

1- POROZNOST STIJENE

Uvod

Poroznost (ϕ) bitno je svojstvo stijena iz ležišta ugljikovodika, jer ležišni fluidi (plin, nafta i voda) ispunjavaju pore stijene. Najveća moguća količina fluida u određenom *ukupnom* ili vanjskom volumenu (V_b) stijene, jednaka je pripadnom volumenu pora, (V_p , *porni* volumen), dok se ostatak ukupnog volumena stijene odnosi na volumen *krute matrice* (V_s , volumen *zrna*) stijene. U skladu s tim vrijedi $V_b = V_p + V_s$ a poroznost je definirana kao udjel pora u ukupnom volumenu stijene:

$$\phi = \frac{V_p}{V_b} = \frac{V_b - V_s}{V_b} \quad (0.1)$$

te se izražava udjelom u jediničnom ukupnom volumenu stijene, a često i postotkom.

U složenoj strukturi pornog prostora, uz međusobno povezane pore postoje i izolirane pore, koje ne komuniciraju s povezanim porama. Protok fluida omogućuju samo spojene pore, te se razlikuje *efektivna poroznost* (uključuje samo povezane pore), koja je manja od *apsolutne poroznosti* (povezane + izolirane pore). U naftnom inženjerstvu najvažnija je efektivna poroznost.

Iz (0.1) jasno je da za određivanje poroznosti, od tri veličine (V_b , V_p i V_s) treba poznavati barem dvije. Ove veličine se određuju eksperimentalnim mjerenjima na uzorcima stijene (jezgre) različitim metodama, napr.:

Ukupni (vanjski) volumen, V_b

1. Računanjem volumena iz dimenzija jezgre, izrezane u pravilni geometrijski oblik, najčešće valjak;
2. Volumetrijskom metodom, uranjanjem u živu (najprikladnija metoda za uzorke jezgre nepravilnog oblika, krhotine)
3. Gravimetrijskom metodom, vaganjem jezgre, zasićene fluidom prije i poslije uranjanja u taj isti fluid;

Volumen pora, V_p

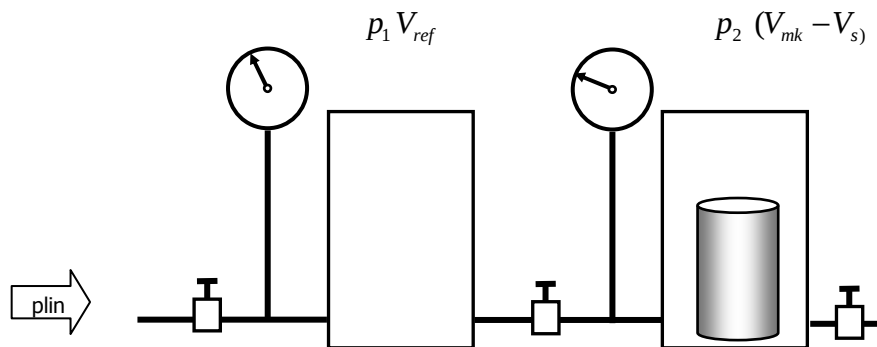
1. Volumetrijskom metodom, injektiranjem Hg u pore uzorka (destruktivna metoda)
2. Gravimetrijskom metodom, vaganjem suhe jezgre, te nakon toga zasićene fluidom poznate gustoće;

Volumen zrna (kruta matrica), V_s

1. Metodom određivanja gustoće usitnjene stijene piknometrom (uz ovako određen V_s dobije se apsolutna poroznost)
2. Metodom ekspanzije plina, primjenom Boyleovog zakona

Određivanje poroznosti metodom ekspanzije plina

Metoda se sastoji u tome da se jezgra stavi u mjernu komoru porozimetra, poznatog volumena V_{mk} , pri atmosferskom tlaku ili vakuumu (p_2), koja je spojena s referentnom komorom poznatog volumena V_{ref} . Pri zatvorenom ventilu između komora, tlak plina u referentnoj komori poveća se na p_1 . Ventil između dvije komore se tada otvori pri čemu plin ekspanzira iz V_{ref} u V_{mk} sve dok se tlak u obje komore ne izjednači na vrijednost p_e , pri čemu je $p_1 > p_e > p_2$.



Ukupna količina (molovi) plina u sustavu, prema Boyleovom zakonu, je

$$n = n_1 + n_2 \quad (0.2)$$

i raspodijeljena je prije ekspanzije na

$$n_1 = \frac{p_1 V_{ref}}{RT} \quad \text{u referentnoj komori, odnosno,} \quad (0.3)$$

$$n_2 = \frac{p_2 (V_{mk} - V_s)}{RT} \quad \text{u mjernoj komori,} \quad (0.4)$$

budući da je efektivni volumen mjerne ćelije jednak volumenu same ćelije, umanjenom za volumen krute matrice analiziranog uzorka porozne stijene (pri ekspanziji plin prodire u pore uzorka, ali ne i u minerale stijene).

Nakon ekspanzije vrijedi.

$$n = \frac{p_e (V_{ref} + V_{mk} - V_s)}{RT} \quad (0.5)$$

Ako se pretpostavi da je temperatura konstantna tijekom mjerenja, može se eliminirati član RT , pa supstitucijom u (0.2) dobiva se

$$p_e (V_{ref} + V_{mk} - V_s) = p_1 V_{ref} + p_2 (V_{mk} - V_s) \quad (0.6)$$

iz čega se može izvesti da je volumen zrna analiziranog uzorka jednak

$$V_s = \frac{V_{ref} (p_e - p_1) + V_{mk} (p_e - p_2)}{(p_e - p_2)} \quad (0.7)$$

Na temelju volumena krute faze uzorka, izračunanog iz (0.7), računa se poroznost prema (0.1).

Treba napomenuti da za ekspanziju plina u mjernu komoru *bez* uzorka stijene vrijedi

$$p_e (V_{ref} + V_{mk}) = p_1 V_{ref} + p_2 (V_{mk} - V_s) \quad (0.8)$$

tako da se s čeličnim kalibracijskim cilindrom poznatog volumena, na temelju (0.6) i (0.8) mogu odrediti volumeni V_{ref} i V_{mk} .

Određivanje V_s iz kalibracijske krivulje.

Opisana mjerenja mogu se vršiti tako da se rabi *uvijek isti početni tlak*, p_1 , plina u referentnoj komori, uz atmosferski početni tlak u mjernoj komori. Konstantnim početnim tlakom i volumenom određena je uvijek ista količina plina u sustavu. Ova, pri svakom mjerenju ista početna količina plina u referentnoj komori tijekom mjerenja ekspandira u mjernu komoru s uzorkom. Efektivni volumen mjerne ćelije, odnosno konačni volumen sustava kao i tlak p_e nakon ekspanzije, ovise o poroznosti analiziranog uzorka, točnije, o V_s . U takvim okolnostima, moguće je, koristeći metalne valjčiće poznatog volumena, mjerenjem odrediti ovisnost V_s o p_e , tj. odrediti kalibracijski $V_s - p_e$ dijagram. Iz kalibracijskog dijagrama se dalje, na temelju izmjerenog p_e izravno očita V_s ispitivanog uzorka stijene.

Aparatura (Porozimetar firme Temco, Inc.)

Osnovni dijelovi porozimetra su

- 3 mjerne komore za uzorke stijena (jezgre) promjera 2", 1.5" ili 1" (1" = 1 inch = 2.54 cm)
- Dvije referentne komore, različitih konstantnih volumena,
- Digitalni mjerač i pokazivač (indikator) tlaka,
- Ventili za dotok plina i regulatori tlaka plina.

Za rad su potrebni regulator tlaka plina iz boce (grublji i finiji), vakuum sisaljka (kada se radi s helijem) te precizni manometar sa bourdonovom cijevi (*Heise*).

Raspon mjernog tlaka je od 0 do 10 bar. Standardni (preporučeni) radni tlak je 7 bar ili 100 psi. Radni plin (helij ili dušik ili zrak) dobiva se iz komercijalnih visokotlačnih čeličnih boca pri tlaku od oko 200 bar.

NAPOMENA: Plemeniti jednoatomske plin helij je najpovoljniji za određivanje poroznosti: (1) jer se ponaša blisko idealnom plinu (kompresibilnost!), (2) kao plemeniti plin slabo se adsorbira na površini stijene (3) zbog male veličine atoma lako prodire u najsitnije pore/kapilare porozne stijene.

