TENTAMEN I TRANSPORTPROCESSER I KEMITEKNIKEN (KAA060)

Torsdag 12 april 2007 kl 08.30-13.30 i V.

Anders Rasmuson är anträffbar för frågor på telefonankn 2940 eller 27 36 06 och kommer att vara i tentamenslokalen vid två tillfällen: kl 9-10 och kl 11-12.

Granskning av tentamensrättningen kan ske tidigast den 2 maj 2007.

Tentamen omfattar:

A. Teori (24 p)

Inga hjälpmedel tillåtna!

B. Problem (36 p)

Tillåtna hjälpmedel:

Valfri kalkylator (nollställd)

3W (Welty, Wicks och Wilson: Fundamentals of Momentum, Heat and Mass Transfer)

PM: Transportprocesser, kompletterande material (sid 1-13)

Räknetabell (exvis TEFYMA, Nya Formelsamlingen eller BETA)

Physics Handbook

Betygsgränser

Poäng:	0-29	30-39	40-49	50-60
Betyg:	U	3	4	5

Del A måste lämnas in innan del B (med hjälpmedel) får påbörjas!

OBS! Erratalista till kursboken (3W) bifogas tentamenstesen

DEL A. TEORI

A1. Det visar sig omöjligt att blåsa en pingis boll ur en tratt enligt Fig. A1. Förklara! (2p)

A2. Den mikroskopiska totala massbalansen kan skrivas:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathbf{v} = 0$$

a) Ange fysikalisk betydelse av de bägge termerna!
b) Hur förenklas ekvationen om strömningen är stationär?
c) Hur förenklas ekvationen om fluiden är inkompressibel? (3p)

A3. Hagen-Poiseulle´s ekvation härleddes ursprungligen för att beskriva blodströmning. Ge tre (motivera) orsaker till att den endast gäller approximativt för strömning av blod i kroppens artärer. (3p)

A4. För steady-state värmeledning genom ett <u>sfäriskt skal</u> gäller:

$$q = \frac{k\overline{A}}{r_o - r_i}\Delta T$$

där $\overline{A}$ är en lämplig medelarea. Härled denna! (3p)

A5. Vid konvektiv uppvärmning av en fast kropp används Biot´s tal, Bi=hL/k, för att karakterisera värmeöverföringen. Diskutera värmeöverföringen mellan den fasta kroppen och omströmmande medium för fallen Bi liten, Bi≅1 och Bi stor. Vilka approximationer kan göras i respektive fall? (3p)

A6. En våt kropp som omströmmas av luft antar efter lång tid den så kallade våttemperaturen. Beskriv fysikaliskt och ställ upp relevanta uttryck för beräkningen av denna! (3p)

A7. För masstransport vid laminär strömning över en plan platta gäller:

$$Nu_{L,AB} = 0.664\,\mathrm{Re}_L^{1/2}\,Sc^{1/3}$$

a) Ge uttryck och fysikalisk tolkning av ingående dimensionslösa tal! (2p)
b) Vilket är det analoga uttrycket för värmetransport? (1p)

A8.
a) Visa att bulkbidraget för komponent B är lika stort som diffusionsbidraget för komponent A (storlek <u>och</u> riktning) vid diffusion genom stagnant komponent! (3p)
b) Hur stort är bulkbidraget för komponent B vid ekvimolekylär motriktad diffusion? (1p)

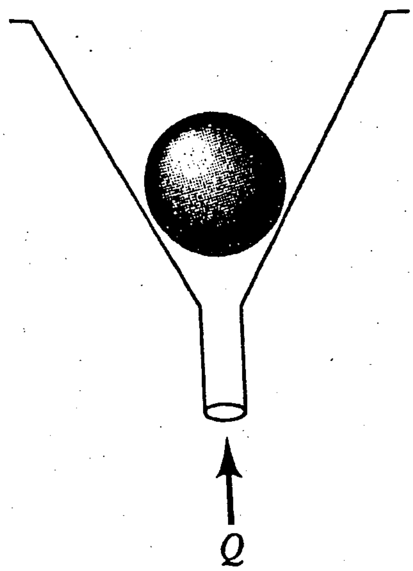
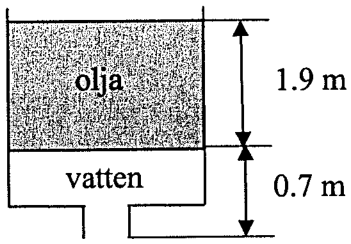


Fig. A1

DEL B. PROBLEM

B1

Vatten samlas på botten av en rektangulär oljetank, se figur. Vattnet töms ut genom ett hål i botten. Hålets diameter är 0.02 m. Hur stort är flödet av vatten ut från tanken? Tankens ytarea är 2.6 m x 9.5 m. Strömningsförluster kan försummas och ytans höjd kan antas konstant vid beräkningen av flödet. Oljans densitet är 866 kg/m^3.



