discuss briefly any 3 important factors in perforating a well (4.5 points)
  
- b. Sand control
  - i. State briefly what causes sand production in oil and gas wells (1 point)
  - ii. List 2 problems associated with sand production (2 points)
  - iii. Give 2 ways to control sand production (2 points)
  - iv. What is  $d_{50\text{-sand}}$  used for, in relation to sand control? (1 point)
  
- c. Well fracturing
  - i. State briefly and illustrate the 3 steps of a fracturing process (3 points)
  - ii. Fracturing is usually done with the aid of sand or proppant. What is the requirement for sand/proppant **permeability** and **hardness** with respect to the reservoir, in order to endure good fracture conductivity? (2 points)
  - iii. A reservoir permeability  $k_R$ , was fractured. The resulting fracture length for a rectangular fracture is 254.62 m. What will be the fracture length for an elliptical fracture? (1 point)

d. A reservoir with the following reservoir data, and fluid data:

- Oil viscosity,  $\mu_o = 1.5$  cp, oil volume factor,  $B_o = 1.7$ , Relative density of oil  $\gamma_o = 0.78$ ,  $GOR = R_s = 1000$  scf/stb
- The reservoir thickness,  $h = 100$  ft, permeability,  $k = 75$  mD, porosity  $\phi = 0.2$
- The well radius,  $r_w = 4.5$  in, reservoir drainage radius,  $r_e = 1000$  ft
- Diameter of the production tubing is 2.875 in.

i. Derive the expression for pressure drop due to skin,  $\Delta p_s$ , in the near-wellbore area of a reservoir as illustrated in the figure below



Near-wellbore zone. Ideal and real flowing bottomhole pressures.

The figure shows the pressure response to a well at a given production rate,  $q_o$ , with pressure  $p_s$  at the near-wellbore area radius,  $r_s$ . Pressure at the well without skin is  $p_{wf,ideal}$ , and pressure at the well with skin is  $p_{wf,real}$ . (3 points)

ii. The reservoir and fluid properties are as given above. The reservoir has a skin zone of 3 ft, and the permeability in the skin zone is 15 mD. Calculate the skin factor, and the pressure drop due to skin, for a flow rate of  $q_o = 600$  stb/d. (3 points)

e. Gas lift

- What is the effect of gaslift on the TPR of a well? Illustrate this with TPR-curves at increasing gas injection rates  $q_{g1} < q_{g2} < q_{g3}$ . (2 points)
- At what point during gaslift will a further increase in the gas injection rate  $q_g$ , be unrealistic? (1 point)
- Gas is injected into a well to maintain production at 600 stb/d, at a wellhead pressure of  $p_{wh} = 1500$  psi. The natural flowing GLR = 1000 scf/stb. If the GLR required for gaslift is 2000 scf/stb; calculate the pressure drop across the well during gaslift (use the gradient curve diagram in vedlegg 7, to show your solution). Calculate the gas injection rate. (3 points)

## Vedlegg 2: Generelle likninger

På de tre neste sidene er det listet opp en del likninger relatert til innstrømning i brønn og produksjonseffektivitet. De fleste likningene er gitt på en form som benytter US feltenheter. Det forutsettes at betegnelser for størrelsene som inngår i likningene er kjent.

$$q_o = \frac{hk}{141.2\mu_o B_o} \cdot \frac{(p_e - p_{wf})}{\left(\ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right) - 0.75 + s\right)}$$

$$q_o = \frac{hk}{141.2\mu_o B_o} \cdot \frac{(p_e - p_{wf})}{\left(\ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right) - 0.5 + s\right)}$$

$$q_o = J \cdot (p_e - p_{wf})$$

$$\frac{q_{o,tillegg}}{q_{max,tillegg}} = 1 - 0.2 \left(\frac{p_{wf}}{p_b}\right) - 0.8 \left(\frac{p_{wf}}{p_b}\right)^2, \quad q_{max,tillegg} = \frac{Jp_b}{1.8}$$

$$q_o - q_{ob} = \frac{hk}{141.2\mu_o B_o} \cdot \frac{(p_e^2 - p_{wf}^2)}{\left(\ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right) - 0.75 + s\right) \cdot 2p_b}, \quad p_e > p_b, p_{wf} < p_b$$

$$q_o = \frac{hk}{141.2\mu_o B_o} \cdot \frac{(p_e^2 - p_{wf}^2)}{\left(\ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right) - 0.75 + s\right) \cdot 2p_b}, \quad p_e \leq p_b$$

