

## TENTAMEN I ENERGITEKNIK OCH MILJÖ (KVM033) 2011-08-17 14.00-18.00 i V-huset.

Tentamen omfattar:

**Avdelning A:** Teori och beskrivande moment  
Inga hjälpmedel

**Avdelning B:** Problem  
Tillåtna hjälpmedel:  
Valfri kalkylator med tömt minne (kontrolleras med stickprov).  
Föreläsningssanteckningar (ä. "Handouts") i Energiteknik,  
kursmaterial i Energiteknik och miljö, Termodynamik och  
Transportprocesser (ej exempelsamlingar), handböcker.

**OBS!** Till tentamen får ej medföras lösta exempel eller lösningsgång (sekvens av information i syfte att kunna klara ett räknetal), som inte ingår i tillåtet kursmaterial. Sådana skall, om de medförs, överlämnas till tjänstgörande tentamensvakter omedelbart efter det att du tagit del av detta papper.

När ekvationer används utan härledningar bör källa anges.

Använda symboler skall definieras om dessa inte är de samma som i kursmaterialet.

För godkänt krävs minst 15 poäng. För betyg 4 krävs minst 20 poäng och för betyg 5 minst 25 poäng.

Lennart Vamling (ankn. 3021) kommer ca kl. 14.30 att vara tillgänglig för frågor i skrivsalen. Ytterligare en gång ca kl 15.30

Lösningar anslås 2011-08-18 på VoM:s anslagstavla. Tentamensresultatet meddelas senast 2011-09-05. Granskning av rättning får ske 2011-09-07 kl 11.45-12.30 samt 2011-09-14 kl 12.30-13.00 i VoM:s bibliotek

**Avdelning A måste lämnas in innan avdelning B (med hjälpmedel) får påbörjas!**

## AVDELNING A

A1.

Vid förbränning bildas oftast  $\text{NO}_x$ .

- Vilken miljöpåverkan har utsläpp av  $\text{NO}_x$ ? (1 p)
- Det finns flera olika bildningsmekanismer för  $\text{NO}_x$ . Redogör för de två viktigaste mekanismerna. (2 p)
- Beskriv minst två åtgärder i själva förbränningsprocessen som kan minska mängden bildat  $\text{NO}_x$ . (2 p)

5 p

A2.

De tre gaser som främst är förknippade med miljöaspekter inom energiområdet är  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_x$  och  $\text{NO}_x$ . Beskriv övergripande för var och en av dessa:

- hur absoluta storleken av utsläppen i Sverige förändrats sedan 1990 (storleksordningar)
- hur fördelningen i utsläpp ser ut mellan olika samhällssektorer i Sverige genom att rangordna sektorerna (den med störst utsläpp först osv.). Med samhällssektor avses sektorerna förbränning inom industrin, transporter, bostäder och service, förbränning i el/gas/värmeverk samt industriprocesser.

5 p

A3.

”Härled” (dvs ställ upp och motivera) ett uttryck för en elmotordriven värmepumps specifika  $\text{CO}_2$ -emissioner, dvs de  $\text{CO}_2$ -emissioner den ger upphov till per enhet levererad nyttig värme! Använd följande beteckningar:

$c_{HP}$  Värmepumpens specifika  $\text{CO}_2$ -emission

$c_{fuel,pp}$   $\text{CO}_2$ -emission per enhet (värmevärde) i (referens)elproduktionen

$\eta_{el,PP}$  Elverkningsgrad i (referens)elproduktionen

$\eta_{distr}$  Verkningsgrad i transmission/distribution av el från produktionen till värmepumpen

