

## Opgave 1.2

Theorie: Blz. 37/38

Tips: Bereken  $P_{\text{inf}}$  uit formule (1.60) door een bekend punt in te vullen. Bijvoorbeeld:  $T = 100^\circ = 373 \text{ K}$  met de bekende druk  $P_s = 10133 \text{ Pa}$ .

Uitwerking:

Gegevens:  $L = 42000 \text{ J/mol}$   
 $T_{\text{gev}} = 30^\circ = 303 \text{ K}$   
 $R = 8,3147 \text{ J/mol,K}$

Gevraagd:  $P_{s(30^\circ\text{C})}$

Oplossing:  $P_s$  volgt uit formule (1.60), echter mist men  $P_{\text{inf}}$ . Dus  $P_{\text{inf}}$  eerst uitrekenen door een bekend punt in te vullen zoals het kook punt:

$$P_{\text{inf}} = \frac{P_s}{e^{\frac{L}{RT}}} = \frac{10133 \text{ Pa}}{e^{\frac{42000 \text{ J/mol}}{8,3147 \text{ J/mol,K} \cdot 373 \text{ K}}}} = 7,71 \cdot 10^{10} \text{ Pa}$$

$$P_{s(30^\circ)} = P_{\text{inf}} \cdot e^{-\frac{L}{RT}} = 7,71 \cdot 10^{10} \text{ Pa} \cdot e^{-\frac{42000 \text{ J/mol}}{8,3147 \text{ J/mol,K} \cdot 303 \text{ K}}} = 4,4 \cdot 10^3 \text{ Pa}$$

### Opgave 1.3

Theorie: Blz. 14/15

Tips: Reken 1.11 door benader  $v$   $dv$  door  $\Delta v$

#### Uitwerking:

Gegevens:  $T_1 = 293 \text{ K}$   
 $T_2 = 1000 \text{ K}$   
 $m = M \cdot u = 28 \cdot 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 4,68 \cdot 10^{-26} \text{ kg}$   
 $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ NmK}^{-1}$   
 $v = 1000 \text{ ms}^{-1}$   
 $\Delta v = 1 \text{ ms}^{-1}$

Gevraagd:  $f(v)$

Oplossing: 
$$f(v)dv = 4\pi \cdot v^2 \left( \frac{m}{2\pi \cdot kT} \right)^{\frac{3}{2}} \cdot e^{\frac{-m \cdot v^2}{2kt}} dv \quad (1.11)$$

Benader  $dv$  door  $\Delta v$  en vul gegevens in dit levert:

$$f(293K) = 4\pi \cdot 1000^2 \left( \frac{4,68 \cdot 10^{-26}}{2\pi \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 293} \right)^{\frac{3}{2}} \cdot e^{\frac{-4,68 \cdot 10^{-26} \cdot 1000^2}{2 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 293}} = 9,6 \cdot 10^{-5}$$

## Opgave 1.9

Theorie: Blz. 27/28

### Uitwerking:

Gegevens:  $\delta = 3 \cdot 10^{-10} \text{ m}$   
 $T = 300 \text{ K}$   
 $P = 1 \cdot 10^5 \text{ Pa}$

a)

Gevraagd:  $\lambda$

Oplossing: 
$$n = \frac{P}{k \cdot T} = \frac{1 \cdot 10^5}{1,3807 \cdot 10^{-31} \cdot 300} = 2,41 \cdot 10^{25} \text{ m}^{-3}$$

$$\lambda = \frac{1}{n \cdot \pi \cdot \delta^2 \cdot \sqrt{2}} = \frac{1}{2,41 \cdot 10^{25} \cdot \pi \cdot 3 \cdot 10^{-10^2} \cdot \sqrt{2}} = 1 \cdot 10^{-7} \text{ m}$$

b)

Antwoord:  $\lambda \gg \delta$  dus nee

c)

gevraagd: Afstand tussen de deeltjes

Oplossing: Volume per deeltje =  $1/n = 4,15 \cdot 10^{-26} \text{ m}^3$

Afstand is dan ongeveer:  $\sqrt[3]{4,15 \cdot 10^{-26}} = 3,46 \cdot 10^{-9} \text{ m} \approx 3,5 \text{ nm}$

d)

Antwoord: Vergelijk antwoord a en c

### Opgave 1.10

Theorie: §1.13

Tips: Vergelijking 1.51 is bruikbaar voor deze opgaven omdat deze dezelfde waarde als deze opgaven bevat

#### Uitwerking:

Gegevens: M = 28  
T = 293 K  
P =  $1 \cdot 10^{-4}$  Pa

Gevraagd:  $\Delta t$  tot  $N_i = 10^{15}$

Oplossing: M en T zijn het zelfde als gebruik in vergelijking 1.51 dus 1.51 invullen:

$$\frac{dN_i}{dt} = 2,90 \cdot 10^{22} \cdot P = 2,90 \cdot 10^{22} \cdot 10^{-4} = 2,9 \cdot 10^{18} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1} \quad (1.51)$$

$$\Delta t = \frac{1 \cdot 10^{15}}{2,9 \cdot 10^{14}} = 3,45 \text{ s}$$

## Opgave 1.11

Theorie: blz. 27/28

Tips: Vergelijking 1.33 heeft dezelfde parameters als deze opgaven

### Uitwerking:

Gegevens:  $M = 28$   
 $\delta = 3,7 \cdot 10^{-10} \text{ m}$  (Zie grafiek B8)  
 $T = 293 \text{ K}$   
 $P = 1 \cdot 10^{-4} \text{ Pa}$   
 $L_{\text{wand}} = 0,1 \text{ m}$

Gevraagd: Hoe vaak raak een deeltje de wand voordat het een ander deeltje raakt

Oplossing: alle parameters van de opgaven zijn het zelfde als gebruik in vergelijking 1.51 dus 1.51 invullen:

$$\lambda = \frac{6,7 \cdot 10^{-3}}{p} = \frac{6,7 \cdot 10^{-3}}{10^{-4}} = 67m \quad (1.51)$$

van wand tot wand is 0,1 m dus ongeveer 670 botsingen met de wand voor het een ander deeltje raakt.