Helij treba svakako rabiti za uzorke poroznosti manje od 5%, dok se za veće poroznosti - zbog ekonomičnosti - obično rabe dušik ili zrak.

Na kontrolnoj ploči porozimetra (Sl.1) nalazi se sklopka za uključivanje struje te dva potencijometra, **P1** i **P2**.

Ventili su za kontrolu toka plina, odnosno uspostavu vakuuma, označeni su kao **V1** do **V4**.

Radna shema spajanja elemenata porozimetra pokazana je na Sl.2 .

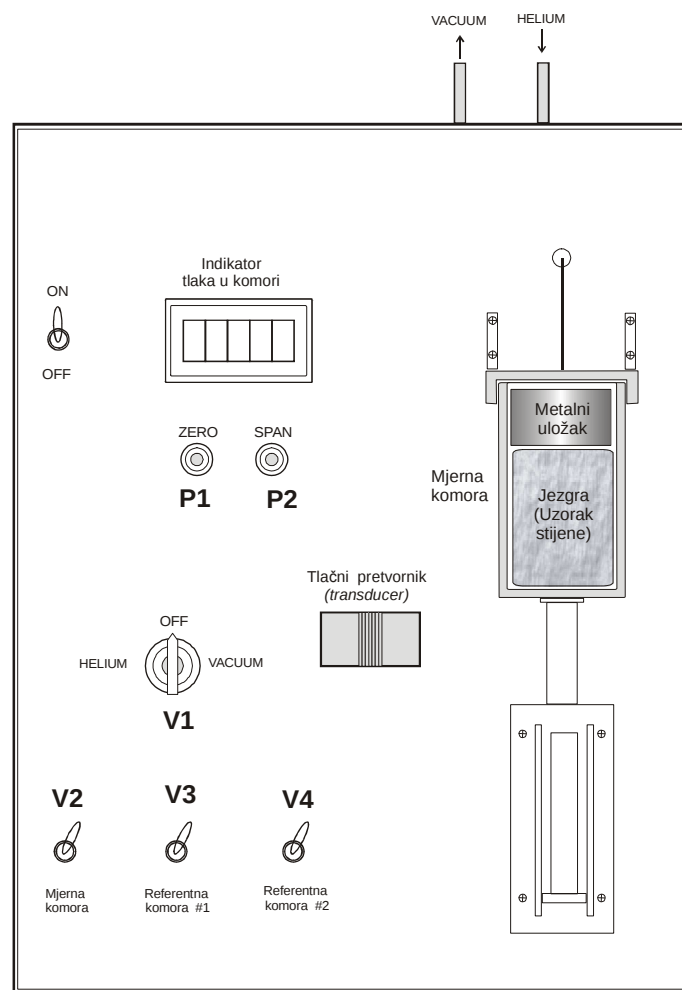
Četiri čelična valjčića različitog i poznatog volumena služe za izradu kalibracijskog dijagrama, kao i za prilagodbu volumena mjerne komore kada je uzorak manji (kraći) od raspoloživog prostora u komori.

Postupak baždarenja mjerila tlaka (tlačni pretvornik; *pressure transducer*)

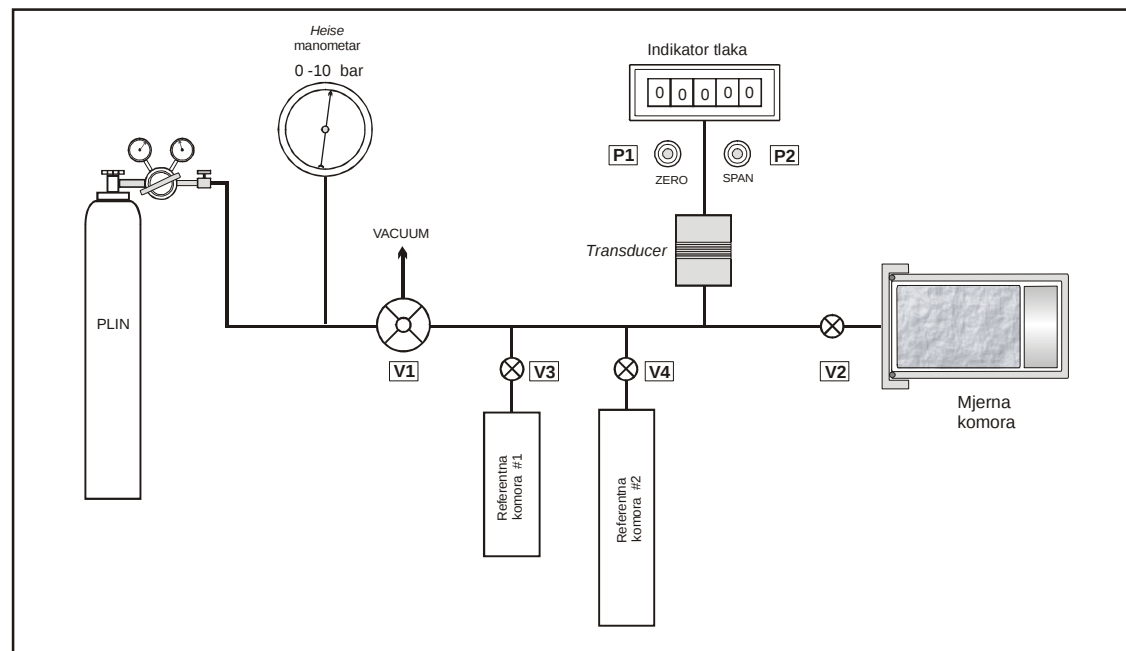
Prije svakog mjerenja treba kalibrirati mjerno područje *transducera*, tako da pri atmosferskom tlaku pokazuje 0, a pri tlaku od 7 bar očitavanje na indikatoru treba biti 70. Na taj način se ostiže linearnost signala transducera unutar mjernog područja i točnost očitavanja tlaka nakon ekspanzije plina tijekom mjerenja.

1. Uključiti instrument (Power ON).
2. Mjernu komoru za uzorak pomoću ručice spustiti iz držača.
3. Zatvoriti ventile **V2**, **V3** i **V4** na instrumentu.
4. Ventil **V1** u postaviti u smjer OFF.
5. Otvoriti glavni ventil boce s plinom uz regulator izlaznog tlaka zatvoren okretanjem ulijevo. Ventil **V1** u postaviti u smjer HELIUM.
6. Polaganim okretanjem regulatora izlaznog tlaka na boci postaviti izlazni tlak na vrijednost od *točno* 7 bar, očitano na Bourdonovom (0-10 bar) manometru.
7. Na indikatoru transducera pomoću potencijometra **P2** postaviti vrijednost 070.0.
8. Ventil **V1** u postaviti u smjer OFF.
9. Otvaranjem ventila **V2** ispustiti plin u atmosferu. U sustavu porozimetra je sada atmosferski tlak, tj. pretlak je 0.
10. Na indikatoru transducera pomoću potencijometra **P1** postaviti vrijednost 000.0.
11. Zatvoriti ventil **V2**, ponovo ventil **V1** usmjeriti na HELIUM. Digitalni očitavač treba pokazivati 070.0. Eventualne korekcije izvršiti sa potencijometrom **P1**.
12. Ponoviti korake 8-11 sve dok očitavanja nisu konzistentna.

Kasnije, u toku mjerenja povremeno upravo opisanom metodom na indikatoru transducera provjeravati vrijednosti 0 i 70.0.



Sl. 1 - Kontrolna ploča porozimetra



Sl.2 - Shema spajanja elemenata porozimetra. **V1** je trosmjerni ventil: ovisno o položaju, tok plina u sustav je dozvoljen (položaj HELIUM), prekinut (OFF), odnosno, sustav je otvoren prema vakuum pumpi ili atmosferi (VACUUM). Pod sustavom podrazumijevaju se sve komore i tlačne cijevi (tj. njihov volumen) od **V1** nadalje. Ventili **V2**, **V3** i **V4** su prekidni (engl. ON/OFF) ventili: u spuštеноm položaju ručice ventila prekinut je protok plina, u dignutom položaju ventil je otvoren za protok.