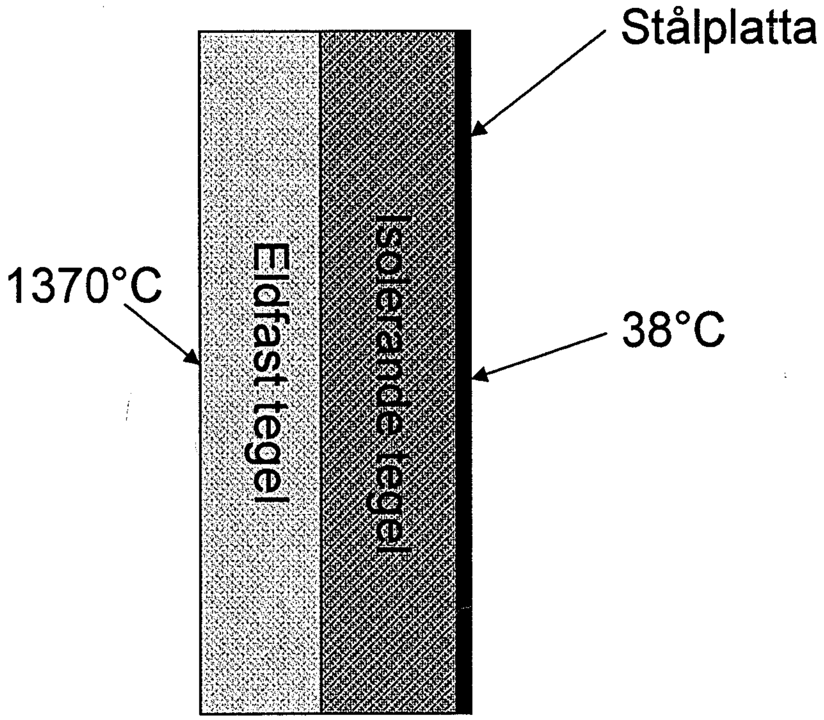
(8p)

B2

En masugnsvägg består av tre lager: ett lager av eldfast tegel, ett lager av isolerande tegel, och en stålplatta som är 0,6 cm tjockt, som används som mekaniskt skydd. Beräkna tjockleken av varje tegellager så ett minimum av total väggtjocklek ges.
Den totala värmeförlusten är 16 kW/m^2. Alla antaganden skall motiveras.

Data:

		Värmekonduktivitet W/m,K	
Material	Tillåten max temp	Vid 40°C	Vid 1100°C
Eldfast tegel	1400°C	3,1	6,2
Isolerande tegel	1100°C	1,6	3,1
Stål	-	45,1	-



(10p)

B3

Acetonhaltig luft ska renas genom att aceton absorberas i vatten. Halten aceton i luften in är 1 mol-%. Vid rådande betingelser kan jämviktsambandet $p_{aceton} = 0.0000316 c_{aceton}$ användas, där p_{aceton} är partialtrycket av aceton i atm och c_{aceton} är koncentrationen aceton i vatten i mol/m^3. För absortionen har följande massöverförings koefficienter tagits fram:

$$\text{massöverföringskoefficienten för gasfilmen, } k_G = 0.21 \frac{mol}{m^2 s\,atm}$$

$$\text{massöverföringskoefficienten för vätskan, } K_L = 4.9 \cdot 10^{-6} \frac{m}{s}$$

Hur stor andel av masstransport motståndet ligger i gasfasen? Hur stort är fluxet av aceton när halten aceton i gasfasen är 1 mol-% och halten av aceton i vätskefasen är 0.2 mol-%? Reningen sker vid atmosfärstryck och 20°C.