### Opgave 1.13

Theorie: §1.13

Tips: Let op: Zuurstof is O<sub>2</sub> dus twee O per molecuul

Uitwerking:

a)

Gegevens: M = 32  
T = 300 K  
P = 1 · 10<sup>-5</sup> Pa

Gevraagd: hoeveel procent van de Titaanatomen zal na 10 seconden een verbinding zijn aangegaan?

Oplossing:  $\frac{dN_i}{dt} = 2,63 \cdot 10^{24} \cdot \frac{P}{\sqrt{M \cdot T}} = 2,63 \cdot 10^{24} \cdot \frac{10^{-5}}{\sqrt{32 \cdot 300}} = 2,684 \cdot 10^{17} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ (1.50)}$

Dus een factor 1000 minder voor cm<sup>-2</sup> geeft 2,684 · 10<sup>13</sup> cm<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>  
In 10 seconden vallen er dus 2,684 · 10<sup>14</sup> moleculen per cm<sup>2</sup> dit levert dus 5,368 · 10<sup>14</sup> O-atomen. 1 op 1 bindingen dus:

$$\frac{5,368 \cdot 10^{14}}{10^{15}} \cdot 100\% = 53,7\% \text{ is bezet}$$

b)

gevraagd: als de druk word verlaagd tot 10<sup>-8</sup> Pa hoe lang duurt het dan voor alles bezet is

oplossing: 46,32% is onbezet dit zijn: 4,632 · 10<sup>14</sup> Ti-atomen over

$$\frac{dN_i}{dt} = 2,63 \cdot 10^{24} \cdot \frac{P}{\sqrt{M \cdot T}} = 2,63 \cdot 10^{24} \cdot \frac{10^{-8}}{\sqrt{32 \cdot 300}} = 2,684 \cdot 10^{14} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

dus: 2,684 · 10<sup>10</sup> cm<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>

$$t = \frac{4,632 \cdot 10^{14}}{2,684 \cdot 10^{10}} = 17257,8 \text{ seconden dus 4,8 uur}$$

### Opgave 1.14

Theorie: blz. 48/49

Tips: tip  $\lambda \gg d$

#### Uitwerking:

Gegevens:  $d = 0,01 \text{ m}$   
 $T_a = 373\text{K}$   
 $T_b = 473\text{K}$

Gevraagd: Wat is de deeltjesverhouding en wat is de drukverhouding als evenwicht zich heeft ingesteld

Oplossing: Eerst de drukverhouding uitrekenen

$$\frac{P_a}{P_b} = \sqrt{\frac{T_a}{T_b}} = \sqrt{\frac{373}{473}} = 0,89 \quad (1.85)$$

$$p = nkT \Rightarrow n = \frac{p}{kT}$$

$$\frac{n_a}{n_b} = \frac{\frac{P_a}{k \cdot T_a}}{\frac{P_b}{k \cdot T_b}} = \frac{P_a \cdot T_b}{P_b \cdot T_a} = 0,89 \cdot \frac{473}{373} = 1,13$$

### Opgave 1.15

Theorie: blz. 49

Tips: tip  $\lambda \gg d$

#### Uitwerking:

Gegevens:  $d = 0,01 \text{ m}$   
 $T_a = 90\text{K}$   
 $T_b = 300\text{K}$   
 $P_b = 0,1 \text{ Pa}$

Gevraagd:  $P_a$

Oplossing:  $\lambda \gg d$  dus vergelijking 1.85

$$\frac{P_a}{P_b} = \sqrt{\frac{T_a}{T_b}} \Rightarrow P_a = P_b \cdot \sqrt{\frac{T_a}{T_b}} = 0,1 \cdot \sqrt{\frac{90}{300}} = 0,055 \text{ Pa} \quad (1.85)$$



## Opgave 1.16

Theorie: §1.20

### Uitwerking:

Gegevens:  $R = 8,3145 \text{ J/mol,K}$   
 $\delta = 0,22 \cdot 10^{-9} \text{ m}$   
 $P = 10^5 \text{ Pa}$   
 $T = 293 \text{ K}$   
 $k = 1,3807 \cdot 10^{-23} \text{ NmK}^{-1}$   
 $M = 4$

Gevraagd:  $\eta$  en  $\Lambda$

Oplossing:  $\eta = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \bar{V} \cdot \lambda$  voor  $k_n \ll 1$  (1.75)

$$\bar{V} = 1,46 \cdot 10^2 \sqrt{\frac{T}{M}} = 1,46 \cdot 10^2 \cdot \sqrt{\frac{293}{4}} = 1,25 \cdot 10^3 \text{ m/s} \quad (1.4)$$

$$\lambda = \frac{k \cdot T}{\pi \cdot P \cdot \delta^2 \cdot \sqrt{2}} = \frac{1,3807 \cdot 10^{-23} \cdot 293}{\pi \cdot 10^5 \cdot (0,22 \cdot 10^{-9})^2 \cdot \sqrt{2}} = 1,88 \cdot 10^{-7} \text{ m} \quad (1.32)$$

$$\rho = \frac{P \cdot M \cdot \mu}{k \cdot T} = \frac{10^5 \cdot 4 \cdot 1,6726 \cdot 10^{-27}}{1,3807 \cdot 10^{-23} \cdot 293} = 0,165 \text{ kg/m}^3 \quad (1.25)$$

$$\eta = \frac{1}{2} \cdot 0,165 \cdot 1,25 \cdot 10^3 \cdot 1,88 \cdot 10^{-7} = 1,94 \cdot 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{s/m}^2$$

$$\Lambda = \varepsilon \cdot \eta \cdot C_v \quad (1.91)$$

$$\varepsilon = 2,5 \text{ (1 atoom/molecuul)}$$

$$C_v = \frac{3}{2} \cdot \frac{k}{m} = \frac{3}{2} \cdot \frac{1,3807 \cdot 10^{-23}}{4 \cdot 1,6726 \cdot 10^{-27}} = 3096 \text{ J/kg, K} \quad (1.21)$$

$$\Lambda = 2,5 \cdot 1,94 \cdot 10^{-5} \cdot 3096 = 0,15 \text{ W/m, K}$$

### Opgave 1.17

Theorie: §1.20

#### Uitwerking:

Gegevens:  $R = 8,3145 \text{ J/mol,K}$   
 $\delta = 0,37 \cdot 10^{-9} \text{ m}$   
 $P = 10^5 \text{ Pa}$   
 $T_1 = 278 \text{ K}$   
 $T_2 = 288 \text{ K}$   
 $k = 1,3807 \cdot 10^{-23} \text{ NmK}^{-1}$   
 $M = 28$