Postupak određivanja kalibracijske krivulje

Iz prije opisanog principa rada instrumenta proizlazi da je pri uvjetima konstantnosti početnog tlaka i volumena određene (odabrane) kombinacije referentne i mjerne komore, V_s određen ravnotežnim tlakom, p_e . Kvantitativni odnos između ravnotežnog tlaka, p_e i V_s , (kalibracijska $V_s - p_e$ krivulja) određuje se mjerenjem p_e za različite a poznate vrijednosti V_s . U tu svrhu rabe se čelični valjčići poznatog volumena. Na raspolaganju su 3 volumena referentne komore ($V_{\#1}$, $V_{\#2}$ i $V_{\#1+\#2}$) i 3 volumena mjerne komore, što zahtijeva 9 kalibracijskih krivulja. Budući da se mjere *samo* uzorci stijena promjera 1.5" (1"=1 inch=2.54 cm), potrebno je izraditi 3 kalibracijske krivulje. (Moguća četvrta kalibracijska krivulja odnosi se na situaciju kada kao referentni volumen služi interni volumen sustava do **V2**, tj. ventili **V3** i **V4** su *stalno* zatvoreni).

Postupak za komoru za uzorak D = 1.5" i referentni volumen $V_{\#1+\#2}$

1. Komoru za uzorak, napunjenu sa metalnim valjčićima učvrstiti u svoje ležište,
2. Digitalni očitac - prethodno baždaren! - treba pokazivati 00.0
3. Otvoriti ventil **V3** i **V4**, zatvoriti ventil **V2**;
4. Ventil **V1** staviti u položaj HELIUM i tlak stabilizirati na 7 bar;
5. Zatvoriti ventil **V1** (položaj OFF);
6. Otvoriti **V2** i sačekati da se tlak stabilizira (plin je ekspandirao u komoru za uzorak);
7. Očitati ravnotežni tlak, zapisati ga u tablicu kao vrijednost $p_{e(1)}$
8. Kao odgovarajuća vrijednost $V_{s(1)}$ upisuje se ukupni volumen metalnih uložaka u komori
9. Zatvore se ventili **V3** i **V4** te se ispusti plin iz sustava okretanjem ventila **V1** u položaj VACUUM
10. Otvoriti komoru za uzorak i izvaditi najmanji valjčić.
11. Ponavljati korake od 1-10 dok se ne iscrpe sve kombinacije valjčića (radi kontrole, zadnja ekspanzija u potpuno praznu komoru)

Ponoviti čitav postupak za kombinaciju: Komora za uzorak D=1.5" + referentni volumen $V_{\#2}$, a nakon toga za kombinaciju: Komora za uzorak D=1.5" + referentni volumen $V_{\#1}$

Rezultati mjerenja tabeliraju se, napr:

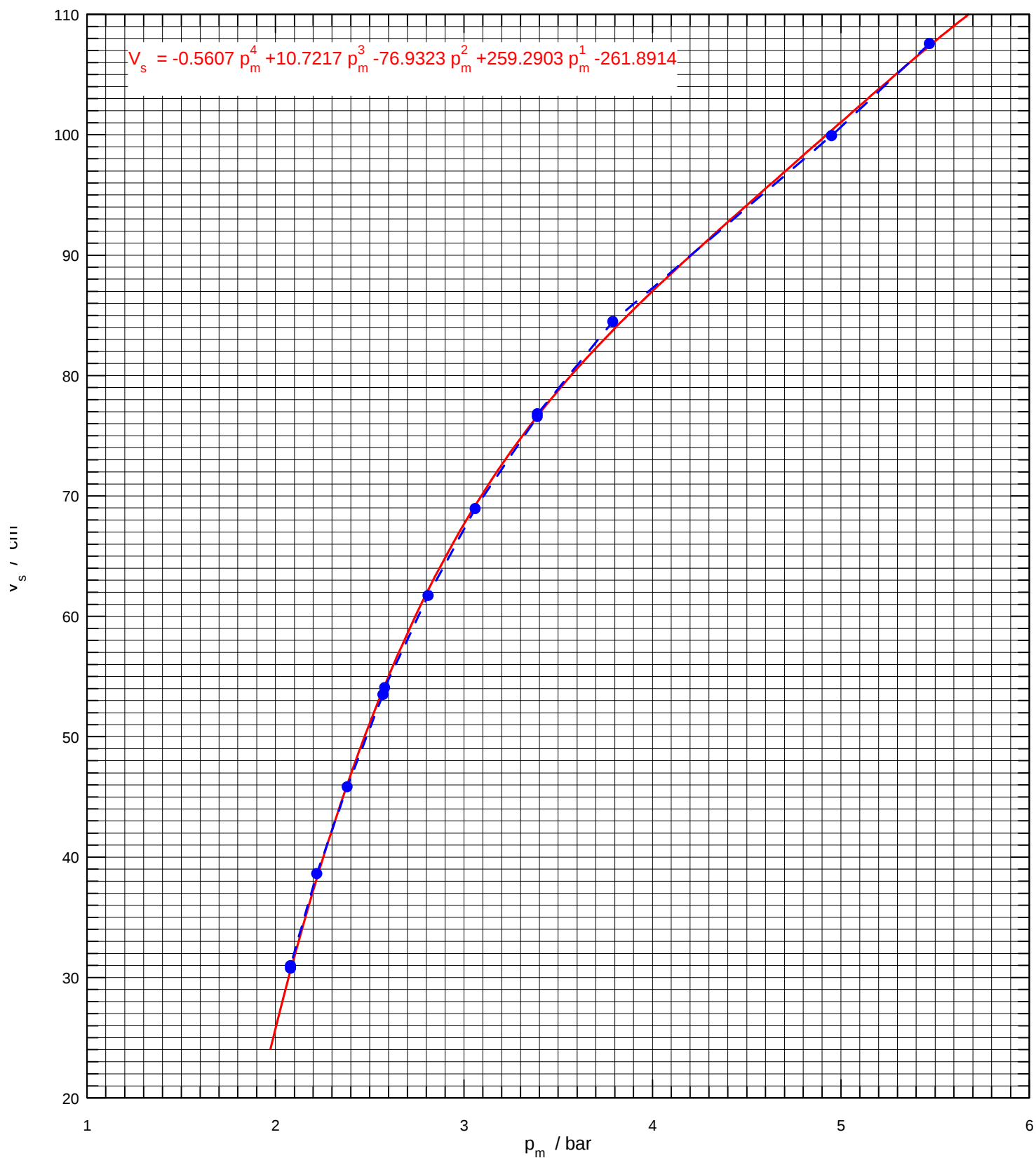
D=1.5"; Ref. V _{#1+#2}		
	V _{s(i)} (cm ³)	p _{e(i)} (bar)
1		
2		
3		
...		

i stavljaju u radni kalibracijski dijagram, koji se kasnije, tijekom ispitivanja različitih jezgara, rabi za očitavanje pripadnog volumena krute faze stijene.

Mjerenje poroznosti

1. Uzorak stijene (jezgra) stavi se u mjernu komoru i ova učvrsti u svoje ležište (zatvori),
2. (*Eventualno*: Prazni prostor u komori popuni se s valjčićima poznatog volumena),
3. Zatvoriti **V2** a ventil **V1** staviti u položaj HELIUM,
4. Otvoriti ventile **V3** i **V4**,
5. Regulatorom na boci s N₂ povećati tlak na 7 bar i stabilizirati ga na toj vrijednosti (tj. očitavanje na indikatoru tlaka mora biti 70.0),
6. Okrenuti ventil **V1** u položaj OFF te otvoriti **ventil V2**. (Dušik ekspandira u komoru sa jezgrom).
7. Sačekati da se tlak stabilizira i očitati i zabilježiti vrijednost p_e.
8. Iz kalibracijskog dijagrama (Prilog) očitati vrijednost odgovarajućeg V_s,
9. (Ako su dodani valjčići, prava vrijednost volumena krute faze jezgre izračuna se tako da se od očitane vrijednosti V_s oduzme vrijednost volumena valjčića),
10. Zbog veće točnosti mjerenja postupak ponoviti za svaki uzorak do 3 puta.
11. Izračunati poroznost i unijeti u tablici.
12. Ispustiti plin iz sustava, (tlak = 0) te ponoviti mjerenje.