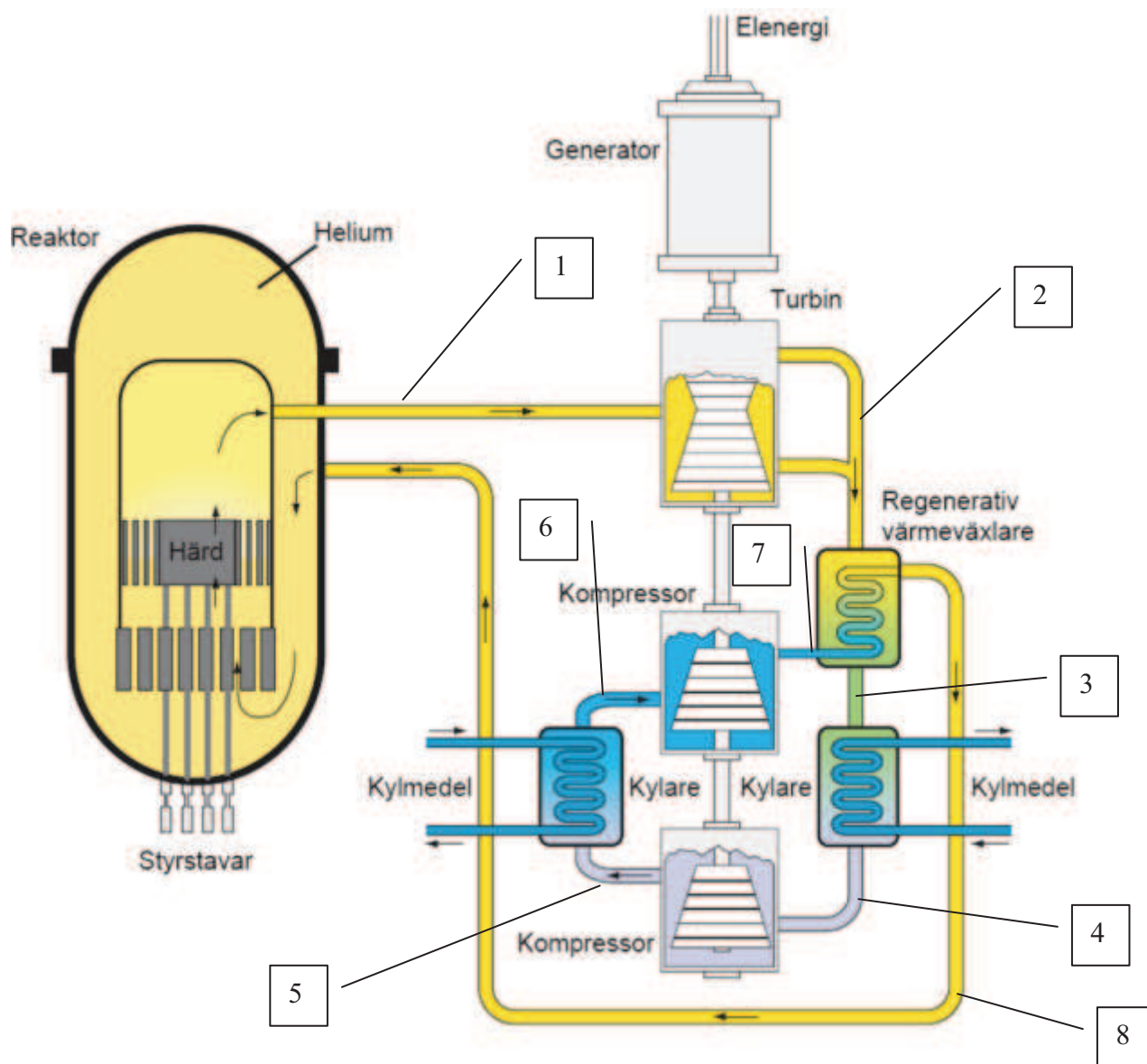
$COP$  Levererat (användbart) värme per tillförd el i värmepumpen

Du får anta att eventuellt bidrag från läckande arbetsmedium är försumbart.

5p

AVDELNING B

B1.



I fjärde generationens kärnreaktorer så är ett alternativ att använda helium som värmeöverförande medium från reaktorhärden och tillverka el mha. gasturbin, se figur. Den här uppgiften går ut på att undersöka vilken elverkningsgrad som kan uppnås.

Givna data:

Tryck

$P_1 = 6,83 \text{ MPa}$ ;  $P_2 = 2,71 \text{ MPa}$ ;  $P_3 = 2,62 \text{ MPa}$ ;  $P_4 = 2,55 \text{ MPa}$ ;  $P_5 = 4,24 \text{ MPa}$ ;  $P_6 = 4,21 \text{ MPa}$ ;  $P_7 = 7,00 \text{ MPa}$ ;  $P_8 = 6,92 \text{ MPa}$

Temperaturer

$T_1 = 900 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $T_4 = T_6 = 35 \text{ }^\circ\text{C}$ ;

Mekaniska/generatorförluster 9 %

isentropverkningsgrader 0,90 (turbin) 0,89 (kompressor)

För helium (som får antas vara en idealgas) i aktuellt temperaturområde (medelvärde – får antas konstant):

$$C_p \quad 5,19 \text{ kJ}/(\text{kg K})$$

$$C_p/C_v \quad 1,66$$

Temperaturskillnaden mellan den varma och den kalla sidan i den regenerativa värmeväxlaren är 23 K. Detta värde är konstant genom värmeväxlaren eftersom både massflöde och  $C_p$  är lika för de båda sidorna.

Beräkna med hjälp av dessa uppgifter anläggningens elverkningsgrad!

5p

B2.

Ett flygplan befinner sig på ca 10 000 m höjd. Trycket i kabinen är 70 kPa och temperaturen 20 °C. Trycket utanför planet är 24 kPa. Genom ett missöde så uppstår ett litet hål med diametern 2,0 cm igenom kabinväggen. Hur stort blir läckaget av luft (i kg/s)

- Initialt
- Om planet dyker till ca 5000 m höjd, där trycket på utsidan är 54 kPa (kabinens tryck och temperatur anses oförändrade)?

5p

B3.

En indunstare har ofta förångning på den ”kalla” sidan och kondensation på den ”varma” sidan. En liten forskningsindunstare består av ett 5 m långt, vertikalt rör, med innerdiametern 50 mm och vägg tjockleken 5 mm (detta är tjockare än normalt). Vid en provkörning görs värmningen med mättad vattenånga som kondenserar på insidan röret. På förångningssidan justeras flödet in så att värmeöverföringstalet blir 8000 W/(m<sup>2</sup> K), och det får antas konstant. Mättnadstemperaturen på förångningssidan är 130 °C och på kondensationssidan är den 140 °C. Värmeledningsförmågan i rörväggen är 16 W/(m K). Hur stor bli den i indunstaren överförda effekten (i kW)

- om värmeöverföringsmotståndet på kondensatsidan antas försumbart (dvs värmeöverföringstalet oändligt stort)? (2 p)
- om värmeöverföringstalet på kondensatsidan uppskattas med hjälp av lämplig korrelation för filmkondensation på vertikal yta. (3 p)

Ledning: Svaret på a) ger en bra grund för att bedöma storleksordningar på förhållandena i b). Om iteration används för lösningen så räcker det att redovisa beräkning av två nya värden för effekten (utöver startgissningen), förutsatt att iterationerna då ser ut att konvergera.

5p

**Lycka till!**

$\text{kJ} := 1000 \cdot \text{J}$        $\text{MJ} := 1000 \cdot \text{kJ}$        $\text{MWh} := \text{MW} \cdot 3600 \cdot \text{s}$

## Lösningförslag till Energiteknik och miljö 2011-08-17

### Uppgift B1

Vi använder figurens beteckningar på strömmar.

$$R_{\text{gas}} := 8.3143 \cdot \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \quad M_{\text{He}} := 4 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{\text{kg}}{\text{mol}}$$

$$T_{\text{refK}} := 273.15$$

#### Givet:

$$\eta_{\text{turbin}} := 0.9$$

$$\eta_{\text{kompressor}} := 0.89$$

$$\eta_{\text{mg}} := 0.91$$

$$T_1 := (T_{\text{refK}} + 900) \cdot \text{K}$$

$$T_4 := (T_{\text{refK}} + 35) \cdot \text{K}$$

$$T_6 := (T_{\text{refK}} + 35) \cdot \text{K}$$

$$P_1 := 6.83 \cdot \text{MPa}$$

$$P_2 := 2.71 \cdot \text{MPa}$$

$$P_4 := 2.55 \cdot \text{MPa}$$

$$P_5 := 4.24 \cdot \text{MPa}$$

$$P_6 := 4.21 \cdot \text{MPa}$$

$$P_7 := 7.00 \cdot \text{MPa}$$

$$C_{p\text{He}} := 5.19 \cdot \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$\kappa := 1.66$$

$\kappa$  används för att beteckna  $C_p/C_v$

Sökt är anläggningens elverkningsgrad, dvs netto levererad el per tillfört värme

Tillfört värme:  $m \cdot C_p \cdot (T_1 - T_8)$

Netto el:  $m \cdot C_p \cdot (T_1 - T_2 - (T_7 - T_6) - (T_5 - T_4))$

Vi behöver därför beräkna dessa temperaturer. Vi börjar med att göra en beräkning av förloppet över turbinen för att få fram  $T_2$ :

Idealt är förloppet isentrop. Utnyttja att  $R/C_p$  även kan uttryckas som  $(\kappa - 1)/\kappa$

$$T_{2\text{is}} := T_1 \cdot \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}} = 812.345 \text{ K}$$

$$T_2 := T_1 + (T_{2\text{is}} - T_1) \cdot \eta_{\text{turbin}} = 848.425 \text{ K}$$

Vi fortsätter nu och beräknar temperaturer kring den regenerativa värmeväxlaren.

Eftersom  $C_p$  är konstant och den regenerativa värmeväxlaren har samma flöde på båda sidor, så är temperaturskillanden genom värmeväxlaren konstant:

$$\Delta T_{\text{min\_rvvx}} := 23 \cdot \text{K}$$

$$T_8 := T_2 - \Delta T_{\text{min\_rvvx}} = 825.425 \text{ K}$$

Vi behöver även  $T_7$  för att komma vidare. Den kan vi från kompressorberäkning

$$T_{7\text{is}} := T_6 \cdot \left( \frac{P_7}{P_6} \right)^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}} = 377.187 \text{ K}$$

$$T_7 := T_6 + \frac{(T_{7\text{is}} - T_6)}{\eta_{\text{kompressor}}} = 385.719 \text{ K}$$

$$T_3 := T_7 + \Delta T_{\text{min\_rvvx}} = 408.719 \text{ K}$$

För att få tag på T5 gör vi en beräkning över den andra kompressorn

$$T5_{is} := T4 \cdot \left( \frac{P5}{P4} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = 377.19 \text{ K} \qquad T5 := T4 + \frac{(T5_{is} - T4)}{\eta_{\text{kompressor}}} = 385.723 \text{ K}$$

Vi har nu fått tag på alla temperaturer och kan då beräkna den sökta elverkningsgraden

$$\eta_{el} := \frac{[T1 - T2 - (T7 - T6) - (T5 - T4)] \cdot \eta_{mg}}{T1 - T8} = 0.444$$

**Svar: Elverkningsgraden är ca 44 %**

## Uppgift B2

Hålet genom kabinväggen kan approximeras med ett enkelt munstycke

**Givet**

$$P0 := 70 \cdot \text{kPa} \quad P10000 := 24 \cdot \text{kPa} \quad P5000 := 54 \cdot \text{kPa}$$

$$T0 := (20 + 273.15) \cdot \text{K} = 293.15 \text{ K}$$

Hålets tvärsnittsarea:

$$A := \pi \cdot \left( \frac{2 \cdot \text{cm}}{2} \right)^2 = 3.142 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

Vi kontrollerar först om vi har kritisk strömning. För det behöver vi  $\kappa = C_p/C_v$ .

För luft gäller

$$\text{Molw} := 29 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{\text{kg}}{\text{mol}}$$

$$\kappa := 1.4 \quad \text{Ekv 16.38 (eller tabell 16.1) ger gränsen för när vi får krietisk strömning}$$

$$P_{\text{krit\_kvot}} := \left( \frac{2}{\kappa + 1} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} = 0.528$$

Vi har för våra fall kvoterna

$$\frac{P10000}{P0} = 0.343 \qquad \frac{P5000}{P0} = 0.771$$

Detta gör att vi i det första fallet har kritisk strömning, medan vi inte når upp till det i andra fallet.

I fall a har vi alltså machtalet  $Ma := 1$

I fall b kan det t.ex. erhållas ur ekv 16.35 (omstuvad) eller genom interpolation i tabell A.12

$$M_b := \sqrt{\frac{\left(\frac{P_0}{P_{5000}}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1}{\left(\frac{\kappa-1}{2}\right)}} = 0.62$$

Massflödet kan t.ex beräknas som massflöde= $\rho Av$ , vilket gör att vi behöver få fram  $v$   
För att få  $v$  från  $M$  så behöver vi ljudhastigheten. För den gäller

$$c(T) := \sqrt{\kappa \cdot \frac{R_{\text{gas}} \cdot T}{M_{\text{olw}}}}$$

Temperaturer får vi ur 16.34  $T(M) := \frac{T_0}{1 + \frac{\kappa-1}{2} \cdot M^2}$   $T(M_a) = 244.292 \text{ K}$   
 $T(M_b) = 272.2 \text{ K}$

Alternativt kan dessa fås ur  $T/T_0$  i t.ex. tabell A12  $\frac{T(M_a)}{T_0} = 0.833$

Densiteter fås ur 16.36 (eller från  $\rho/\rho_0$  i tabell), men för den behöver vi  $\rho_0$

$$\rho_0 := \frac{M_{\text{olw}} \cdot P_0}{R_{\text{gas}} \cdot T_0} = 0.833 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \rho(M) := \frac{\rho_0}{\left(1 + \frac{\kappa-1}{2} \cdot M^2\right)^{\frac{1}{\kappa-1}}}$$

$$\rho(M_a) = 0.528 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \rho(M_b) = 0.692 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Vi kan nu beräkna sökta hastigheter och massflöden

$$v(M) := M \cdot c(T(M)) \quad v(M_a) = 313.135 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad v(M_b) = 205.046 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$m_a := \rho(M_a) \cdot A \cdot v(M_a) = 0.052 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad m_b := \rho(M_b) \cdot A \cdot v(M_b) = 0.045 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Alternativt kan ekvation 16.41 användas "direkt"

$$\text{massfl}(M) := \frac{A \cdot P_0}{\sqrt{T_0}} \cdot \sqrt{\frac{\kappa \cdot M_{\text{olw}}}{R_{\text{gas}}}} \cdot \frac{M}{\left(1 + \frac{\kappa-1}{2} \cdot M^2\right)^{\frac{\kappa+1}{2 \cdot (\kappa-1)}}$$

$$\text{massfl}_a := \text{massfl}(M_a) = 0.052 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad \text{massfl}_b := \text{massfl}(M_b) = 0.045 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

**Svar: Utströmingshastigheterna blir a) 0,052 kg/s b) 0,045 kg/s**

## Uppgift B3

### Givet

$$L := 5 \cdot \text{m} \quad d_i := 50 \cdot \text{mm} \quad \delta w := 5 \cdot \text{mm} \quad d_o := d_i + 2 \cdot \delta w = 60 \cdot \text{mm}$$

$$A_i := L \cdot d_i \cdot \pi = 0.785 \text{ m}^2 \quad A_o := L \cdot d_o \cdot \pi = 0.942 \text{ m}^2$$

$$h_o := 8000 \cdot \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \quad k := 16 \cdot \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$

$$t_{\text{osat}} := (120 + 273.15) \cdot \text{K}$$

$$t_{\text{isat}} := (130 + 273.15) \cdot \text{K}$$

a) Vad blir överförd effekt om vi antar att vi har "oändligt" stor värmeöverföring på kondensatsidan, dvs  $1/h_i=0$ ?

Vi kan då direkt med givna uppgifter beräkna U (WWWR ekv 15-18)!

$$U_{\text{ia}} := \frac{1}{0 + \frac{A_i}{A_o \cdot h_o} + \frac{A_i}{2 \cdot \pi \cdot k \cdot L} \cdot \ln\left(\frac{d_o}{d_i}\right)} = 2.57 \times 10^3 \cdot \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

Kondensation och förångning sker (för rent ämne) vid konstant temperatur - vilket ger

$$Q_a := U_{\text{ia}} \cdot A_i \cdot (t_{\text{isat}} - t_{\text{osat}}) = 20.188 \cdot \text{kW}$$

b)

Sökt är överförd effekt när vi tar med kondenseringen i beräkningen. För att beräkna den behövs U och för att beräkna U så behövs värmeöverföringstalet för kondensation. Det är i sin tur beroende av Re som beror av kondensatflödet (som beror av överförd effekt).

Vi väljer därför följande beräkningsgång:

- 1) Gissa överförd effekt
- 2) beräkna kondenseringsflöde
- 3) beräkna Re
- 4) beräkna  $h_i$
- 5) beräkna U
- 6) beräkna effekt
- 7) åter till 2 - iterera till konvergens

Vi kan använda resultatet från a) som utgångspunkt - högre blir inte effekten

$$Q_{\text{giss}} := Q_a$$

$$\Delta H_{\text{vap130}} := 2173.7 \cdot \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad m_{\text{kond}} := \frac{Q_{\text{giss}}}{\Delta H_{\text{vap130}}} = 9.287 \times 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$\mu_{\text{w130}} := \frac{232 + 196}{2} \cdot 10^{-6} \cdot \text{Pa} \cdot \text{s} = 2.14 \times 10^{-4} \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}} \quad \Gamma := \frac{m_{\text{kond}}}{\pi \cdot d_i} = 0.059 \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}}$$

$$Re := \frac{4 \cdot \Gamma}{\mu_{\text{w130}}} = 1.105 \times 10^3 \quad kw_{130} := \frac{(0.685 + 0.684)}{2} \cdot \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \quad \rho_{\text{w130}} := \frac{943.5 + 926.3}{2} \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Eftersom  $Re < 2000$  så gäller ekv 21-22



$$h_i := 1.51 \cdot \left( \frac{kw_{130}^3 \cdot \rho_{w130}^2 \cdot g}{\mu_{w130}^2} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot Re^{-\frac{1}{3}} = 5.719 \times 10^3 \cdot \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

$$U_i := \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{A_i}{A_o \cdot h_o} + \frac{A_i}{2 \cdot \pi \cdot k \cdot L} \cdot \ln\left(\frac{d_o}{d_i}\right)} = 1.773 \times 10^3 \cdot \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

$$Q := U_i \cdot A_i \cdot (t_{isat} - t_{osat}) = 13.928 \cdot kW$$

$$\underline{Q_{giss}} := Q \quad \underline{m_{kond}} := \frac{Q_{giss}}{\Delta H_{vap130}} = 6.407 \times 10^{-3} \frac{kg}{s}$$

$$\underline{\Gamma} := \frac{m_{kond}}{\pi \cdot d_i} = 0.041 \frac{kg}{m \cdot s} \quad \underline{Re} := \frac{4 \cdot \Gamma}{\mu_{w130}} = 762.437$$

$$\underline{h_i} := 1.51 \cdot \left( \frac{kw_{130}^3 \cdot \rho_{w130}^2 \cdot g}{\mu_{w130}^2} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot Re^{-\frac{1}{3}} = 6.472 \times 10^3 \cdot \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

$$\underline{U_i} := \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{A_i}{A_o \cdot h_o} + \frac{A_i}{2 \cdot \pi \cdot k \cdot L} \cdot \ln\left(\frac{d_o}{d_i}\right)} = 1.84 \times 10^3 \cdot \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

$$\underline{Q} := U_i \cdot A_i \cdot (t_{isat} - t_{osat}) \quad Q = 14.449 \cdot kW$$

$$\underline{Q_{giss}} := Q \quad \underline{m_{kond}} := \frac{Q_{giss}}{\Delta H_{vap130}} = 6.647 \times 10^{-3} \frac{kg}{s}$$

$$\underline{\Gamma} := \frac{m_{kond}}{\pi \cdot d_i} = 0.042 \frac{kg}{m \cdot s} \quad \underline{Re} := \frac{4 \cdot \Gamma}{\mu_{w130}} = 790.985$$

$$\underline{h_i} := 1.51 \cdot \left( \frac{kw_{130}^3 \cdot \rho_{w130}^2 \cdot g}{\mu_{w130}^2} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot Re^{-\frac{1}{3}} = 6.393 \times 10^3 \cdot \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

$$\underline{U_i} := \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{A_i}{A_o \cdot h_o} + \frac{A_i}{2 \cdot \pi \cdot k \cdot L} \cdot \ln\left(\frac{d_o}{d_i}\right)} = 1.833 \times 10^3 \cdot \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

$$\underline{Q} := U_i \cdot A_i \cdot (t_{isat} - t_{osat}) \quad Q = 14.399 \cdot kW$$

**Svar: a) 20.1 kW överföres i indunstaren b) 14.4 kW överföres i indunstaren**