Gevraagd:  $\eta$  en  $\Lambda$

Oplossing:  $\eta = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \bar{V} \cdot \lambda$  voor  $k_n \ll 1$  (1.75)

Voor  $\lambda$  nemen we de gemiddelde temperatuur  $10^\circ\text{C}$

$$\lambda = \frac{k \cdot T}{\pi \cdot P \cdot \delta^2 \cdot \sqrt{2}} = \frac{1,3807 \cdot 10^{-23} \cdot 283}{\pi \cdot 10^5 \cdot (0,37 \cdot 10^{-9})^2 \cdot \sqrt{2}} = 6,424 \cdot 10^{-6} \text{ m} \quad (1.32)$$

$$\bar{V} = 1,46 \cdot 10^2 \sqrt{\frac{T}{M}} = 1,46 \cdot 10^2 \cdot \sqrt{\frac{283}{28}} = 464,2 \text{ m/s} \quad (1.4)$$

$$\rho = \frac{P \cdot M \cdot \mu}{k \cdot T} = \frac{10^5 \cdot 28 \cdot 1,6726 \cdot 10^{-27}}{1,3807 \cdot 10^{-23} \cdot 283} = 1,197 \text{ kg/m}^3 \quad (1.25)$$

$$\eta = \frac{1}{2} \cdot 1,197 \cdot 464,2 \cdot 6,424 \cdot 10^{-6} = 1,78 \cdot 10^{-5} \text{ N}\cdot\text{s/m}^2$$

$$\Lambda = \varepsilon \cdot \eta \cdot C_v \quad (1.91)$$

$\varepsilon = 1,9$  (Tabel 1.2)

$$C_v = \frac{5}{2} \cdot \frac{k}{m} = \frac{5}{2} \cdot \frac{1,3807 \cdot 10^{-23}}{28 \cdot 1,6726 \cdot 10^{-27}} = 738,2 \text{ J/kg, K} \quad (1.21)$$

$$\Lambda = 1,8 \cdot 1,78 \cdot 10^{-5} \cdot 738,2 = 0,024 \text{ W/m, K}$$

$$q_z = -\Lambda \cdot \frac{\Delta T}{\Delta d} = -0,024 \cdot \frac{10}{0,012} = 20 \text{ W} \quad (1.87)$$

## Opgave 2.2

Theorie: §2.7

Tips:  $\tau_0 = 1 \cdot 10^{-13}$  sec in vaste stoffen (Dit gegeven is moeilijk terug te vinden in het boek)

Uitwerking:

Gegevens:  $\tau_0 = 1 \cdot 10^{-13}$  s  
 $T = 380$  K  
 $k = 1,3807 \cdot 10^{-23}$  NmK<sup>-1</sup>  
 $N_d = N_s$  na 100 seconden

Gevraagd:  $E_a$

Oplossing: 
$$\frac{dN_d}{dt} = \frac{N_s}{\tau_0} e^{-\frac{E_a}{k \cdot T_s}} \quad (2.18)$$

Voor  $\Delta T = 100$  seconden  $N_d = N_s \Rightarrow$  herschikken en  $N_d$  en  $N_s$  wegdelen levert:

$$\frac{\tau_0}{\Delta T} = e^{-\frac{E_a}{k \cdot T_s}}$$

$$E_a = -\ln\left(\frac{\tau_0}{\Delta T}\right) \cdot k \cdot T_s = -\ln\left(\frac{10^{-13}}{100}\right) \cdot 1,3807 \cdot 10^{-23} \cdot 380 = 1,812 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

## Opgave 2.7

Theorie: blz. 104 en §3,16

### Uitwerking:

Gegevens:  $P = 4,5 \cdot 10^{-15} \text{ Pa}^{1/2} \text{ m}^2/\text{s}$   
 $P_2 = 0,05 \text{ Pa}$   
 $S_p = 0,1 \text{ m}^3/\text{s}$   
 $D = 1 \cdot 10^{-3} \text{ m}$

Gevraagd: De laagst haalbare druk in de vacuümkamer

Oplossing:  $Q_p = P \cdot \frac{\sqrt{P_2}}{d} = 4,5 \cdot 10^{-15} \cdot \frac{\sqrt{0,05}}{1 \cdot 10^{-3}} = 1,006 \cdot 10^{-12} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$  per  $\text{m}^2$  (2.52)

$$Q = Q_p \cdot A = 1,006 \cdot 10^{-12} \cdot 0,5 = 5,031 \cdot 10^{-13}$$

$$P_p = \frac{Q}{S_p} = \frac{5,031 \cdot 10^{-13}}{0,1} = 5,031 \cdot 10^{-12} \text{ Pa}$$

---

Opmerking: hier schilt het weer een factor 2. En ik zit zonder idee wat ik fout zou kunnen doen...

## Opgave 2.9

Theorie: §2,6

Tips: Om bij deze opgave uit te komen op de antwoorden in het boek is het belangrijk niet te nauwkeurige waarden te gebruiken. Gebruik de  $k$  en  $N_a$  uit de gegevens.

Opmerking:  $\tau_0$  moet  $10^{-13}$ s zijn.