Kalibracijski dijagram za V#1 + V#2 ref. volumen



Datum:

[illegible]

2- PROPUSNOST STIJENE

Uvod

Propusnost je općenito mjera sposobnosti ("kapaciteta") nekog medija (napr. cijev, porozna stijena) da omogući gibanje, protjecanje fluida kroz taj medij. Do gibanja dolazi uslijed tlačnog gradijenta, a smjer protoka je od većeg prema manjem tlaku. Uzrok padu tlaka u ležištu ugljikovodika je rasipanje mehaničke energije, odnosno, gubitak momenta fluida, koji pri protjecanju mora savladavati otpor porozne stijene.

Darcyjeva jednadžba za protok fluida, kroz porozni medij glasi

$$q = -k \frac{1}{\mu} \frac{A}{L} (p_2 - p_1) \quad (0.9)$$

i vrijedi samo ako su ispunjeni slijedeći uvjeti:

1. Porozni medij je potpuno ispunjen fluidom koji protječe,
2. Nema fizikalno-kemijskih interakcija između fluida i poroznog medija (bilo kakva interakcija, napr. djelomično otapanje karbonatne stijene) mijenja karakter poroznog medija, tj. propusnost, tijekom protjecanja
3. Režim protoka fluida je laminarni, tj. veličina protoka linearno ovisi o gradijentu tlaka (potencijala), za razliku od turbulentnog protoka, kada nema te linearnosti.

Pri ovakvim uvjetima određena propusnost je *apsolutna propusnost* poroznog medija.

U SI sustavu propusnost ima dimenziju površine, tj. jedinica za propusnost je

$$k = [\text{m}^2] \quad (0.10)$$

a definicija propusnosti je:

"Propusnost od 1 m² omogućava protok od 1 m³/s fluida viskoznosti 1 Pa.s kroz površinu protjecanja od 1 m² uz tlačni gradijent od 1 Pa/m".

Tradicionalna jedinica za propusnost, izvedena u starijem c-g-s (centimetar-gram-sekunda) sustavu jedinica, je 1 darcy [D], definirana kao ,

$$k = \frac{\frac{[\text{cm}^3]}{[\text{s}]} [\text{cm}] [\text{cP}]}{[\text{cm}^2] [\text{Atm}]} = [\text{D}] = [\text{cm}^2] \quad (0.11)$$

tj. neki porozni medij ima propusnost od 1 darcy, kada fluid viskoznosti od 1 cP, koji potpuno ispunjava pore medija, teče kroz taj medij uz protok od 1 cm³/s kroz površinu presjeka od 1cm² te pri tlačnom gradijentu od 1 Atm/cm.

Većina ležišnih stijena ima propusnost mnogo manju od 1 D, tako da je u praksi prihvaćena jedinica za propusnost *milidarcy*:

$$1 \text{ Darcy} = 1000 \text{ milidarcy} = 1000 \text{ mD}$$

Odnosi između starijih i SI jedinica za propusnost su slijedeći:

$$\begin{aligned} 1 \text{ D} &= 9.869 \times 10^{-9} \text{ cm}^2 \\ &= 9.869 \times 10^{-13} \text{ m}^2 \quad (\approx 1 \mu\text{m}^2 = 10^{-12} \text{ m}^2) \end{aligned}$$

$$1 \text{ mD} = 9.86 \times 10^{-16} \text{ m}^2 = 9.86 \times 10^{-4} \mu\text{m}^2$$

$$1 \text{ m}^2 = 1.01325 \times 10^{15} \text{ mD}$$

$$1 \mu\text{m}^2 = 1.01325 \times 10^3 \text{ mD} = 1 \times 10^{-12} \text{ m}^2$$

Očito je da je 1 darcy skoro jednak kvadratu mikrometra, tako da se u većini inženjerskih računa u SI sustavu može rabiti aproksimacija $1 \text{ D} \approx 1 \mu\text{m}^2$.

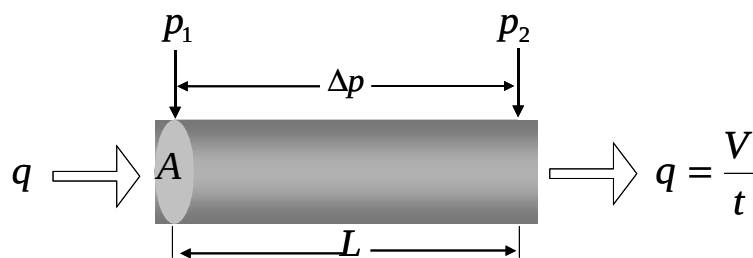
Metode određivanja propusnosti

Tijekom eksperimenta protjecanja plina ili tekućine poznate viskoznosti kroz jezgru poznatih dimenzija, mjere se volumeni fluida u jedinici vremena te pripadni tlačni gradijent. Ovi esperimentalni podaci, uvršteni u Darcyjevu jednadžbu za protok fluida

$$q = -k \frac{A}{L} \frac{1}{\mu} (p_2 - p_1) \text{ omogućuju računanje apsolutne propusnosti prema}$$

$$k = \frac{V}{t} \frac{L}{A} \mu \Delta p \quad (0.12)$$

koja vrijedi kada pri mjerenju rabi tekućina.



Kada se propusnost mjeri s plinom, zbog kompresibilnosti plina, protok na ulazu nije jednak protoku na izlazu, $q_1 < q_2$. Budući da pri konstantnoj temperaturi eksperimenta vrijedi $p_1 q_1 = p_2 q_2 = \bar{p} \bar{q}$, propusnost se računa uz srednji protok, $\bar{p}$:

$$\bar{p} = \frac{(p_1 + p_2)}{2} \quad (0.13)$$

$$\bar{q} = \frac{(p_2 q_2)}{\bar{p}} \quad (0.14)$$

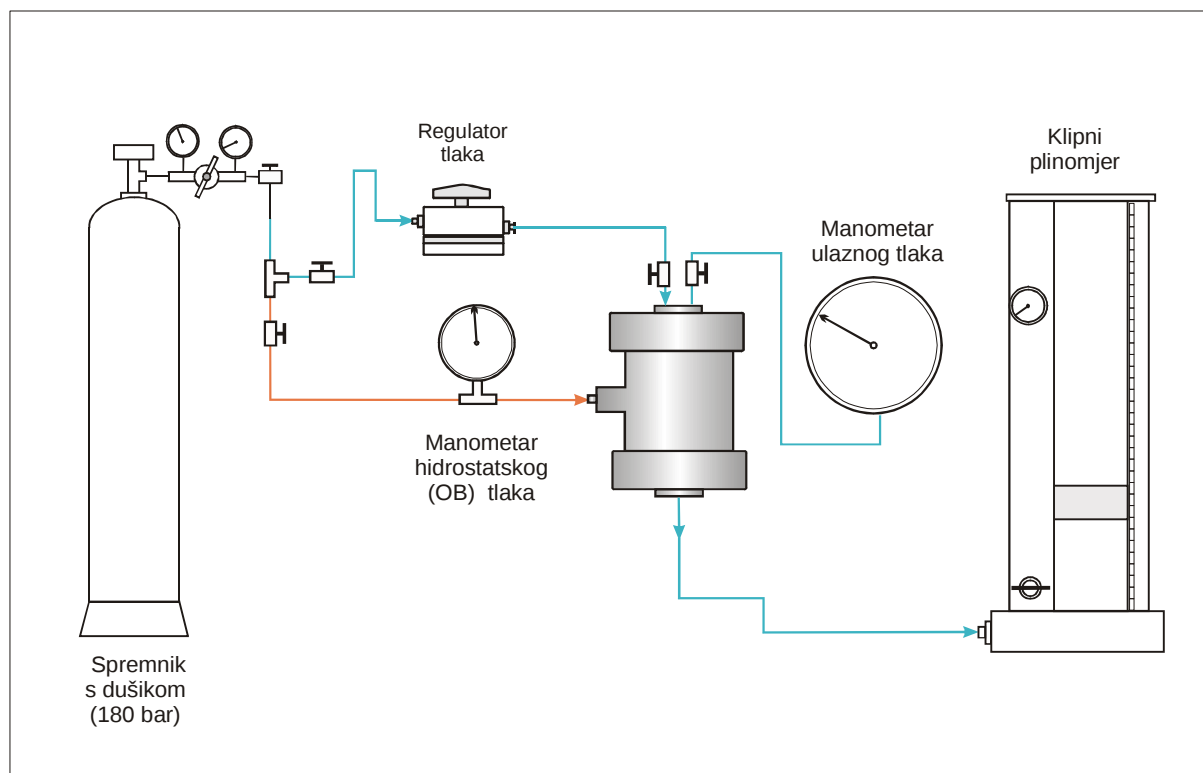
tako da je

$$k = \frac{\bar{q} L}{A(p_1 - p_2)} \mu \quad (0.15)$$

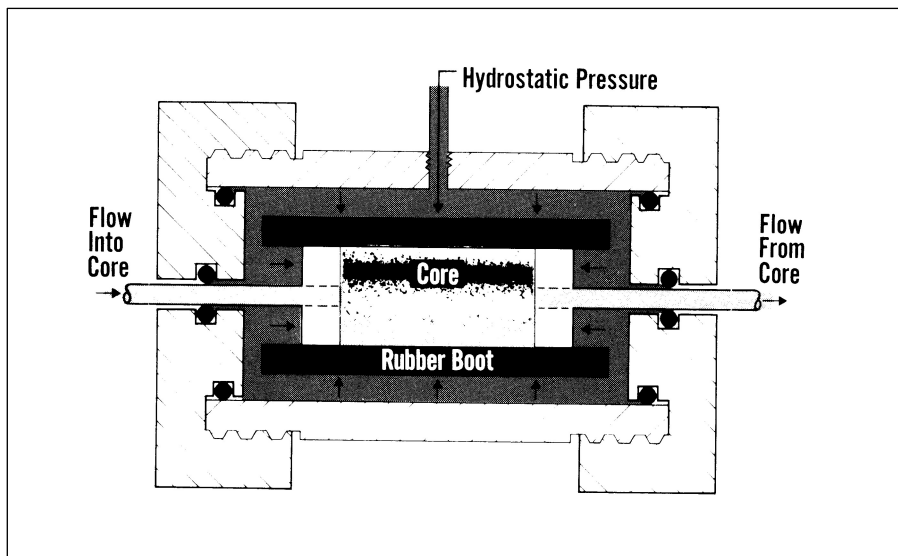
Aparatura za određivanje propusnosti

sastoji se od

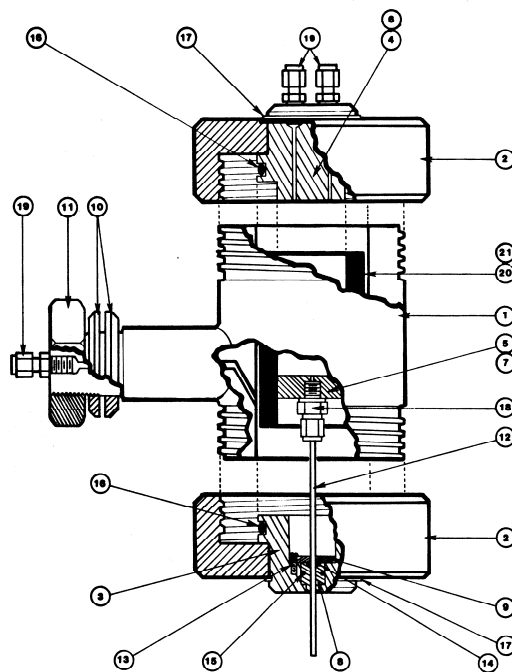
1. boce s dušikom pod visokim tlakom
2. manifolda s manometrima, ventilima i regulatorima tlaka
3. hidrostatskog držača jezgre
4. klipnog plinskog volumetra
5. električnog zapornog sata



Hidrostatski držač jezgre omogućuje uspostavljanje efektivnog petrostatskog opterećenja jezgre, bliskog onom u ležištu, na dubini iz koje je izvađena jezgra.



HYDROSTATIC CORE HOLDER



HYDROSTATIC CORE HOLDER

MODEL 1, FOR 1 & 1.5 INCH DIAMETER CORE

1	BODY	3070-262	1
2	CAP	3070-263	2
3	PLUG, DOWNSTREAM SEAL	3070-251	1
4	END PLUG, 1 INCH UPSTREAM, WITH VALVE IN HEAD	3070-424	1
5	END PLUG, 1 INCH DOWNSTREAM	3070-171	1
6	END PLUG, 1.5 INCH UPSTREAM, WITH VALVE IN HEAD	3070-172	1
7	END PLUG, 1.5 INCH DOWNSTREAM	3070-250	1
8	SEAL INSERT, BRASS	3070-180	1
9	SEAL RETAINER PLATE, BRASS	3070-151	1
10	PANEL WASHER	5090-026	2
11	HEX NUT	5090-023	1
12	DOWNSTREAM STEM, 1/8 INCH	5020-042	1
13	ROUNDHEAD SCREW, 6-32 X 3/8"	5080-044	3
14	O-RING, 0.114" I/D, 0.07" WIDTH	3400-020	1
15	O-RING, 0.364" I/D, 0.07" WIDTH	3400-073	1
16	O-RING, 1.975" I/D, 0.21" WIDTH	3400-079	2
17	SNAP RING	3200-004	2
18	CONNECTOR, STRAIGHT	3650-488	1
19	CONNECTOR, MALE	3650-486	3
20	SLEEVE, 1 INCH DIAMETER	3070-023	1
21	SLEEVE, 1.5 INCH DIAMETER	3070-024	1

ITEM NO.	DESCRIPTION	MATERIAL CODE	QUANTITY
----------	-------------	---------------	----------

Postupak mjerenja

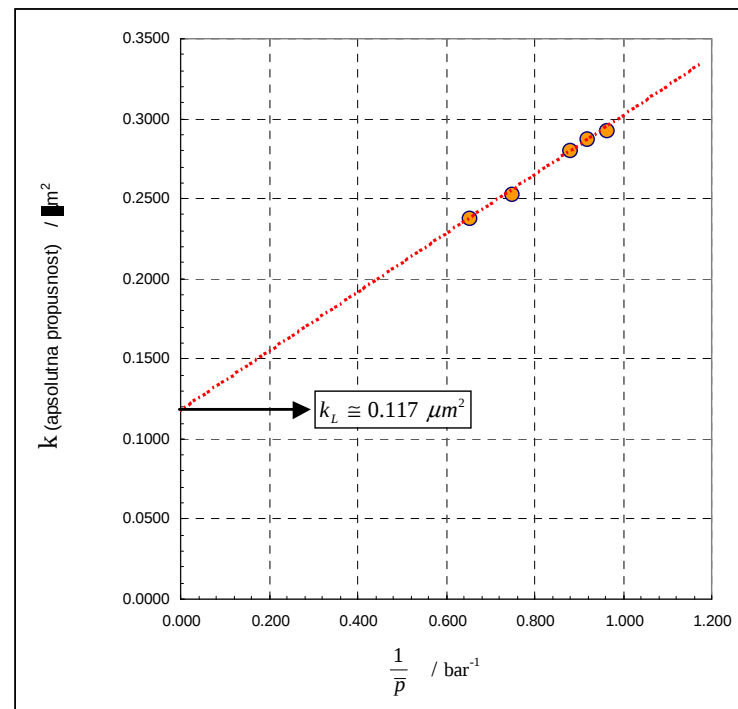
Korekcija zbog Klinkenbergova efekta:

Pri malom tlaku slabi trenje među plina molekulama plina, koje proklizavaju uz zidove kapilara, te je mjereni protok plina kroz jezgru veći, nego protok tekućine uz isti tlačni gradijent. Mjerene propusnosti za plin to veće od prave apsolutne propusnosti uzorka što je tlak mjerenja niži.