(8p)

B4

En luftbubbla har diametern 3 mm. Hur stor mängd syre (mol) avger bubblan under tiden den stiger 1.5 m i vatten? Antag att syrehalten i bubblan och bubblans hastighet är konstant, och att allt motstånd för massöverföringen ligger i vattnet.

Data:
Värmeöverföringskoeffcienten h: 7400W/m^2,K
Koncentration av syre i vatten då jämvikt råder mellan luft och vatten: 240 mol O_2/m^3 H_2O
Syrets diffusivitet i vatten: $2 \cdot 10^{-9}$ m^2/s
Halt av syre i vattnet (konstant): 230 mol O_2/m^3 H_2O
Vattnets temperatur: 25°C

(10p)

Erratalista till 3W 4:e upplagan

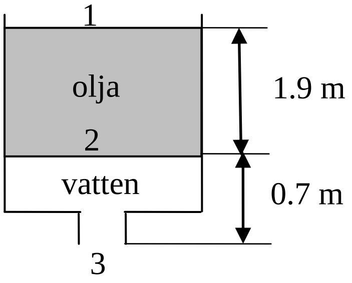
Sidan 151, Figur 12.2: CD-axel

	Står	Skall stå
Sidan 151, Figur 12.2: CD-axel	0	1
Sidan 190, ekv. 14-16	$\frac{\Delta P}{\rho}$	$\frac{\Delta P}{\rho g}$

Erratalista till 3W 3:e upplagan

	Står	Skall stå
Sidan 210, ekv. 14-16	$\frac{\Delta P}{\rho}$	$\frac{\Delta P}{\rho g}$
Sidan 358, ekv. 20-10	$\_Ra_D$	$\_Ra_D^{1/6}$
Sidan 370, ekv. 20-32	$\_0.36\_$	$\_0.036\_$
Sidan 375, ekv. 20-35	$\_Re_D^{152}$	$\_Re_D^{1/2}$

Lösning B1:



Bernoullis ekvation från 1 till 2:

$$gy_1 + \frac{v_1^2}{2} + \frac{P_1}{\rho_{olja}} = gy_2 + \frac{v_2^2}{2} + \frac{P_2}{\rho_{olja}}$$

$$P_2 = \left(gy_1 + \frac{v_1^2}{2} + \frac{P_1}{\rho_{olja}} - \left(gy_2 + \frac{v_2^2}{2} \right) \right) \rho_{olja} \quad \text{(ekv.1)}$$

Bernoullis ekvation från 2 till 3:

$$gy_2 + \frac{v_2^2}{2} + \frac{P_2}{\rho_{vatten}} = gy_3 + \frac{v_3^2}{2} + \frac{P_3}{\rho_{vatten}}$$

$$v_3^2 = 2 \cdot \left(gy_2 + \frac{v_2^2}{2} + \frac{P_2}{\rho_{vatten}} - \left(gy_3 + \frac{P_3}{\rho_{vatten}} \right) \right) \quad \text{(ekv. 2)}$$

insättning av ekvation 1 i 2

$$v_3^2 = 2 \cdot \left(gy_2 + \frac{v_2^2}{2} + \frac{\left(gy_1 + \frac{v_1^2}{2} + \frac{P_1}{\rho_{olja}} - \left(gy_2 + \frac{v_2^2}{2} \right) \right) \rho_{olja}}{\rho_{vatten}} - \left(gy_3 + \frac{P_3}{\rho_{vatten}} \right) \right)$$

Tankensarea är mycket större än hålets area. Kontinuitets ekvationen ger att $v_1 = v_2 << v_3$.

$$v_3^2 = 2 \cdot \left(gy_2 + \frac{\left(gy_1 \rho_{olja} + P_1 - (gy_2)\rho_{olja} \right)}{\rho_{vatten}} - \left(gy_3 + \frac{P_3}{\rho_{vatten}} \right) \right) = 2 \cdot \left(gy_2 + \frac{\left(gy_1 + \frac{P_1}{\rho_{olja}} - (gy_2) \right) \rho_{olja}}{\rho_{vatten}} - \left(gy_3 + \frac{P_3}{\rho_{vatten}} \right) \right) =$$

$$= 2 \cdot \left(gy_2 + \frac{\left(gy_1 \rho_{olja} + P_1 - (gy_2)\rho_{olja} \right)}{\rho_{vatten}} - \left(gy_3 + \frac{P_3}{\rho_{vatten}} \right) \right)$$