$$q_o = \frac{0.703 \cdot hk}{T \cdot \mu_o \cdot Z} \cdot \frac{(p_b^2 - p_{wf}^2)}{\left(\ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right) - 0.75 + s\right)}$$

$$q_o = C \cdot (p_b^2 - p_{wf}^2)^n$$

$$q_g = C \cdot (p_e^2 - p_{wf}^2)^n, \quad n = \frac{\log \frac{q_{g1}}{q_{g2}}}{\log \frac{p_e^2 - p_{wf1}^2}{p_e^2 - p_{wf2}^2}}$$

$$\frac{PV}{znRT} = \text{constant}$$

$$q = \frac{V}{t}$$

$$q_f = \frac{k_f}{\mu} \cdot A_f \frac{\partial P}{\partial r} = w \cdot h \cdot \frac{k_f}{\mu} \cdot \frac{\partial P}{\partial r}$$

$$q_R = 2 \frac{k_R}{\mu} \cdot A_R \frac{\partial P}{\partial r} = 2r_R \cdot h \cdot \frac{k_R}{\mu} \cdot \frac{\partial P}{\partial r}$$

$$F_{CD} = \frac{q_f}{q_R} = \frac{k_f}{k_R} \frac{w}{r}$$

$$F_{CD,e} = \frac{q_{f,e}}{q_R} = \frac{\pi}{4} \frac{k_{f,e}}{k_R} \frac{w}{r}$$

$$\Delta P = p_{wf} - p_{wh} = \rho \cdot g \cdot \Delta z + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \Delta u^2 + \frac{2 \cdot f_f \cdot \rho \cdot u^2 \cdot L}{D}$$

eller: 
$$\Delta P = \frac{g}{g_c} \cdot \rho \cdot \Delta z + \frac{1}{2} \cdot \frac{\rho}{g_c} \cdot \Delta u^2 + \frac{2 \cdot f_f \cdot \rho \cdot u^2 \cdot L}{g_c \cdot D}$$

$$g = 32.17 \text{ ft/s}^2$$

$$g_c = 32.17 \text{ (lb}_m \text{ ft)/(lb}_f \text{ s}^2)$$

$$\Delta P_F \propto K \cdot \frac{q^2}{D^5}$$

$$N_{Re,o} = \frac{1.48 \cdot \rho \cdot q_o}{\mu \cdot D}$$

$$N_{Re,g} = \frac{20.09 \cdot \gamma_g \cdot q_g}{\mu \cdot D}$$

$$P_{inj,ann} = P_{surf} \cdot \left( 1 + \frac{H_{inj}}{40\,000} \right)$$

$$HHP = 2.23 \cdot 10^{-4} \cdot q_g \cdot \left[ \left( \frac{P_{surf}}{P_{in}} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1 \right] \text{ [hp]}$$

$$s = \frac{k \cdot h}{141.2 \cdot B_o \cdot \mu_o \cdot J} - \left[ \ln \frac{r_e}{r_w} - \frac{3}{4} \right]$$

$$s = \left( \frac{k}{k_s} - 1 \right) \cdot \ln \frac{r_s}{r_w}$$

$$E_f = \frac{q_{reell}}{q_{ideell}} = \frac{\left( \ln \left( \frac{r_e}{r_w} \right) - 0.75 \right)}{\left( \ln \left( \frac{r_e}{r_w} \right) - 0.75 + s \right)}$$

$$\Delta p_s = \frac{q_o \cdot 141.2 \cdot B_o \cdot \mu_o}{k \cdot h}$$

$$\beta = \frac{v_{\text{mineral}} \cdot MW_{\text{mineral}}}{v_{\text{acid}} \cdot MW_{\text{acid}}}$$

$$\chi = \beta \cdot \frac{\rho_{acid\ solution}}{\rho_{mineral}}$$

$$\frac{p}{\rho} = zRT$$

$$m = Q \cdot \rho_{std} = q \cdot \rho$$

$$p_r = \frac{p}{p_c} \quad T_r = \frac{T}{T_c}$$

$$\gamma = \frac{M}{M_{luft}} \quad (M_{luft} = 29 \text{ g/mol})$$

$$R = \frac{R_0}{M} \quad [J/g\ K]$$

$$v_{max} = K \sqrt{\frac{\rho_L - \rho_g}{\rho_g}} \quad [ft/s]$$

$$q_L = \frac{V_L}{\tau} \quad [m^3/s]$$

$$w_s = p_1 v_1 \frac{k}{k-1} \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]$$

$$Re_D = \frac{\rho u D}{\mu}$$

$$\Delta p_f = \frac{1}{2} \rho u^2 \cdot f_D \frac{L}{D}$$

$$\Delta p_f = \frac{1}{2} \rho u^2 \cdot \Sigma K$$

$$\dot{Q} = \dot{m} C_p (T_o - T_i)$$

$$\dot{Q} = U \cdot A \cdot LMTD$$

$$LMTD = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)}$$

$$\Delta T = \frac{K_H W}{M(100 - W)}, \quad K_H = 1297 \left[ \frac{g}{(mol \cdot ^\circ C)} \right]$$