Zato mjerenja treba provesti na nekoliko sukcesivno većih tlakova, te odrediti pravu k ekstrapolacijom iz dijagrama, opisanog Klinkenbergovom jednačbom:

Eksperimentalni podaci

$\bar{p}$	$(1/\bar{p})$	k
		μm^2
1.039	0.963	0.2924
1.088	0.919	0.2869
1.138	0.879	0.2806
1.335	0.749	0.2525
1.533	0.652	0.2380



$$k_{plin} = k + \frac{k B}{\bar{p}}$$

k_{plin} = mjerena propusnost plinom

k = apsolutna propusnost

B = Klinkenbergova konstanta, specifična za rabljeni plin

$\bar{p}$ = srednji tlak

Jednačba pravca, dobivena regresijom kroz eksperimentalne točke je:

$$k_{plin} = 0.117 + 0.183 (\bar{p})^{-1}$$

Vježba 2.

$$[bar] = [in.H_2O] \times 0.00249$$

Datum:

Određivanje propusnosti

D =		cm
L =		cm
A =		cm ²
$\mu_{N_2} =$		cP

UZORAK

--

$$\bar{p} = \frac{p_1 + p_2}{2}$$

$$\bar{Q} = \frac{p_2 Q_2}{\bar{p}}$$

$$k(Darcy) = \frac{\bar{Q} \mu_{N_2} L}{A (p_1 - p_2)}$$

[illegible]

Studenti:

3. - ODREĐIVANJE KAPILARNOG TLAKA

Metoda injektiranja Hg (*Purcellova metoda*)

Uvod

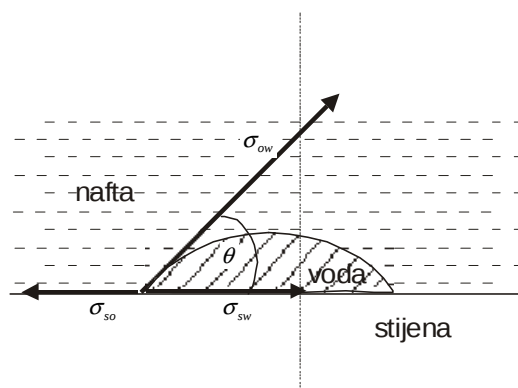
Istovremena nazočnost dva ili više fluida u poroznoj stijeni razlog je pojavi

- kapilarnog tlaka
- efekta močivosti
- relativnih propusnosti

U takvim dvo- ili višefaznim sustavima, karakteristike kapilariteta i močivosti određene su kombinacijom svih površinskih, odnosno međupovršinskih (interfacijalnih) sila na granici faza. Molekule površinskog sloja (filma) na dodirnoj površini faza u sustavu krutina-plin, i sustavu krutina-tekućina, odnosno, međupovršinskog filma na dodirnoj površini tekućina-tekućina, pokazuju tendenciju smanjenja slobodne površine, zbog različitog karaktera međumolekulskog privlačenja u graničnom sloju u odnosu na privlačenje unutar fluida. Rezultat tog privlačenja je površinska napetost. Površinska, odnosno interfacijalna napetost je omjer sile na površini i dužine

$$\sigma = \frac{\text{(površinska sila)}}{\text{(dužina uzduž koje djeluje sila)}} = \frac{F}{l} \frac{[Pa]}{[m]} \quad (0.16)$$

U sustavu voda-nafta-stijena, radi se o površinskoj napetosti između nafte i stijene, σ_{so} , površinskoj napetosti između vode i stijene, σ_{sw} , te međupovršinskoj (interfacijalnoj) napetosti između vode i nafte, σ_{ow} . O veličini i interakciji ovih (među)površinskih sila ovisi koji će od dva fluida pretežno (preferencijalno) močiti stijenu, što je kvantitativno određeno veličinom kuta dodira, θ , između (među)površinskih filmova, tako da



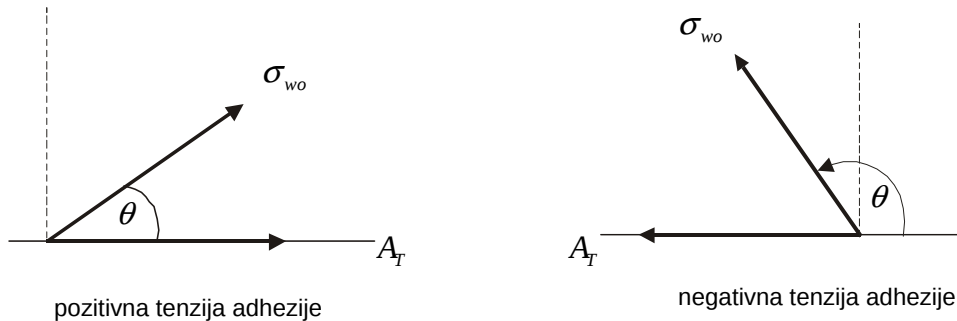
- ako je $\sigma_{sw} > \sigma_{so}$, tada je $0^\circ < \theta < 90^\circ$ (stijena je vodomogućiva)
- ako je $\sigma_{sw} < \sigma_{so}$ tada je $90^\circ < \theta < 180^\circ$ (stijena je naftomogućiva)
-

pri čemu kontaktni kut θ mjeri se kroz fazu veće gustoće)

Adhezija (ili katkada adhezijska tenzija), A_T , sila je kojom se privlače molekule raznovrsnih tvari na međupovršini dodira i određena je razlikom površinskih napetosti između fluida i stijene:

$$A_T = \sigma_{so} - \sigma_{sw} \quad (0.17)$$

što proizlazi iz vektorske mehanike: budući da σ_{so} i σ_{sw} leže uzduž vodoravne osi, to mora i njihova razlika, pri čemu, međutim, vektor adhezije može biti usmjeren udesno (pozitivna adhezija A_T) ili ulijevo (negativna adhezija A_T):



Iz vektorskog prikaza očito je da vrijedi

$$\cos \theta = \frac{A_T}{\sigma_{wo}} \quad (0.18)$$

te se sila adhezije lako može izračunati na temelju eksperimentalno određenog kontaktnog kuta kao

$$A_T = \cos \theta \sigma_{wo} \quad (0.19)$$

Kapilarni tlak. Podizanje vode u cijevi malog promjera (kapilarna elevacija) posljedica je djelovanja sile adhezije. Nakon uranjanja kapilare u posudu s vodom dolazi do dizanja razine vode u kapilari iznad razine vode u posudi, pri čemu su kapilara i posuda izložene atmosferskom tlaku, p_a .

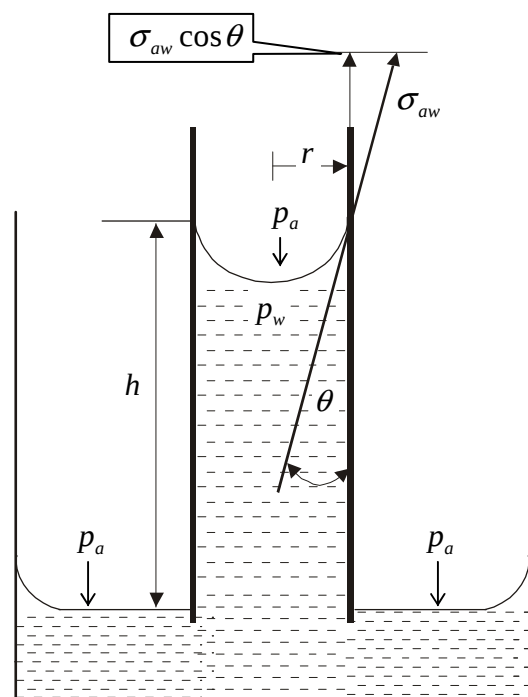
Ravnoteža u sustavu uspostavljena je kada su sile, koje djeluju vertikalno prema gore jednake silama koje djeluju vertikalno prema dolje.

Adhezija djeluje uz stijenke kapilare prema gore, te je ukupna sila prema gore jednaka

$$F^\uparrow = 2\pi r A_T \quad (0.20)$$

dok je sila prema dolje jednaka težini stupca vode, tj. umnošku volumena i gustoće vode te ubrzanja sile teže:

$$F_\downarrow = (r^2\pi h) (\rho_w - \rho_a) g \quad (0.21)$$



iz čega je visina dizanja stupca vode jednaka

$$h = \frac{2 \sigma_{aw} \cos \theta}{r (\rho_w - \rho_a) g} \quad (0.22)$$

pri čemu se u navedenim izrazima gustoća zraka, ρ_a , najčešće zanemaruje, jer je mnogo manja od gustoće vode.