$$P_1 = P_3 = 1atm$$

$$v_3^2 = 2 \cdot \left(gy_2 + \frac{\left(gy_1 \rho_{olja} - (gy_2)\rho_{olja} \right)}{\rho_{vatten}} - (gy_3) \right)$$

$$y_2 - y_3 = 0.7m$$

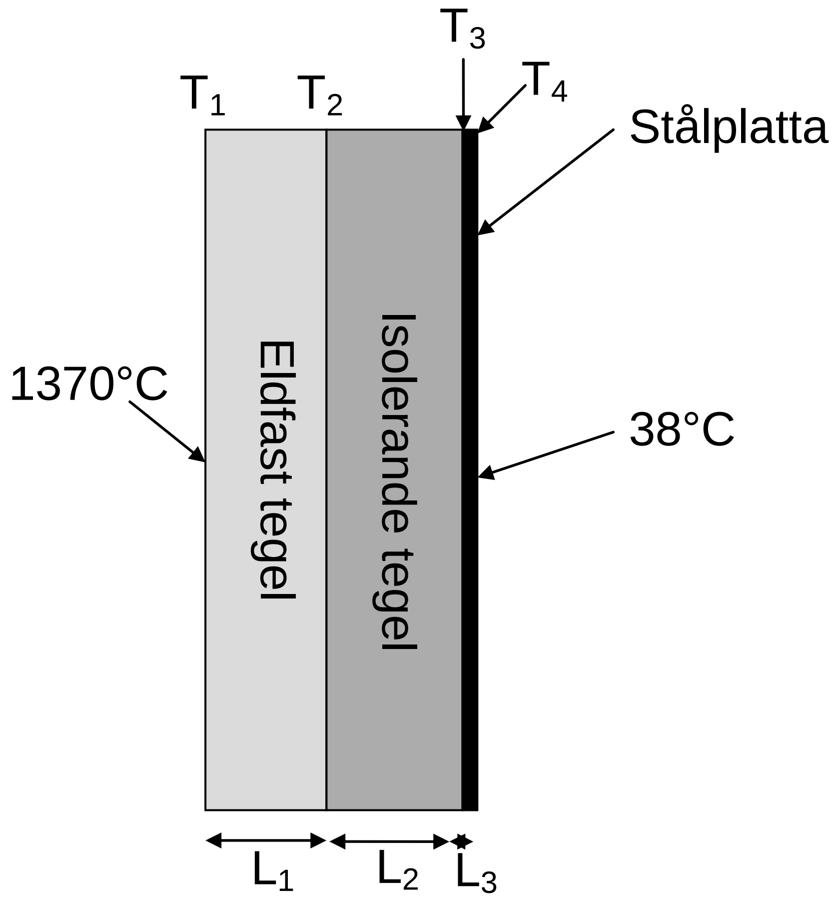
$$y_1 - y_2 = 1.9m$$

$$v_3 = 6.79 m/s$$

$$Q = 2.1 \cdot 10^{-3} m^3/s$$

Lösning B2:

Stationär värmeledning i 1D:



Given data:
T_1 = 1370°C
T_4 = 38°C
L_3 = 0,6 cm = 0,006 m
$(q/A)_{tot}$ = 16000 W/m^2
Konduktivitetsdata givna i tabell

Sökt: L_1 och L_2 med total minimallängd $L_1 + L_2$
Den minimala totallängden fås när T_2 = 1100°C, eftersom det isolerande materialet utnyttjas till max då och det går åt mindre längd av detta material eftersom det isolerar bättre (lägre värmekonduktivitet).

$$\frac{q_{tot}}{A} = \frac{q_1}{A} = \frac{q_2}{A} = \frac{q_3}{A} = 16000\,\text{W/m}^2 \quad \text{(på grund av steady-state och samma area)}$$

$$\frac{q_3}{A} = \frac{k_3}{L_3}(T_3 - T_4) = 16000 \quad \Rightarrow \quad T_3 = T_4 + \frac{q_3 L_3}{A k_3} = 38 + \frac{16000 \cdot 0{,}006}{45{,}1} = 40{,}1°\text{C}$$

$$\frac{q_2}{A} = \frac{k_2}{L_2}(T_2 - T_3) = 16000 \qquad \text{antag att } k_2 = \frac{k_{vid\,40°C} + k_{vid\,1100°C}}{2} = \frac{1{,}6 + 3{,}1}{2} = 2{,}35\,W/m,K$$

$$\Rightarrow \qquad L_2 = \frac{k_2(T_2 - T_3)}{\frac{q_2}{A}} = \frac{2{,}35 \cdot (1100 - 40{,}1)}{16000} = 0{,}16\text{m}$$