### Uitwerking:

Gegevens:  $\tau_0 = 10^{-13}$  s  
 $E_\alpha = 15$  KJ/mol =  $2,5 \cdot 10^{-20}$  J/molecuul  
 $T = 20$  K  
 $K = 1,38 \cdot 10^{-23}$  J/K  
 $N_a = 6 \cdot 10^{23}$

Gevraagd:  $\tau$

Oplossing: 
$$\tau = \tau_0 \cdot e^{\frac{E_\alpha}{kT}} = 10^{-13} \cdot e^{\frac{2,5 \cdot 10^{-20}}{1,28 \cdot 10^{-23} \cdot 20}} = 2,179 \cdot 10^{26} \text{ s} \quad (2.13)$$

Komt overeen met  $6,9 \cdot 10^{18}$  jaar

## Opgave 2.10

Theorie: blz. 104 en §3,16

### Uitwerking:

Gegevens:  $P = 10^{-12} \text{ Pa}^{1/2} \text{ m}^2/\text{s}$   
 $P_2 = 0,05 \text{ Pa}$   
 $S_p = 0,1 \text{ m}^3/\text{s}$   
 $D = 1 \cdot 10^{-3} \text{ m}$   
 $A = 1 \text{ m}^2$   
 $Q_d = 10^{-4} \text{ Pa, m}^3/\text{s, m}^2$

Gevraagd:  $Q_p$ ,  $Q_d$  na 400 dagen en haal een conclusie uit deze gegevens

Oplossing: 
$$Q_p = P \cdot \frac{\sqrt{P_2}}{d} = 10^{-12} \cdot \frac{\sqrt{0,05}}{1 \cdot 10^{-3}} = 2,24 \cdot 10^{-10} \text{ Pa, m}^3/\text{s} \text{ per m}^2 \quad (2.52)$$

Voor  $Q_d$  is gegeven dat de deze omgekeerd evenredig met de tijd is. Dus met verhoudingen werken om het antwoord te bereiken. 400 dagen bevat 9600 uur.

$$Q_{d,9600} = Q_{d,1} \cdot \frac{t_1}{t_{9600}} = 10^{-4} \cdot \frac{1}{9600} = 1,042 \cdot 10^{-8} \text{ Pa, m}^3/\text{s} \text{ per m}^2$$

Conclusie: de Permeatiegasstroom is zoveel kleiner dan de desorptiegasstroom dat deze te verwaarlozen is.

### Opgave 3.4

Theorie: Blz. 145

#### Uitwerking:

Gegevens:  $r = 0,01 \text{ m}$   
 $T = 300 \text{ K}$   
 $P_1 = 10^{-2} \text{ Pa}$   
 $P_2 = 0 \text{ Pa}$   
 $k = 1,3807 \cdot 10^{-23} \text{ NmK}^{-1}$

a) Gevraagd: Het aantal deeltje dat verpompt word

a) Oplossing:  $\frac{dN}{dt} = \frac{1}{4} \cdot n_1 - n_2 \cdot \bar{v} \cdot A$  (Blz. 145)

$$\bar{v} = 1,46 \cdot 10^2 \cdot \sqrt{\frac{T}{M}} = 1,46 \cdot 10^2 \cdot \sqrt{\frac{300}{28}} = 477,9 \text{ m/s} \quad (1.4)$$

$$n_1 = \frac{p_1}{k \cdot T} = \frac{10^{-2}}{1,3807 \cdot 10^{-23} \cdot 300} = 2,4142 \cdot 10^{18} \text{ m}^{-3} \quad (1.26)$$

$$A = \pi \cdot r^2 = 3,14 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$n_2 = 0$$

$$\frac{dN}{dt} = \frac{1}{4} \cdot n_1 - n_2 \cdot \bar{v} \cdot A = \frac{1}{4} \cdot 2,4142 \cdot 10^{18} \cdot 477,9 \cdot 3,14 \cdot 10^{-4} = 9,06 \cdot 10^{16} \text{ s}^{-1}$$

b) Gevraagd: Met welke pompsnelheid komt dit overeen

b) Oplossing: Ideal gas dus:

$$V = \frac{N \cdot k \cdot T}{P} = \frac{9,06 \cdot 10^{16} \cdot 1,3807 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{10^{-2}} = 0,0375 \text{ m}^3/\text{s} = 37,5 \text{ L/s}$$

### Opgave 3.6

Theorie: §3.13

Tips:  $\lambda < d$  en  $p \cdot d < 10^{-2}$  dus Moleculair. Let erop dat ze hier met  $R = 8314,5$  J/kmol,K rekenen dit omdat men anders op gram uitkomt in plaats van kilogram

Uitwerking:

Gegevens:  $d = 0,02$  m  
 $T = 300$  K  
 $P_1 = 10^{-2}$  Pa  
 $P_2 = 0$  Pa  
 $k = 1,3807 \cdot 10^{-23}$  NmK<sup>-1</sup>  
 $R = 8314,5$  J/kmol,K  
 $M = 28$

A)

Gevraagd: De hoeveelheid l/s die bij de ingang verpompt wordt:  $C_{tot}$

Oplossing: Het geleidingsvermogen van deze opgaven bestaat uit twee delen: Het geleidingsvermogen door een ronde opening:  $C_1$  (3.101) en het geleidingsvermogen door een buis met bocht  $C_2$  (3.118). De totale geleidingsvermogen wordt dan:

$$\frac{1}{C_{tot}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \quad (3.73)$$

$$C_1 = \frac{1}{8} \sqrt{\frac{2\pi RT}{M}} d^2 = \frac{1}{8} \cdot \sqrt{\frac{2\pi \cdot 8314,5 \cdot 300}{28}} \cdot 0,02^2 = 0,03741 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$C_2 = \frac{1}{6} \sqrt{\frac{2\pi RT}{M}} \frac{d^3}{l + \alpha d} = \frac{1}{6} \cdot \sqrt{\frac{2\pi \cdot 8314,5 \cdot 300}{28}} \cdot \frac{0,02^3}{1 + 1 \cdot 0,02} = 9,78 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$C_{tot} = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}} = \frac{1}{\frac{1}{0,03471} + \frac{1}{9,78 \cdot 10^{-4}}} = 9,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s} \approx 1 \text{ l/s}$$

B)

Gevraagd: Het aantal deeltje dat per seconde verplaatst word.

Oplossing: Ideaalgas dus:

$$N = \frac{P \cdot V}{k \cdot T} = \frac{10^{-2} \cdot 0,001}{1,3807 \cdot 10^{-23} \cdot 300} = 2,4 \cdot 10^{15} \text{ deeltjes/seconde} \quad (1.25)$$



### Opgave 3.7

Theorie: §3.13 + §3.16

Tips: Neem aan  $T = 300 \text{ K}$ , dus formule 3.102 is bruikbaar

Uitwerking:

Gegevens:  $d = 0,2 \text{ m}$

A) Gevraagd: De hoeveelheid l/s die bij de ingang verpompt wordt: C

$$\text{Oplossing: } C = 92 \cdot d^2 = 92 \cdot 0.2^2 = 3,7 \text{ m}^3/\text{s} \quad (3.102)$$

B) Gevraagd: Wat is de maximale effectieve pompsnelheid mogelijk

Oplossing: In het meest ideale geval is de druk boven de pomp 0 dus:

$$Q = C(p - p_p) = C \cdot p \quad (3.72)$$

$$Q = p \cdot S_{\text{eff}} \Rightarrow S_{\text{eff}} = \frac{Q}{p} = \frac{C \cdot p}{p} = C \quad (3.123)$$

$$S_{\text{eff}} = C = 3,7 \text{ m}^3/\text{s}$$

### Opgave 3.10

Theorie: §3.13K

Tips: Bekijk pagina 234 om een idee te krijgen wat een koelval is.

Uitwerking:

Gegevens:  $S_p = 200 \text{ L/s} = 0,2 \text{ m}^3/\text{s}$  (Voor  $\text{H}_2$ )  
 $C_{\text{Koelval}} = 0,5 \text{ m}^3/\text{s}$  (Voor  $\text{N}_2$  bij  $T = 293\text{K}$ )  
 $M_{\text{H}_2} = 2$   
 $M_{\text{N}_2} = 28$

Gevraagd:  $S_{\text{eff}}$

Oplossing: Gebruik formule 3.120 voor de  $C_{\text{koelval}}$  op de goede temperatuur te berekenen. Eerst echter  $C_{\text{lucht}}$  uit de huidige waarden halen:

$$C_{\text{lucht}} = \frac{C_{\text{koelval}}}{9,8 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{\frac{T}{M}}} = \frac{0,5}{9,8 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{\frac{293}{28}}} = 15,77 \text{ m}^3/\text{s} \quad (3.120)$$

$$C_{\text{H}_2, 72\text{K}} = 9,8 \cdot 10^{-3} \cdot C_{\text{lucht}} \cdot \sqrt{\frac{T}{M}} = 9,8 \cdot 10^{-3} \cdot 15,77 \cdot \sqrt{\frac{77}{2}} = 0,959 \text{ m}^3/\text{s}$$

Dan de effectieve pompsnelheid uitrekenen: pomp en koelval in serie:

$$\frac{1}{S_{\text{eff}}} = \frac{1}{S_p} + \frac{1}{C_{\text{koelva}}} = \frac{1}{0,2} + \frac{1}{0,959} \Rightarrow S_{\text{eff}} = 0,17 \text{ m}^3/\text{s} \quad (3.125)$$

---- Opmerking:

Boek komt op de helft van mijn waarde uit hebben hun toevallig gerekend met de pompsnelheid van  $\text{N}_2$ . Of zit ik er naast?

## Opgave 4.1

Theorie: Inleiding hoofdstuk 4

### Uitwerking:

Gegevens:  $P_0 = 1 \cdot 10^5$   
Na opgaven C:  
 $V_f = 0,5 \text{ L}$   
 $V_p = 0,05 \text{ L}$

a) Gevraagd: P na 1 slag:  $P_1$

a) Oplossing: Ideaal gas dus:  $P \cdot V = P \cdot V$

$$P_0 \cdot V_f = P_1 \cdot (V_f + V_p)$$

$$P_1 = P_0 \cdot \frac{V_f}{V_f + V_g} = 10^5 \cdot \frac{V_f}{V_f + V_g}$$

b) Gevraagd: P na 2 slagen:  $P_2$

b) Oplossing:  $P_2 = P_1 \cdot \frac{V_f}{V_f + V_g}$

$P_1$  invullen van antwoord a)

$$P_2 = P_0 \cdot \frac{V_f}{V_f + V_g} \cdot \frac{V_f}{V_f + V_g} = 10^5 \cdot \left( \frac{V_f}{V_f + V_g} \right)^2$$

c) Gevraagd: Wanneer is P gehalveerd

c) Oplossing:  $P_x = 10^5 \cdot \left( \frac{V_f}{V_f + V_g} \right)^x = 10^5 \cdot \left( \frac{0,5}{0,55} \right)^x$

Gevraagd is dus: Wanneer  $P_x < 0,5 \cdot 10^5$

$$\left( \frac{0,5}{0,55} \right)^x \leq 0,5 \Rightarrow x = 8$$

Dus na 8 keer pompen

## Opgave 4.2

Theorie: §4.8

### Uitwerking:

Gegevens:  $S_0 = S_{vol} = 0,28 \text{ m}^3/\text{s}$   
 $K_0 = 40$   
 $P_a = 10 \text{ Pa}$

a) Gevraagd:  $Q_{spl}$

a) Oplossing:  $S_{spl} = \frac{S_{vol}}{K_0} = \frac{0,28}{40} = 0,007 \text{ m}^3/\text{s}$  (4.52)

$$Q_{spl} = S_{spl} \cdot P_a = 7 \cdot 10^{-3} \cdot 10 = 0,07 \text{ Pam}^3/\text{s}$$
 (4.54)

b) Gevraagd:  $C_{spl}$

b) Oplossing:  $C_{spl} = \frac{S_{vol}}{K_0 - 1} = \frac{0,28}{39} = 0,0072 \text{ m}^3/\text{s}$  (4.60)

c) Gevraagd:  $S_{vp}$  (Pompsnelheid van de voorvacuümpomp)

c) Oplossing:  $S_{vp} = \frac{S \cdot P_a}{P_v}$  (4.55)

$$P_v = P_a \cdot K_0 = 10 \cdot 40 = 400 \text{ Pa}$$

$$S_{vp} = \frac{S \cdot P_a}{P_v} = \frac{0,28 \cdot 10}{400} = 7 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s} = 25 \text{ m}^3/\text{h}$$

## Opgave 4.6

Theorie: §4.9.2

### Uitwerking:

Gegevens:  $S_0 = S_{vol} = 0,5 \text{ m}^3/\text{s}$   
 $K_0 = 1000$   
 $P_v = 1 \text{ Pa}$

a) Gevraagd:  $S$  voor  $P_{H2}$

a) Oplossing: 
$$S = S_0 \left( 1 - \frac{P_v}{P_a} \cdot \frac{1}{K_0} \right) = 0,5 \left( 1 - \frac{1}{P_a} \cdot \frac{1}{10^3} \right) \quad (4.82)$$

$$S = 0,5 \left( 1 - \frac{10^{-3}}{P_{H2}} \right)$$

b) Gevraagd:  $S$  voor  $P_{H2}$  na invoegen extra pomp

b) Oplossing:  $S_0 = S_0$  van de eerste pomp

$K_0$  wordt echter de vermenigvuldiging van de compressie verhoudingen:

$$K_0 = K_{01} \cdot K_{02} = 500 \cdot 1000 = 5 \cdot 10^5$$

$$S = 0,5 \left( 1 - \frac{1}{P_a} \cdot \frac{1}{5 \cdot 10^5} \right) = 0,5 \left( 1 - \frac{2 \cdot 10^{-6}}{P_{H2}} \right)$$

### Opgave 4.9

Theorie: §4.10.4

Tips: Deze opgave mist de temperatuur van de vacuümruimte zelf neem hiervoor 300K

#### Uitwerking:

Gegevens:  $r = 0,1 \text{ m}$   
 $T_s = 4,6 \text{ K}$   
 $T_g = 300 \text{ K}$   
 $M_{\text{H}_2} = 2$   
 $M_{\text{N}_2} = 28$

Gevraagd:  $S_{\text{max}}$  voor  $\text{H}_2$  en  $\text{N}_2$

Oplossing:  $S_{\text{Max}} = 36,6 \cdot A \cdot \sqrt{\frac{T_g}{M}} \quad (4.107)$

$$A = \pi \cdot r^2 = 0,0314159 \text{ m}^2$$

Dus voor  $\text{N}_2$ :

$$S_{\text{Max}} = 36,6 \cdot 0,0314159 \cdot \sqrt{\frac{300}{28}} = 3,7 \text{ m}^3/\text{s}$$

en voor  $\text{H}_2$ :

$$S_{\text{Max}} = 36,6 \cdot 0,0314159 \cdot \sqrt{\frac{300}{2}} = 13,96 \text{ m}^3/\text{s}$$

### Opgave 4.10

Theorie: §2.9.1 en §4.10.1

Tips: 1 mol lucht van  $10^5$  Pa komt overeen met  $0,0224 \cdot 10^5 \text{ Pa}\cdot\text{m}^3$

#### Uitwerking:

Gegevens:  $V_t = 0,102 \text{ m}^3$   
 $T_e = 77 \text{ K}$   
 $M_{\text{O}_2} = 32$  (komt voor 20 % voor in lucht)  
 $M_{\text{N}_2} = 28$  (komt voor 80 % voor in lucht)

a) Gevraagd: Wat is de gemiddelde molecuulmassa van lucht?

a) Oplossing: Gemiddelde molecuulmassa is de optelsom van de molmassa's maal het percentage dat ze voorkomen:

$$M_{\text{gem}} = 28 \cdot 0,8 + 32 \cdot 0,2 = 28,8$$

b) Gevraagd: De einddruk van deze opstelling:  $P_e$

b) Antwoord: Het systeem bevat:

$$\frac{0,102}{0,0224} = 4,455 \text{ mol aan lucht (Toepassing van de tip)}$$

dit is:

$$m = M \cdot N = 28,8 \cdot 4,455 = 131 \text{ gram lucht}$$

Er is twee kg zeoliet dus dat is dan 65 g per kilogram Zeoliet

Deze waarde opzoeken op de adsorptie-isotherm van 77 K levert ongeveer 5 Pa

----Opmerking: dit lijkt mij logisch, het antwoord klopt ook. Maar ik gebruik maar 10% van de gegevens... Dit geeft mij hele grote vraagtekens....

## Opgave 4.12

Theorie: §3.13, §3.16 en §4.10.3

### Uitwerking:

Gegevens:  $V_t = 0,102 \text{ m}^2$   
 $T_e = 77 \text{ K}$   
 $M_{O_2} = 32$  (komt voor 20 % voor in lucht)  
 $M_{N_2} = 28$  (komt voor 80 % voor in lucht)

a) Gevraagd: Hoe kan de druk in de pomp bepaald worden:

a) Oplossing: De ontladingsstroom van de pomp is evenredig met de druk, dus na ijking is deze een maat voor de druk

b) Gevraagd: Bereken de gasstroom  $Q_1$  als  $V_1$  is open is

b) Oplossing:  $Q_1 = p_{p1} \cdot S_p = 10^{-5} \cdot 10^{-2} = 10^{-7} \text{ Pam}^3/\text{s}$  (3.122)

c) Gevraagd: Bereken de gasstroom  $Q_2$  als  $V_1$  is open is

c) Oplossing:  $Q_2 = p_{p2} \cdot S_p = 10^{-6} \cdot 10^{-2} = 10^{-8} \text{ Pam}^3/\text{s}$  (3.122)

d) Gevraagd: Een verklaring voor het druk verschil

d) Oplossing: Dit kan door desorptie in de detectorruimte en door een lek in de detectorruimte. Beide is ook mogelijk.

e) Gevraagd: Het druk verschil over  $V_1$

e) Oplossing:  $p_{v1} = \frac{Q_1 - Q_2}{S} = \frac{10^{-7} - 10^{-8}}{0,25 \cdot 10^{-3}} = 3,6 \cdot 10^{-4} \text{ Pa}$

f) Gevraagd: Einddruk in de detector ruimte

f) Oplossing:  $P_{gev} = P_{v1} - P_{p1} = 3,6 \cdot 10^{-4} - 1 \cdot 10^{-5} = 3,7 \cdot 10^{-4} \text{ Pa}$



### Opgave 4.13

Theorie: §3.13, §3.16 en §4.10.3

Tips: Ga uit van  $T = 300$  K. En neem het geleidingsvermogen voor de buizen van een korte cilindrische buis.

#### Uitwerking:

Gegevens:  $R = 8314,5$  J/kmol,K  
 $d_1 = 0,1$  m  
 $d_2 = 0,03$  m  
 $l = 0,3$  m  
 $S_{p,lucht} = 0,08$  m<sup>3</sup>/s  
 $S_{p,helium} = 0,008$  m<sup>3</sup>/s  
 $P_0 = 10^{-4}$  Pa

a) Gevraagd: De pompsnelheid aan het vat voor lucht

a) Oplossing: Alle onderstaande gegevens zijn geldig voor lucht

$$\frac{1}{S_{eff}} = \frac{1}{S_p} + \frac{1}{C_{Gat}} + \frac{1}{C_{buis}} + \frac{1}{C_{Dia}} + \frac{1}{C_{buis}} \quad (3.125)$$

$$C_{gat} = 92 \cdot d^2 = 92 \cdot 0,1^2 = 0,92 \text{ m}^3/\text{s} \quad (3.102)$$

$$K = \frac{4 \cdot d}{4 \cdot d + 3 \cdot l} = \frac{4 \cdot 0,1}{4 \cdot 0,1 + 3 \cdot 0,3} \quad (3.110)$$

$$C_{buis} = 92 \cdot d^2 \cdot K = 92 \cdot 0,1^2 \cdot 0,3077 = 0,283 \text{ m}^3/\text{s} \quad (3.111)$$

$$C_{Dia} = 92 \cdot \frac{d_1^2 \cdot d_2^2}{d_1^2 - d_2^2} = 92 \cdot \frac{0,1^2 \cdot 0,03^2}{0,1^2 - 0,03^2} = 0,09099 \text{ m}^3/\text{s} \quad (3.104)$$

$$\frac{1}{S_{eff}} = \frac{1}{0,08} + \frac{1}{0,92} + \frac{1}{0,283} + \frac{1}{0,09099} + \frac{1}{0,283} \Rightarrow S_{eff} = 0,032 \text{ m}^3/\text{s}$$

b) Gevraagd: De drukken bij  $p_1$  en  $p_2$

b) Oplossing:  $Q = p_0 \cdot S_{eff} = 10^{-4} \cdot 0,032 = 3,2 \cdot 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s} \quad (3.123)$

$$\frac{1}{S_2} = \frac{1}{S_p} + \frac{1}{C_{buis}} = \frac{1}{0,283} + \frac{1}{0,08} \Rightarrow S_2 = 0,06237 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$p_2 = \frac{Q}{S_2} = \frac{3,2 \cdot 10^{-6}}{0,06237} = 5,1 \cdot 10^{-5} Pa$$

$$\frac{1}{S_1} = \frac{1}{S_p} + \frac{1}{C_{buis}} + \frac{1}{C_{dia}} = \frac{1}{0,283} + \frac{1}{0,08} + \frac{1}{0,09099} \Rightarrow S_1 = 0,037 m^3/s$$

$$p_1 = \frac{Q}{S_1} = \frac{3,2 \cdot 10^{-6}}{0,037} = 8,6 \cdot 10^{-5} Pa$$

c) Gevraagd De pompsnelheid aan de vacuümkamer voor helium

c) Oplossing De hieronder gebruikte gegevens zijn die van helium

$$\frac{1}{S_{eff}} = \frac{1}{S_p} + \frac{1}{C_{Gat}} + \frac{1}{C_{buis}} + \frac{1}{C_{Dia}} + \frac{1}{C_{buis}} \quad (3.125)$$

$$C_{gat} = \frac{1}{8} \cdot \sqrt{\frac{2\pi \cdot R \cdot T}{M}} \cdot d^2 = \frac{1}{8} \cdot \sqrt{\frac{2\pi \cdot 8314,5 \cdot 300}{4}} \cdot 0,1^2 = 2,474 m^3/s$$

$$C_{buis} = \frac{1}{8} \cdot \sqrt{\frac{2\pi \cdot R \cdot T}{M}} \cdot d^2 \cdot K = \frac{1}{8} \cdot \sqrt{\frac{2\pi \cdot 8314,5 \cdot 300}{4}} \cdot 0,1^2 \cdot 0,3077 = 0,761 m^3/s$$

$$C_{dia} = \frac{1}{8} \cdot \sqrt{\frac{2\pi \cdot R \cdot T}{M}} \cdot \frac{d_1^2 \cdot d_2^2}{d_1^2 - d_2^2} = \frac{1}{8} \cdot \sqrt{\frac{2\pi \cdot 8314,5 \cdot 300}{4}} \cdot \frac{0,1^2 \cdot 0,03^2}{0,1^2 - 0,03^2} = 0,245 m^3/s$$

$$\frac{1}{S_{eff}} = \frac{1}{0,008} + \frac{1}{2,474} + \frac{1}{0,761} + \frac{1}{0,245} + \frac{1}{0,761} \Rightarrow S_{eff} = 7,6 \cdot 10^{-3} m^3/s$$

d) Gevraagd Einddruk in de vacuümkamer

$$d) \text{ Oplossing } P_e = P_{e,lucht} + P_{e,Helium} = \frac{Q}{P_{e,lucht}} + \frac{Q}{P_{e,helium}} = \frac{2 \cdot 10^{-6}}{0,032} + \frac{2 \cdot 10^{-6}}{7,4 \cdot 10^{-3}} = 3,2 \cdot 10^{-4} Pa$$

## Opgave 6.2

### Uitwerking:

a) Gevraagd De kleinste helium druk die gemeten kan worden

a) Oplossing De kleinste helium druk is de druk net boven de ruis:

$$\frac{10^{-13} A}{10^{-3} A/Pa} = 10^{-10} Pa$$

b) Gevraagd Wat is de kleinste lek die nog gemeten kan worden

b) Oplossing  $Q = S_p \cdot P_p = 10^{-10} \cdot 0,25 = 2,5 \cdot 10^{-11} Pa, m^3/s$

c) Gevraagd Welke druk verhouding word er gemeten tussen helium en stikstof

c) Oplossing  $Q_{he} = 250$   
 $Q_n = 1250$

De verhouding is dus 1 op 5 voor helium op stikstof

d) Gevraagd Wat er gebeurt met de gevoeligheid als het scheidend vermogend wordt verhoogd

d) Oplossing De gevoeligheid daalt als het scheidend vermogen groter wordt, Zie bladzijde 473

## Opgave 6.4

Theorie: §6,7

### Uitwerking:

a) Gevraagd: De samenstelling

a) Oplossing: Opmeten van de pieken levert:

$$18 = 3,12 \text{ cm}$$

$$32 = 2,40 \text{ cm}$$

$$17 = 1,30 \text{ cm hier } 17\% \text{ van piek } 18 \text{ af}$$

$$16 = 1,64 \text{ cm hier } 11\% \text{ van piek } 32, 1\% \text{ van piek } 18 \text{ en } 80\% \text{ van piek } 17 \text{ af}$$

$$15 = 0,97 \text{ cm}$$

$$14 = 0,20 \text{ cm}$$

$$\text{H}_2\text{O} = 18 = 3,12 \text{ cm} \Rightarrow 44,7\%$$

$$\text{O}_2 = 32 = 2,40 \text{ cm} \Rightarrow 34,4\%$$

$$\text{NH}_3 = 17 = 0,58 \text{ cm} \Rightarrow 8,3\%$$

$$\text{CH}_4 = 16 = 0,88 \text{ cm} \Rightarrow 12,6\%$$

## Opgave 6.5

Theorie: §4.10.2, §4.10.3 en §6.9

### Uitwerking:

a) Gevraagd: welke pieken komen voor na een aantal dagen pompen zonder uitstoken

a) Oplossing: Argon deze wordt slecht verpompt  
H<sub>2</sub>O deze komt voor door desorptie  
CO<sub>2</sub> zie bladzijde 490 voor uitleg  
CO zie ook bladzijde 490 voor uitleg

b) Gevraagd: welke pieken komen voor na een aantal dagen pompen zonder uitstoken

b) Oplossing: Argon deze wordt slecht verpompt  
H<sub>2</sub> deze komt voor door diffusie uit de stalen wanden  
CH<sub>4</sub> wordt gemaakt door de getterionenpomp  
CO de gloeidraad in de spectrometer genereert CO moleculen

c) Gevraagd: Wat gebeurt er direct na het sublimeren

c) Oplossing: De druk stijgt door desorptie en the ontstaan van CH<sub>4</sub> uit H<sub>2</sub> en CO uit O<sub>2</sub>

d) Gevraagd: Verklaar de hoge piek 26

d) Oplossing: De zuurstof uit het lek reageert met de koolstof op de vervuilde kathodes tot CO

### Opgave 8.3

Theorie: §8,7

#### Uitwerking:

Gevraagd: de druk variatie ten gevolge van het afsproeien

Oplossing: Tabel 8,4 geeft voor een ionisatie meter en een diffusie pomp met helium als test gas:

$$\frac{P_{ta}}{P_{la}} = 0,3 \quad \text{met andere woorden: zal helium een drukval van 70\%}$$

veroorzaken

## Opgave 8.6

Theorie: §8.4

### Uitwerking:

Gegevens:  $p_1 = 4 \cdot 10^{-6} \text{ Pa}$   
 $p_2 = 0,5 \text{ Pa}$   
 $V = 0,2 \text{ m}^3$   
 $t = 57600 \text{ s}$

a) Gevraagd: Welke conclusie ligt voor de hand

a) Oplossing: Piek 18 komt niet voor. Dus desoptie is het niet, permeatie heeft veel kleinere waarden. Conclusie: Het systeem is lek.

b) Gevraagd: Kwantificeer deze oplossing

b) Oplossing:  $\Delta p = p_2 - p_1 = 0,5 - 4 \cdot 10^{-6} = 0,499996 \text{ Pa}$

$$Q_l = \frac{\Delta p}{t} \cdot V = \frac{0,499996}{57600} \cdot 0,2 = 1,74 \cdot 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 / \text{s} \quad (8.2)$$

c) Gevraagd: Hoelang tot het systeem en druk van 0,5 atm heeft bereikt

c) Oplossing:  $t = \frac{\Delta p}{Q_l} \cdot V = \frac{5000}{1,74 \cdot 10^{-6}} \cdot 0,2 = 5,747 \cdot 10^9 \text{ s} = 182,2 \text{ Jaar}$  (8.2)

### Opgave 8.8

Theorie: §8.4

#### Uitwerking:

Gegevens:  $p_1 = 3 \cdot 10^5 \text{ Pa}$   
 $p_2 = 2,99 \cdot 10^5 \text{ Pa}$   
 $V = 1,8 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$   
 $Q_1 = 5 \cdot 10^{-9} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$

Gevraagd: De tijd tot  $p_2$  bereikt wordt

Oplossing:  $\Delta p = p_1 - p_2 = 3 \cdot 10^5 - 2,99 \cdot 10^5 = 1000 \text{ Pa}$

$$t = \frac{\Delta p}{Q_1} \cdot V = \frac{1000}{5 \cdot 10^{-9}} \cdot 1,8 \cdot 10^{-4} = 3,6 \cdot 10^7 \text{ s} = 1,14 \text{ jaar} \quad (8.2)$$