Budući da su je meniskus vode u kapilari otvoren prema atmosferskom tlaku, dizanje vode znači da je tlak u kapilare ispod meniskusa vode manji od atmosferskog, $p_w < p_a$, tj. da postoji nagli tlačni diskontinuitet na granici zrak-voda u kapilari. Ta razlika tlaka je kapilarni tlak, P_c :

$$P_c = p_a - p_w \quad (0.23)$$

Očito je da je

$$p_a = p_w + \rho_w h g \quad (0.24)$$

odnosno, iz (0.23) slijedi da je

$$P_c = \rho_w h g \quad (0.25)$$

Do ovog i drugih temeljnih izraza za kapilarni tlak može se doći i slijedećim razmatranjima:

Tlak je općenito *sila / jedinična površina*, pa iz (0.20) i (0.21) proizlazi

$$P_c = \frac{F^\uparrow}{r^2 \pi} = \frac{F^\downarrow}{r^2 \pi} \quad (0.26)$$

i dalje

$$P_c = \frac{2r\pi \sigma_{aw} \cos \theta}{r^2 \pi} = \frac{2\sigma_{aw} \cos \theta}{r} \quad (0.27)$$

te

$$P_c = \frac{r^2 \pi h (\rho_w - \rho_a) g}{r^2 \pi} = h (\rho_w - \rho_a) g \quad (0.28)$$

Iz toga je kapilarna elevacija, tj. visina dizanja vode u kapilari

$$h = \frac{P_c}{(\rho_w - \rho_a) g} = \frac{2\sigma_{aw} \cos \theta}{r (\rho_w - \rho_a) g} \quad (0.29)$$

Analogno tome, za sustav voda-nafta-stijena vrijedi

$$P_c = \frac{2\sigma_{ow} \cos \theta_{ow}}{r} \quad (0.30)$$

$$P_c = h (\rho_w - \rho_o) g \quad (0.31)$$

$$h = \frac{P_c}{(\rho_w - \rho_o) g} = \frac{2\sigma_{ow} \cos \theta_{ow}}{r(\rho_w - \rho_o) g} \quad (0.32)$$

Ako se uzme da je ležišna stijena skup mnogo kapilara različitog promjera, h u gornjoj jednadžbi predstavlja zonu prijelaza od vode do nafte, pri čemu relativna količina nafte u porama/kapilarama stijene (zasićenje naftom, S_o) raste s povećanje vertikalne udaljenosti od kontakta voda-nafta u ležištu u smjeru prema gore, tj. površini zemlje.

Kvantitativna raspodjela zasićenja vodom i naftom u prijelaznoj zoni računa se iz eksperimentalno određene krivulje kapilarnog tlaka uzorka stijene iz studiranog ležišta. Laboratorijski određeni $P_c = f(S_w)$ podaci se prije toga, na temelju (0.32) preračunaju u $S_w = f(h)$ krivulju, koja daje vrijednosti zasićenja vodom, odnosno naftom (jer je $S_o = 1 - S_w$) kao funkciju visine iznad kontakta voda-nafta.

Kontakt voda-nafta u ležištu određuje se na temelju geofizičkih mjerenja u bušotini (karotaža)!

IZ KRIVULJE KAPILARNOG TLAKA **NIJE** MOGUĆE ODREDITI KONTAKT VODA-NAFTA !!

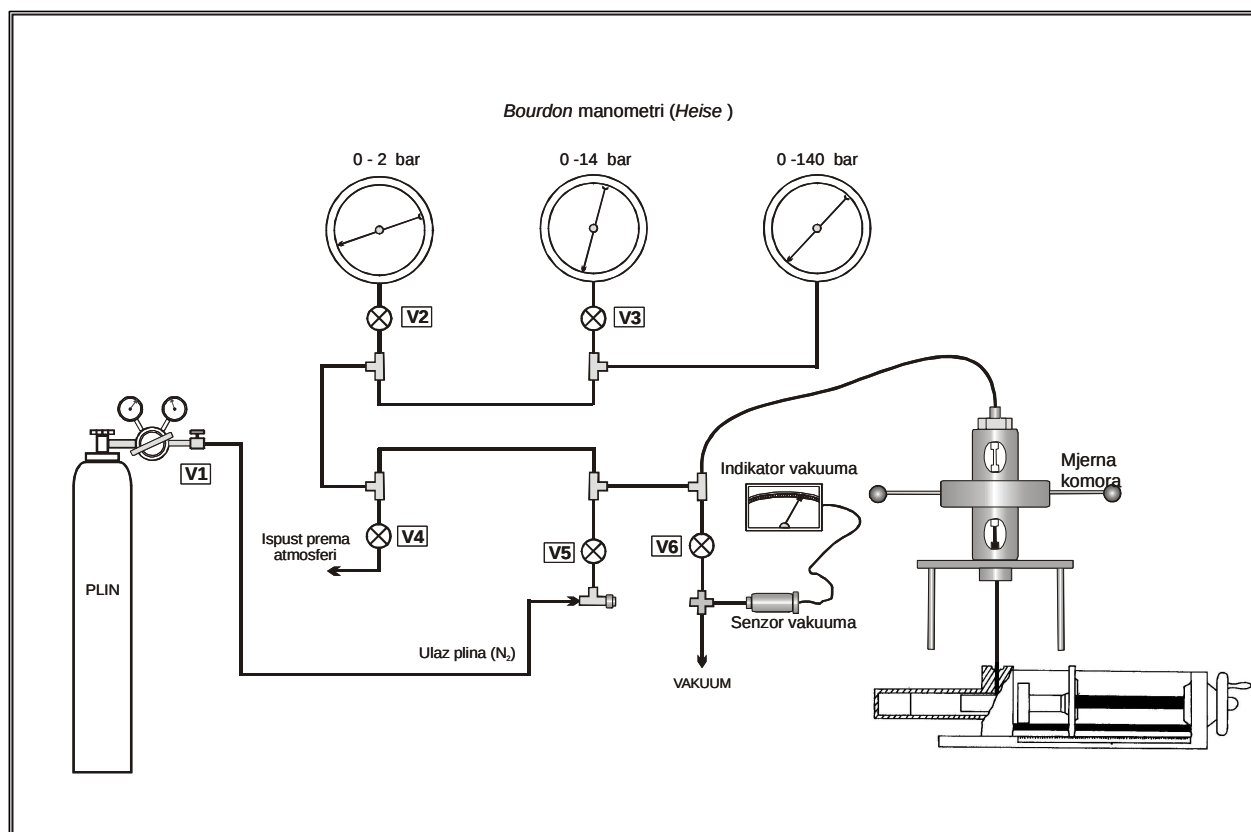
Aparatura (Kapilarimetar firme Ruska, Inc.)

Osnovni dijelovi instrumenta za određivanje Pc-krivulje metodom injektiranja žive su

- Mjerna komora za uzorke stijena (jezgre)
- Visokotlačna klipna volumetrijska pumpa,
- Manifold s ventilima za dotok plina (N_2) i regulatori tlaka plina te manometrima za male (0-2bara), srednje (0-14 bar) i velike (0-140 bar) radne tlakove injektiranja Hg u pore uzorka
- Mjerač i pokazivač (indikator) vakuuma

Za rad su potrebni regulator tlaka plina dušika iz boce (grublji i finiji) te vakuum sisaljka.

Radna shema spajanja elemenata porozimetra pokazana je na Sl.1 .



Sl. 1 - Shema aparature za određivanje krivulje kapilarnog tlaka metodom injektiranja Hg (prema Purcellu)

Prethodna volumetrijska određivanja

Prije mjerenja treba odrediti krivulju volumetrijske korekcije instrumenta, tj. stlačivost:

1. mjerne komore ispunjene živom,
2. volumetrijske pumpe i tlačnih vodova instrumenta, koji su ispunjeni živom te
3. same žive u sustavu.

Iz krivulje volumetrijske korekcije se kasnije za svaki radni tlak/točku prilikom mjerenja na uzorku stijene očitava pripadni korekcijski volumen, koji treba oduzeti od ukupnog mjerenog volumena injektirane žive pri određenom radnom tlaku, da bi se dobio stvarni (*netto*) volumen žive, utisnute u pore uzorka pri tome radnom tlaku.

Krivulja volumetrijske korekcije određuje se volumetrijskim mjerenjima bez uzorka, tj. komora je ispunjena samo živom, na potpuno isti način kao što je to opisano niže.