## Vedlegg 3: Spesielle enheter

### Special Units

#### API GRAVITY (OF OIL)

$$\gamma(\text{water} = 1) = \frac{141.5}{131.5 + ^\circ\text{API}}$$

#### API BARREL

$$1 \text{ API bbl} = 42 \text{ U.S. gallons} = 35 \text{ U. K. (Imperial) gallons} \\ = 5.61 \text{ ft}^3 = 0.159 \text{ m}^3 = 159 \text{ liters}$$

#### LIQUID FLOWRATE

$$1 \text{ bbl/D} = 1.84 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s} = 0.159 \text{ m}^3/\text{D}$$

#### GAS-OIL RATIO

$$1 \text{ scf/STB} = 0.178 \text{ m}^3/\text{m}^3$$

The field units most frequently used are

- length: feet (ft)
- pressure: lb<sub>m</sub>/in.<sup>2</sup> (psi)
- volume: barrels (bbl) for liquid standard cubic feet (scf) for gas
- volumetric rate: stock tank barrels per day (STB/D) for oil, standard cubic feet per day (scf/D) for gas
- viscosity: centipoise (cp)
- permeability: millidarcy (md)
- time: hours or days, according to the application
- oil density: API gravity ( $^\circ\text{API}$ ), pounds per cubic foot (lb<sub>m</sub>/ft<sup>3</sup>)
- gas density: pounds per cubic foot (lb<sub>m</sub>/ft<sup>3</sup>)
- temperature: degrees Fahrenheit ( $^\circ\text{F}$ ), absolute temperature ( $^\circ\text{F} + 459.67$ ) degrees Rankine ( $^\circ\text{R}$ ).

Table C.1 Mechanical Quantities in SI Units

	Quantity	Dimension	Unit	Alias	Symbol
Secondary	Length	L	meter		m
	Time	T	second		s
	Mass	M	kilogram		kg
	Velocity	L/T	m/s		
	Acceleration	L/T <sup>2</sup>	m/s <sup>2</sup>		
Primary	Frequency	1/T	1/s	hertz	Hz
	Force	ML/T <sup>2</sup>	kg × m/s <sup>2</sup>	newton	N
	Pressure	M/T <sup>2</sup> L	kg/(s <sup>2</sup> × m) = N/m <sup>2</sup>	pascal	Pa
	Energy	ML <sup>2</sup> /T <sup>2</sup>	kg × m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> = N × m	joule	J
	Power	ML <sup>2</sup> /T <sup>3</sup>	kg × m <sup>2</sup> /s <sup>3</sup> = J/s	watt	W

Table C.2 Mechanical Quantities in English Engineering Units

	Quantity	Dimension	Unit	Alias	Symbol
Secondary	Length	L	foot		ft
	Time	T	second		s
	Mass	M	pound-mass		lb <sub>m</sub>
	Force	F	pound-force		lbf
	Velocity	L/T	ft/s		
Primary	Acceleration	L/T <sup>2</sup>	ft/s <sup>2</sup>		
	Frequency	1/T	1/s	hertz	Hz
	Pressure	F/L <sup>2</sup>	lb <sub>f</sub> /ft <sup>2</sup>		
	Energy	LF	ft × lb <sub>f</sub>		
	Power	LF/T	ft × lb <sub>f</sub> /s		

Table C.3 SPE Preferable Metric Units

Quantity	Symbol	SI	Preferred	Conversion
Flow rate	<i>q</i>	m <sup>3</sup> /s	dm <sup>3</sup> /s	1 dm <sup>3</sup> /s = 10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /s
Permeability	<i>k</i>	m <sup>2</sup>	μm <sup>2</sup>	1 μm <sup>2</sup> = 10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup>
Pressure	<i>p</i>	Pa	kPa	1 kPa = 1000 Pa
Time	<i>t</i>	s	h	1 h = 3600 s
Compressibility	<i>c</i>	1/Pa	1/kPa	1/kPa = 0.001 1/Pa

## Vedlegg 4: Universell gasskonstant, R

**Table A.2 Values of the universal gas constant**

$$\begin{aligned}
 R &= 8.314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1} = 8.314 \text{ m}^3 \text{ Pa mol}^{-1} \text{ K}^{-1} \\
 &= 83.14 \text{ cm}^3 \text{ bar mol}^{-1} \text{ K}^{-1} = 8,314 \text{ cm}^3 \text{ kPa mol}^{-1} \text{ K}^{-1} = 82.06 \text{ cm}^3(\text{atm})\text{mol}^{-1} \text{ K}^{-1} \\
 &= 62,356 \text{ cm}^3(\text{torr})\text{mol}^{-1} \text{ K}^{-1} \\
 &= 1.987(\text{cal})\text{mol}^{-1} \text{ K}^{-1} = 1.986(\text{Btu})(\text{lb mol})^{-1}(\text{R})^{-1} \\
 &= 0.7302(\text{ft})^3(\text{atm})(\text{lb mol})^{-1}(\text{R})^{-1} = 10.73(\text{ft})^3(\text{psia})(\text{lb mol})^{-1}(\text{R})^{-1} \\
 &= 1,545(\text{ft})(\text{lb}_f)(\text{lb mol})^{-1}(\text{R})^{-1}
 \end{aligned}$$

## Vedlegg 5: Omregningstabeller US ↔ SI

282 APPENDICES

### Appendix A: Unit Conversion Factors

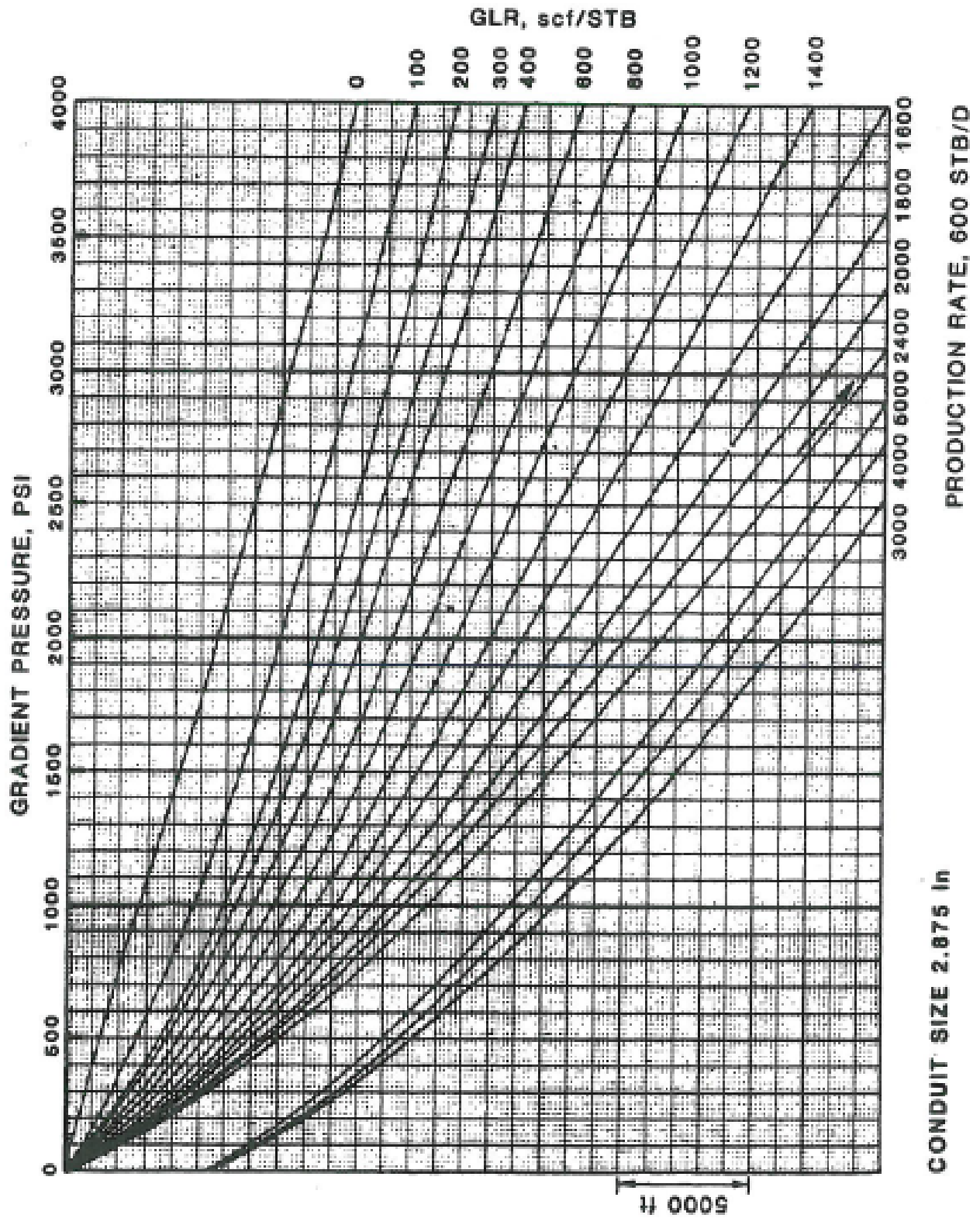
Quantity	U.S. Field unit	To SI unit	To U.S. Field unit	SI unit
Length ( <i>L</i> )	feet (ft)	<del>0.3048</del> 0.3048	3.2808	meter (m)
	mile (mi)	1.609	0.6214	kilometer (km)
	inch (in.)	25.4	0.03937	millimeter (mm)
Mass ( <i>M</i> )	ounce (oz)	28.3495	0.03527	gram (g)
	pound (lb)	0.4536	2.205	kilogram (kg)
	lbm	0.0311	32.17	slug
	Volume ( <i>V</i> )	gallon (gal)	0.003785	264.172
	cu. ft. (ft <sup>3</sup> )	0.028317	35.3147	meter <sup>3</sup> (m <sup>3</sup> )
	barrel (bbl)	0.15899	6.2898	meter <sup>3</sup> (m <sup>3</sup> )
	Mcf (1,000 ft <sup>3</sup> , 60 °F, 14.7 psia)	28.317	0.0353	Nm <sup>3</sup> (15 °C, 101.325 kPa)
Area ( <i>A</i> )	sq. ft (ft <sup>2</sup> )	$9.29 \times 10^{-2}$	10.764	meter <sup>2</sup> (m <sup>2</sup> )
	acre	$4.0469 \times 10^3$	$2.471 \times 10^{-4}$	meter <sup>2</sup> (m <sup>2</sup> )
	sq. mile	2.59	0.386	(km) <sup>2</sup>
Pressure ( <i>P</i> )	lb/in. <sup>2</sup> (psi)	6.8948	0.145	kPa (1000 Pa)
	psi	0.0680	14.696	atm
	psi/ft	22.62	0.0442	kPa/m
	inch Hg	$3.3864 \times 10^3$	$0.2953 \times 10^{-3}$	Pa
Temperature ( <i>t</i> )	F	0.5556(F-32)	1.8C+32	C
	Rankine (°R)	0.5556	1.8	Kelvin (K)
Energy/work ( <i>w</i> )	Btu	252.16	$3.966 \times 10^{-3}$	cal
	Btu	1.0551	0.9478	kilojoule (kJ)
	ft-lbf	1.3558	0.73766	joule (J)
	hp-hr	0.7457	1.341	kW-hr
Viscosity ( $\mu$ )	cp	0.001	1,000	Pa·s
	lb/ft-sec	1.4882	0.672	kg/(m-sec) or (Pa·s)
	lbf-s/ft <sup>2</sup>	479	0.0021	dyne-s/cm <sup>2</sup> (poise)
Thermal conductivity ( <i>k</i> )	Btu-ft/hr-ft <sup>2</sup> -F	1.7307	0.578	W/(m·K)
Specific heat ( <i>C<sub>p</sub></i> )	Btu/(lbm·°F)	1	1	cal/(g·°C)
	Btu/(lbm·°F)	$4.184 \times 10^3$	$2.39 \times 10^{-4}$	J/(kg·K)
Density ( <i>P</i> )	lbm/ft <sup>3</sup>	16.02	0.0624	kg/m <sup>3</sup>
Permeability ( <i>k</i> )	md	0.9862	1.0133	mD (= 10 <sup>-15</sup> m <sup>2</sup> )
	md (= 10 <sup>-3</sup> darcy)	$9.8692 \times 10^{-16}$	$1.0133 \times 10^{15}$	m <sup>2</sup>

Temperatur:  $K = 273.15 + ^\circ C$ ,  $R = 459.67 + ^\circ F$  ( $\approx 460 + ^\circ F$ )

## Vedlegg 6: Konstanter til choke beregninger

Correlation	<i>C</i>	<i>m</i>	<i>n</i>
Gilbert	10	0.546	1.89
Ros	17.4	0.5	2
Baxendell	9.56	0.546	1.93

Vedlegg 7: Gradientkurvediagram 2.875" produksjonsrør



### Vedlegg 8: Diagram av DSV i åpen og lukket stilling