$\frac{q_1}{A} = \frac{k_1}{L_1}(T_1 - T_2) = 16000$ antag att $k_1 = 6{,}1\text{W/m, K}$ (går ej att interpoler då högre värde saknas)

$$\Rightarrow \qquad L_1 = \frac{k_1(T_1 - T_2)}{\frac{q_1}{A}} = \frac{6{,}2 \cdot (1370 - 1100)}{16000} = 0{,}10\text{m}$$

Lösning B3:

Motstånd i gasfasen: $\frac{1}{k_G}$

Totalt motstånd: $\frac{m}{K_L}$

Där m är jämviktskonstanten. Enhet för m: $m = 0.0000316 \ = \frac{p_{aceton}}{c_{aceton}} \ \frac{\mathrm{atm} \cdot \mathrm{m}^3}{\mathrm{mol}}$

Andel av motståndet för massöverföring som ligger i gasfasen:

$$\frac{\frac{1}{k_G}\left(\frac{m^2 satm}{mol}\right)}{\frac{m}{K_L}\left(\frac{\mathrm{atm}\cdot\mathrm{m}^3}{\mathrm{mol}}\frac{s}{m}\right)} = \frac{K_L}{mk_G} = 0.74$$

74% av motståndet för massöverföring ligger i gasfasen.

$$N_A = K_L\left(c_A^* - c_A^L\right)$$

c_A^* är motsvarande jämviktskoncentration i vätskan för koncentrationen i gasbulken.

$$c_A{}^* = \frac{p_A}{0.0000316}$$

$$p_A = 0.01 \cdot 1 atm$$

$$c_A{}^* = 316.46$$

Koncentrationen av aceton är mycket låg i vätskefasen 0.2 mol%. Antag rent vatten och räkna ut antal mol/m^3.

$$M_{H20} = 18 \cdot 10^{-3} kg / mol$$

$$\rho_{H2O} = 998 kg / m^3$$

$$c = \frac{\rho_{H2O}}{M_{H20}} = 55444.44 mol / m^3$$

$$c_A = 0.002 \cdot c = 110.89 mol / m^3$$

$$N_A = K_L\left(c_A^* - c_A^L\right) = 1.0 \cdot 10^{-3} mol / m^2, s$$

Lösning B4:

Data:
d = 3 mm = 0,003 m
$D_{AB} = 2\cdot10^{-9}$ m^2/s
L = 1,5 m
$C_{A,\infty}$ = 240 mol O_2/m^3 H_2O
$C_{A,S}$ = 230 mol O_2/m^3 H_2O
h = 7400 W/m^2,K

Vad är fluxet från bubblan?

$$N_A = k_c(C_{A,s} - C_{A,\infty})$$

k_c kan fås ur Chilton-Colburn (28-61)

$$\frac{h}{\rho_{vatten} v_\infty c_p}\mathrm{Pr}^{2/3} = \frac{k_c}{v_\infty} Sc^{2/3}$$

$$\Rightarrow k_c = \frac{h}{\rho_{vatten} c_p}\left(\frac{\mathrm{Pr}}{Sc}\right)^{2/3}$$

$$\mathrm{Pr}(293K, vatten) = 6.96$$

$$\nu(293K, vatten) = 0.995\cdot10^{-6}$$

$$Sc = \frac{\nu}{D_{AB}} = \frac{0.995\cdot10^{-6}}{2\cdot10^{-9}} = 497.5$$

$$c_p = (293K, vatten) = 4182 J/kgK$$

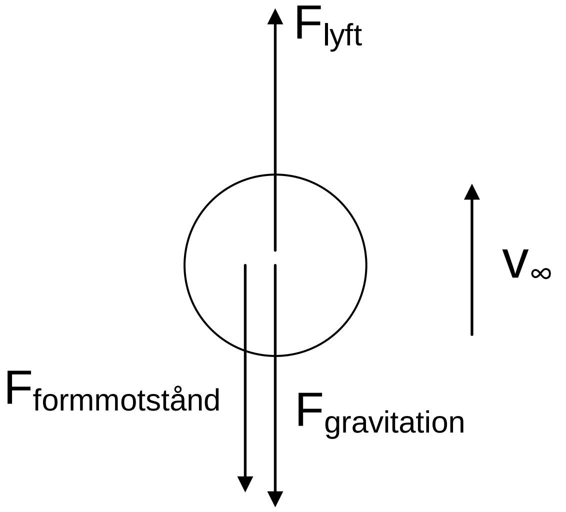
$$\rho_{\mathrm{vatten}}(293K) = 998{,}2\ \mathrm{kg/m}^3$$

$$k_c = \frac{7400}{998.2\cdot4182}\left(\frac{6.96}{497.5}\right)^{2/3} = 1.029\cdot10^{-4} m/s$$

$$N_A = 1.029\cdot10^{-4}(240-230) = 1.029\cdot10^{-3} mol/m^2, s$$

För att kunna lösa uppgiften behöver vi tiden för bubblan att ta sig 1,5 m. Då måste vi bestämma bubblans hastighet. Antag att bubblan har nått sin terminal hastighet eftersom hastigheten är konstant.

Kraftbalans på bubblan:



$$F_{lyftkraft} = F_{gravitation} + F_{formmotstånd}$$

$$F_{lyftkraft} = \rho_{vatten} g V_{bubbla} = \rho_{vatten} g \frac{\pi d_{bubbla}^3}{6}$$

$$F_{gravitation} = m_{bubbla} g = \rho_{luft} V_{bubbla} g = \rho_{luft} \frac{\pi d_{bubbla}^3}{6} g$$

$$F_{formmotstånd} = A_p C_D \frac{\rho v_\infty^2}{2} = \frac{\pi d_{bubbla}^2}{4} C_D \frac{\rho_{vatten} v_\infty^2}{2}$$

$$\Rightarrow \quad \frac{\pi d_{bubbla}^3}{6} g(\rho_{vatten} - \rho_{luft}) = \frac{\pi d_{bubbla}^2}{4} C_D \frac{\rho_{vatten} v_\infty^2}{2} \quad \Rightarrow \quad 4 d_{bubbla} g(\rho_{vatten} - \rho_{luft}) = 3 C_D \rho_{vatten} v_\infty^2$$

$$\Rightarrow \quad v_\infty = \sqrt{\frac{4 d_{bubbla} g(\rho_{vatten} - \rho_{luft})}{3 C_D \rho_{vatten}}}$$

C_D är en funktion av Reynoldstalet så iteration med hjälp av Figur 12.4 krävs

$$\mathrm{Re} = \frac{v_\infty d \rho_{vatten}}{\mu_{vatten}}$$

$\rho_{\mathrm{vatten}}(293K) = 998{,}2\ \mathrm{kg/m}^3$

$\mu_{vatten}(293K) = 993 \cdot 10^{-6}\ \mathrm{Pa \cdot s}$

$\rho_{\mathrm{luft}}(293K) = 1{,}2065\ \mathrm{kg/m}^3$

Alla data är från appendix I

Iterera!

Gissa $\mathrm{C_D} = 0{,}5 \quad \Rightarrow \quad \mathrm{v}_\infty = 0{,}28\ \mathrm{m/s} \quad \Rightarrow \quad \mathrm{Re} = 844 \quad \Rightarrow \quad \mathrm{C_D} = 0{,}4$

Gissa $\mathrm{C_D} = 0{,}4 \quad \Rightarrow \quad \mathrm{v}_\infty = 0{,}31\ \mathrm{m/s} \quad \Rightarrow \quad \mathrm{Re} = 944 \quad \Rightarrow \quad \mathrm{C_D} = 0{,}4$

$\Rightarrow$ OK!

Bubblans hastighet är 0,31 m/s. Nu kan vi beräkna tiden.

$$t = \frac{L}{v_\infty} = \frac{1.5}{0.31} = 4.84s$$

Bestäm bubblans mantelarea

$$\mathrm{A} = \pi \mathrm{d}^2 = \pi \cdot 0.003^2 = 2.82 \cdot 10^{-5} m^2$$

Total avgiven mängd

$$\mathrm{n} = \mathrm{N}_{\mathrm{A}} At = 1.029 \cdot 10^{-3} \cdot 2.82 \cdot 10^{-5} \cdot 4.84 = 1.4 \cdot 10^{-7} mol$$