Prilikom tog određivanja također se izmjeri točan ukupni volumen mjerne ćelije (V_{mk}).

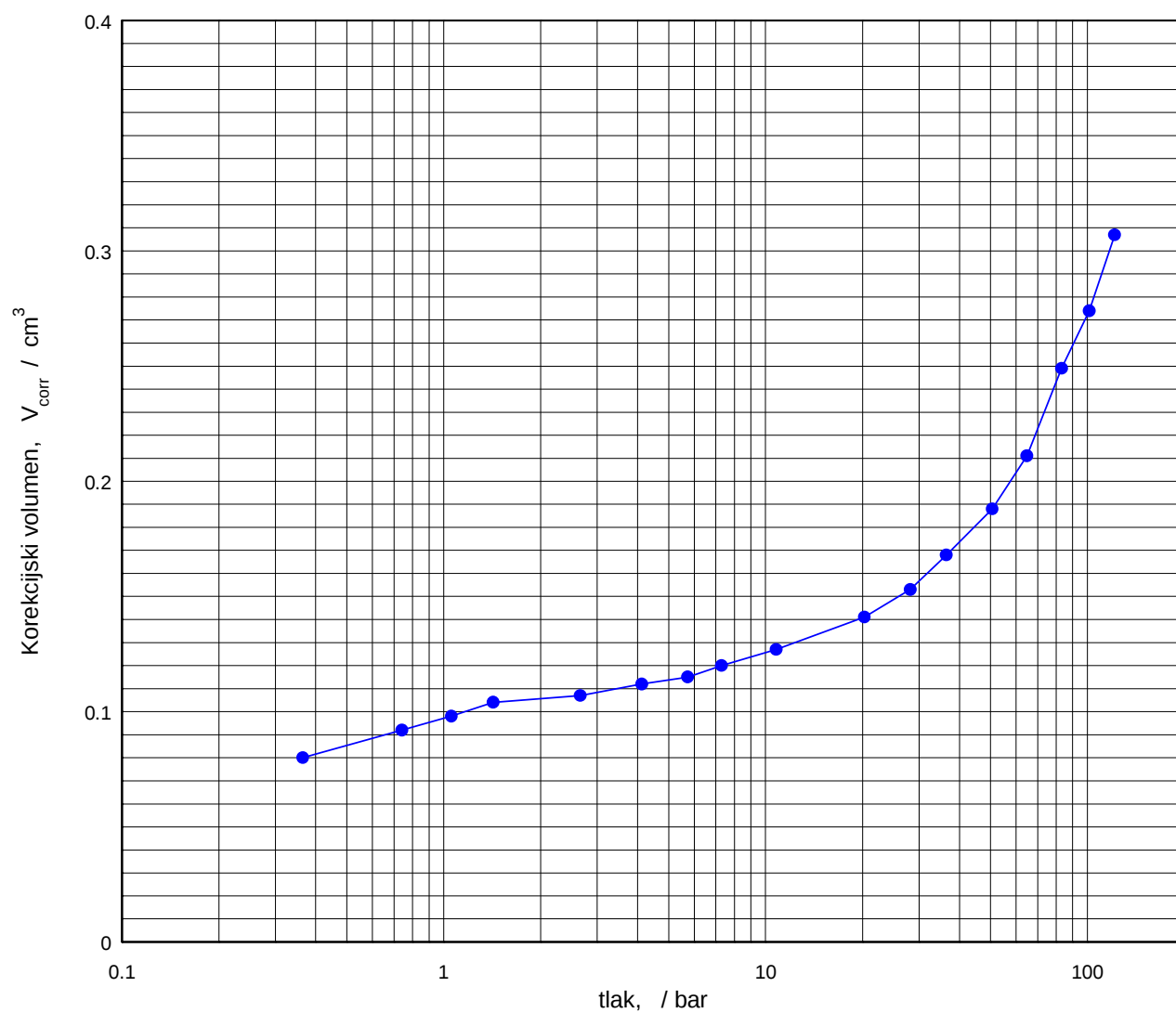
Postupak mjerenja

Prije mjerenja treba provjeriti da je (1) regulacijski ventil boce s dušikom potpun odvrnut (okretanjem ulijevo, na pripadnom manometru tlak je 0), te (2) otvoriti glavni ventil na boci (tlak na manometru = tlak u boci).

13. Kontrolirati razinu žive u mjernoj komori (mora biti u donjem referentnom oknu), skinuti poklopac i staviti uzorak u komoru. Nakon toga vratiti poklopac komore i dobro ga stegnuti. Pomoću pumpe, postaviti razinu Hg u donjem oknu u (uvijek isti) položaj prvog očitavanja pumpe.
14. Uključiti vakuum pumpu, otvoriti ventil **V6** prema vakuumu i evakuirati sustav 15 min. Pratiti pad tlaka, tj. postignuti vakuum na prvom manometru (0-2 bar) i eventualno na indikatoru vakuometra.
15. Provjeriti razinu Hg, korigirati ako je potrebno i postaviti vrijednost nultog očitavanja na pomičnim (linearna + kružna) skalama volumetrijske pumpe.
16. Pomoću volumerijske pumpe injektirati mjernu živu u komoru dok se ne pojavi u gornjem referentnom oknu komore (paziti da Hg ne pobjegne u gornji tlačni vod komore!!!)
17. Pumpom postaviti meniskus žive u stalni položaj za očitavanje te očitati i zabilježiti konačno očitavanje pumpe. (Razlika prvog u drugog očitavanja je volumen Hg u komori; kada se taj V_{corr} oduzme od V_{mk} dobije se ukupni volumen, V_b , uzorka stijene!)

18. Zatvori se ventil **V6** prema vakuumu.
19. Provjeriti položaj meniskusa Hg u gornjem oknu te postaviti skale na volumetrijskoj pumpi u nulti položaj.
20. Pomoću regulacijskog ventila na boci s dušikom postaviti izlazni tlak plina na vrijednost maksimalnog tlaka prvog manometra, tj. oko 2 bar.
21. **Vrlo oprezno i polako** početi otvarati ventil **V6** za ulaz plina, te postaviti prvi mjerni tlak (napr. oko 0.3 bar). Zatvoriti ventil i kontrolirati situaciju u mjernoj komori.
22. Zbog povećanja tlaka u sustavu Hg počinje ulaziti u (najveće) pore uzorka, u skladu s (0.30). Rezultat toga je spuštanje razine Hg u gornjem oknu. Kada se volumetrijskom pumpom živa vrati u prvobitni položaj, očitavanje volumena na pumpi daje volumen Hg, koji je ušao u pore uzorka pri postavljenom radnom tlaku.
23. Zabilježiti ravnotežni radni tlak i pripadni injektirani volumen Hg!
24. **Vrlo oprezno i polako** otvoriti ventil **V6** te postaviti slijedeći, viši radni tlak. (NAPOMENA: Približni radni tlakovi su označeni na manometrima!)
25. Ponavljati korake 9-12. Kada se vrijednost radnog tlaka približi 70% maksimalnog radnog tlaka prvog manometra, zatvoriti ventil **V2** tog manometra i nastaviti postavljati/očitavati tlakove na slijedećem (0-14 bar) manometru.
26. Kada se vrijednost radnog tlaka približi 70% maksimalnog radnog tlaka drugog manometra, zatvoriti ventil **V3** tog manometra i nastaviti postavljati/očitavati tlakove na slijedećem (0-140 bar) manometru
27. Zadnji tlak mjerenja je oko 120 bar.
28. Nakon zadnjeg mjerenja, spustiti razinu žive do donjeg referentnog okna
29. Zatvoriti regulacijski izlazni ventil na boci s dušikom.
30. Polako otvoriti ventil **V4** prema atmosferi i ispustiti plin iz sustava. Pri kraju ispuštanja otvoriti i **V3** te zatim **V2**...
31. Otvoriti poklopac mjerne komore, oprezno izvaditi uzorak te ga staviti u čašu s vodom.
32. Pristupiti obradi mjerenih podataka.

Volumetrijska kalibracija aparature za kapilarni tlak injektiranjem Hg



Datum:

$$(1 \text{ din} / \text{cm} = 1 \text{ mN} / \text{m})$$

Uzorak	V_p / cm^3	V_{mk}			

[illegible]

Studenti:

