

## **TENTAMEN I ENERGITEKNIK OCH MILJÖ (KVM034 och KVM033) 2012-08-22 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).  
Föreläsninganteckningar (även "Handouts") i Energiteknik och miljö, 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.

Karin Pettersson (ankn. 8532) kommer ca kl. 14.30 att vara tillgänglig för frågor i skrivsalen. Ytterligare en gång ca kl 16.00.

Lösningar läggs ut på kurshemsidan 2012-08-23. Tentamensresultatet meddelas via LADOK senast 2012-09-12. Granskning av rättning får ske 2012-09-14 kl. 12.30-13.00 eller 2012-09-17 kl. 12.30-13.00 i VoM:s bibliotek.

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

## AVDELNING A

A1.

a) Rita en schematisk figur över en ångpanna som producerar överhettad ånga med trycket 60 bar och temperaturen 485°C. Ångpannan är uppbyggd så att väggarna i eldstaden är klädda med kokartuber. Konvektionsvärmeytorna utgörs av en överhettare och en ekonomizer. Matarvattnet har en temperatur på 130°C och vattnet från ekonomizern till domen har en temperatur på 220°C. Temperaturen på rökgaserna in till överhettaren är 900°C och skortenstemperaturen är 150°C. Mättnadstemperaturen vid 60 bar är 275,6°C. Ange tydligt namnet på varje utritad del. Numrera också varje utritad ström och ange om det är vatten, ånga eller rökgaser samt om så är känt vilken temperatur och tryck strömmen har. För vattnet/ångan ska även tillståndet anges, dvs om det är mättat, underkyllt eller överhettat.

b) Rita ett principiellt diagram över rökgastemperaturen och vatten/ångtemperaturen som funktion av överförd värme för den i a) givna ångpannan. Rita ut givna temperaturer.

(5p)

A2.

Vid förbränning bildas svaveldioxid som bidrar till försurning av skog, mark och vatten.

a) Svavelinnehållet i ett bränsle påverkar hur mycket svaveldioxid som bildas vid förbränning av bränslet. Ge exempel på två bränslen med relativt högt svavelinnehåll och ett med relativt lågt. (1p)

b) Beskriv, med principfigur inkluderande flöden/enheter, en metod att i själva förbränningssteget reducera SO<sub>x</sub>-utsläpp. (2p)

c) Rökgasavsvavlingsanläggningar är antingen icke regenerativa eller regenerativa. Förklara skillnaden mellan dessa begrepp. Beskriv, med principfigur, en regenerativ process. (2p)

(5p)

A3.

Vattenånga har i termiska maskiner använts under drygt två århundraden för att utvinna mekanisk energi ur en värmekälla.

a) För ca hundra år sedan förekom två typer av energimaskiner lika ofta, ibland samtidigt, för detta ändamål. Vilka typer? Varför samtidigt ibland?

b) Vilken är den principiella skillnaden mellan energimaskinerna ovan?

c) Den modernare varianten av maskin indelas efter hur tryckförloppet inuti maskinen gestaltar sig. Vilken är indelningen? En storhet kan användas som kriterium för denna indelning. Vilken? Hur definieras den i ord?

(5p)

## AVDELNING B

B1.

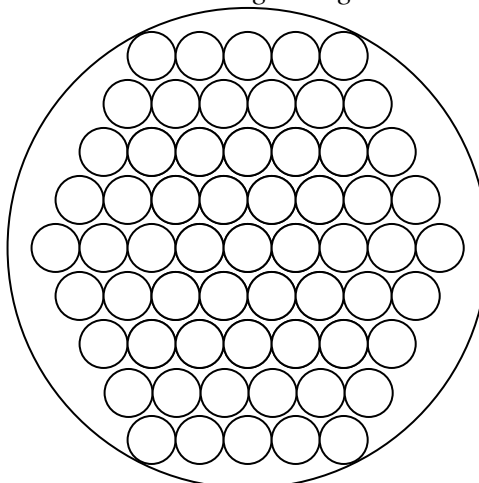
En industriprocess har ett värmehov på 67 MW. För att tillfredsställa värmebehovet används en mottrycksanläggning där ånga av 80 bar, 490°C produceras för expansion till 4 bar. Tryckfallet över processerna är 2 bar och kondensatet som återsamlas är i genomsnitt 3°C underkyllt. I den naturgaseldade pannan är förbränningsverkningsgraden 99%. Av den vid förbränningen frigjorda bränsleenergin så utgör värmeläckaget till omgivningen 3% och avgasförlusterna är 5%. Beräkna kraftvärmeanläggningens totalverkningsgrad. Turbinens isentropverkningsgrad är 87% och mekaniska friktions- och generatorverkningsgraden är 97%. Entalpiändringen över matarvattenpumpen kan försummas.

(5p)

B2.

Du vill undersöka om en befintlig tubvärmväxlare kan fungera att använda som spädvattenvärmare i massafabrik. Spädvattnet tillförs matarvattentanken för att kompensera för kondensatförluster. Spädvattnet skall värmas från 45°C till 80°C. Spädvattenflödet är 35.2 ton/h och trycket är 2 bar. Detta skall värmas med ett smutsigt kondensat med trycket 3 bar, temperaturen 120°C och flödet 25.2 ton/h. Den befintliga värmväxlaren har en passage och består av 61 tuber av kolstål enligt nedan. Innerdiametern på tuberna är 11 mm och godstjockleken är 2 mm. Längden på tuberna är 3.6 m och baffelavståndet är 25.5 cm. Tuberna är ordnade i sicksack-ställning där avståndet från centrum i en tub till centrum i nästa tub är  $1.33 \times$  tubytterdiametern. Det smutsiga kondensatet skall gå i tuberna eftersom tuberna är lättare att rengöra. Dessutom håller kondensatet ett högre tryck vilket gör att det är mer fördelaktigt att låta kondensatet gå i tuberna. Ämnesdata kan tas vid medeltemperaturen mellan de två inloppstemperaturerna. Ämnesdata för underkyllt vatten är vid måttliga tryck och temperaturer starkt temperaturberoende men svagt tryckberoende. Därför kan ämnesdata tas för underkyllt vatten vid 1 bar vilket finns tabellerat. Man kan anta att  $(\mu_w/\mu_b)^{-0.14} = 1$  för lågviskösa vätskor som vatten vid måttliga tryck. Kommer denna värmväxlare räcka till för att värma spädvattnet? Värmeöverföringskoefficienten på insidan tuberna är 8211 W/(m<sup>2</sup>°C).

*Tubarrangemang:*



(5p)

B3.

Uppvärmningen av en husvagn kan ske med ett vattenburet system. Ett kopparrör med diametern 20/24 mm dras i flera slingor runt husvagnens innerväggar. Kopparröret är fäst i väggen med hjälp av konsoler, av försumbar storlek, så att röret sitter horisontellt en bit ut från väggen. Det cirkulerande vattnet drivs av en pump med kapaciteten  $0,1 \text{ m}^3/\text{h}$  och återvärms i en gasolkamin till  $80^\circ\text{C}$ . Beräkna nödvändig längd på kopparröret för att ett värmebehov av  $1,4 \text{ kW}$ , utöver vad kaminen själv utstrålar, skall tillgodoses. Rums- och väggtemperaturen är  $20^\circ\text{C}$  och anta att egenkonvektionens  $h$ -värde är  $7,1 \text{ W}/(\text{m}^2\text{C})$ . Antag att kopparen är oxiderad och har en emissivitet av  $0,70$ . Antag att kopparrörets längd är så begränsad att värmeytan är försumbart liten i förhållande till husvagnens inre väggyta.

(5p)

**Lycka till!**

B1.

En industriprocess har ett värmehov på 67 MW. För att tillfredsställa värmebehovet används en mottrycksanläggning där ånga av 80 bar, 490°C produceras för expansion till 4 bar. Tryckfallet över processerna är 2 bar och kondensatet som återsamlas är i genomsnitt 3°C underkyllt. I den naturgaseldade pannan är förbränningsverkningsgraden 99%. Av den vid förbränningen frigjorda bränsleenergin så utgör värmeläcket till omgivningen 3% och avgasförlusterna är 5%. Beräkna kraftvärmeanläggningens totalverkningsgrad. Turbinens isentropverkningsgrad är 87% och mekaniska friktions- och generatorverkningsgraden är 97%. Entalpiändringen över matarvattenpumpen kan försummas.

(5p)

**Givet:**

$$p_{ht} = 80 \text{ bar}; T_{ht} = 490^{\circ}\text{C}$$

$$p_{et} = 4 \text{ bar}$$

$$p_{kond} = 2 \text{ bar}; T_{kond} = T(2 \text{ bar}) - 3^{\circ}\text{C}$$

$$\eta_{T,is} = 0,87$$

$$\eta_{m+g} = 0,97$$

$$\eta_{förbr} = 0,99$$

$$\text{Omgivningsförluster} = 3\%$$

$$\text{Avgasförluster} = 5\%$$

**Sökt:**  $\eta_{tot}$ ?

**Lösning:**

$$\eta_{tot} = (Q_{process} + Q_{el}) / Q_{bränsle}$$

**Producerad el:**

$$Q_{el} = m_{\dot{a}} * (h_{ht} - h_{et}) * \eta_{m+g}$$

$$h_{ht} = h(80\text{bar}; 490^{\circ}\text{C}) = 3374,5 \text{ kJ/kg DoD s.53}$$

$$\eta_{T,is} = (h_{et} - h_{ht}) / (h_{et,is} - h_{ht}) \rightarrow h_{et} = \eta_{T,is} * (h_{et,is} - h_{ht}) + h_{ht}$$

$$h_{\text{et, is}} = h(4\text{bar}; 6,69 \text{ kJ/kgK}) = 2652,45 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{\text{et}} = 0,87 * (2652,45 \text{ kJ/kg} - 3374,5 \text{ kJ/kg}) + 3374,5 \text{ kJ/kg} = 2746,36 \text{ kJ/kg}$$

$$Q_{\text{el}} = m_{\dot{a}} * 628,14 * 0,97$$

Mängden ånga:

$$Q_{\text{process}} = m_{\dot{a}} * (h_{\text{et}} - h_{\text{kond}}) \rightarrow m_{\dot{a}} = Q_{\text{process}} / (h_{\text{et}} - h_{\text{kond}}) = 67000 \text{ kW} / (2746,36 \text{ kJ/kg} - 491,9 \text{ kJ/kg}) = 29,72 \text{ kg/s}$$

$$h_{\text{kond}} = h(2\text{bar}; 117,23^{\circ}\text{C}) = 492,2 \text{ kJ/kg} \text{ underkyld vätska DoD s.40}$$

$$\rightarrow Q_{\text{el}} = 18110 \text{ kW}$$

Överförd effekt i brännkammaren:

$$Q_{\dot{a}} = m_{\dot{a}} * (h_{\text{ht}} - h_{\text{kond}}) = 29,72 * (3374,5 \text{ kJ/kg} - 491,9 \text{ kJ/kg}) = 85670 \text{ kW}$$

$$Q_{\text{frigjort bränsleenergi}} = Q_{\dot{a}} / (1 - 0,03 - 0,05) = 93119 \text{ kW}$$

$$Q_{\text{bränsle}} = Q_{\text{frigjort bränsleenergi}} / \eta_{\text{förbr}} = 94060 \text{ kW}$$

Totalverkningsgrad:

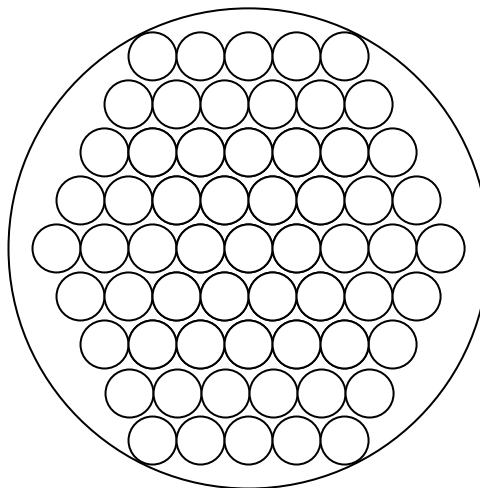
$$\eta_{\text{tot}} = (18110 \text{ kW} + 67000 \text{ kW}) / 94060 \text{ kW} = 0,905$$

Svar: Kraftvärmeanläggningen har en totalverkningsgrad på 91%.

B2.

Du vill undersöka om en befintlig tubvärmväxlare kan fungera att använda som spädvattenvärmare i massafabrik. Spädvattnet tillförs matarvattentanken för att kompensera för kondensatförluster. Spädvattnet skall värmas från 45°C till 80°C. Spädvattenflödet är 35.2 ton/h och trycket är 2 bar. Detta skall värmas med ett smutsigt kondensat med trycket 3 bar, temperaturen 120°C och flödet 25.2 ton/h. Den befintliga värmväxlaren har en passage och består av 61 tuber av kolstål enligt nedan. Innerdiametern på tuberna är 11 mm och godstjockleken är 2 mm. Längden på tuberna är 3.6 m och baffelavståndet är 25.5 cm. Tuberna är ordnade i sicksack-ställning där avståndet från centrum i en tub till centrum i nästa tub är  $1.33 \times$  tubytterdiametern. Det smutsiga kondensatet skall gå i tuberna eftersom tuberna är lättare att rengöra. Dessutom håller kondensatet ett högre tryck vilket gör att det är mer fördelaktigt att låta kondensatet gå i tuberna. Ämnesdata kan tas vid medeltemperaturen mellan de två inloppstemperaturerna. Ämnesdata för underkyllt vatten är vid måttliga tryck och temperaturer starkt temperaturberoende men svagt tryckberoende. Därför kan ämnesdata tas för underkyllt vatten vid 1 bar vilket finns tabellerat. Man kan anta att  $(\mu_w/\mu_b)^{-0.14} = 1$  för lågvätskor som vatten vid måttliga tryck. Kommer denna värmväxlare räcka till för att värma spädvattnet? Värmeöverföringskoefficienten på insidan tuberna är 8211 W/m<sup>2</sup>°C.

*Tubarrangemang:*



(5p)

**Indata:**

**Tubsidan:** Smutsigt kondensat,  $T_{i,in} = 120^\circ\text{C}$   $T_{i,ut} = ?$   $\dot{m}_i = 25.5 \text{ t/h}$   $h_i = 8211 \text{ W/m}^2\text{°C}$

**Mantelsidan:** Spädvatten,  $T_{o,in} = 45^\circ\text{C}$   $T_{o,ut,mål} = 80^\circ\text{C}$   $\dot{m}_o = 35.2 \text{ t/h}$

**Värmväxlarens design:** kolstål, sick-sack-ställning,  $L_{bc} = 25.5 \times 10^{-2} \text{ m}$  ,  $L = 3.6 \text{ m}$  ,  
 $L_{tp} = 1.33 d_o$  ,  $N = M = 9$  ,  $n = 61$  ,  $d_i = 11 \times 10^{-3} \text{ m}$  ,  $\delta = 2 \times 10^{-3} \text{ m}$

**Strategi:**

Ta reda på krävt UA och jämför det med verkligt UA. Alla ämnesdata tas vid medeltemperaturen mellan de två inloppstemperaturerna och de hämtas från DoD s.76.

**Krävt UA:**

Effekten som krävs för att värma upp hela spädvattenflödet från  $T_{o,in}$  till  $T_{o,ut}$  är:

$$Q_{krav} = \dot{m}_o c_{p_o} \Delta T_o = 35,2 * \frac{10^3}{3600} * 4195 * (80 - 45) = 1,436 \text{ MW}$$

Krävt UA beräknas enligt (se "Värmetransport"):

$$UA_{krav} = Q_{krav} / \Delta T_{lm}$$

För att räkna ut  $\Delta T_{lm}$ , behöver man veta  $T_{i,ut}$ . Man får fram  $T_{i,ut}$  genom att göra en energibalans för det smutsiga kondensatet  $Q_{krav} = \dot{m}_i c_{p_i} \Delta T_i$ , vilket ger  $T_{i,ut} = 71,1^\circ\text{C}$ . Vilket ger  $\Delta T_{lm} = 32,56^\circ\text{C}$  och  $UA_{krav} = 44,1 \text{ kW}/^\circ\text{C}$ .

### Verkligt UA:

Verkligt UA kan beräknas enligt:

$$\frac{1}{UA} = \frac{1}{A_i h_i} + \frac{\delta}{A_m k} + \frac{1}{A_o h_o}$$

Värmeöverföringskoefficienten på insidan tuberna,  $h_i$ , är given till  $8211 \text{ W}/\text{m}^2\text{C}$ .

$A_i = 7.589 \text{ m}^2$ ,  $A_o = 10.483 \text{ m}^2$ ,  $A_m = 8.897 \text{ m}^2$  kan beräknas med hjälp av givna data.  $k$  är värmekonduktiviteten för kolstål, vilken är  $45 \text{ W}/\text{m}^\circ\text{C}$  (DoD s.72).

För att räkna ut värmeöverföringskoefficienten på mantelsidan använder man korrelationer från kurskompendiets del "Tryckfall och värmeöverföring i värmeväxlare".  $h_o$  är en funktion av den teoretiska tvärsnittarean i minsta sektionen för en tubrad  $A_q$ , j-faktorn, och fluidens egenskaper.

$A_q$  räknas ut från ekvation (4):

$$A_q = (M + 1) * L_{ti} * (L_{tp} - D_t) = (9 + 1) * 25,5 * 10^{-2} * (1,33 * 15 * 10^{-3} - 15 * 10^{-3}) = 0,0126 \text{ m}^2$$

j-faktorn tas fram ur Figur 5 och är en funktion av  $Re$  och  $\frac{L_{tp}}{D_t}$ .  $Re$  kan räknas ut från ekvation (3):

$$Re = \frac{\dot{m} * D_t}{A_q * \rho * v} = \frac{32,2 * \frac{10^3}{3600} * 15 * 10^{-3}}{0,0126 * 970,175 * 0,35725 * 10^{-6}} = 33525$$

Därefter kan man läsa av  $j = 0.0057$

Därefter kan värmeöverföringskoefficienten beräknas enligt ekvation (2):

$$h_o = \frac{j * c_p * \dot{m}}{A_q * Pr^{\frac{2}{3}} * \left(\frac{\mu_w}{\mu_b}\right)^{-0,14}} = \frac{0,0057 * 4195 * 35,2 * \frac{10^3}{3600}}{0,0126 * 2,123 * 1} = 11244 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{C}}$$

Nu vet man allt man behöver för att beräkna verkligt UA:

$$UA_{verk} = 33,7 \frac{\text{kW}}{^\circ\text{C}}$$

Det verkliga UA är mindre än det krävda, vilket betyder att värmeväxlaren **inte räcker till** för att värma spädvattnet.



B3.

Uppvärmningen av en husvagn kan ske med ett vattenburet system. Ett kopparrör med diametern 20/24 mm dras i flera slingor runt husvagnens innerväggar. Kopparröret är fäst i väggen med hjälp av konsoler, av försumbar storlek, så att röret sitter horisontellt en bit ut från väggen. Det cirkulerande vattnet drivs av en pump med kapaciteten 0,1 m<sup>3</sup>/h och återvärms i en gasolkamin till 80°C. Beräkna nödvändig längd på kopparröret för att ett värmebehov av 1,4 kW, utöver vad kaminen själv utstrålar, skall tillgodoses. Rums- och väggtemperaturen är 20°C och anta att egenkonvektionens h-värde är 7,1 W/(m<sup>2</sup>°C). Antag att kopparen är oxiderad och har en emissivitet av 0,70. Antag att kopparrörets längd är så begränsad att värmeytan är försumbart liten i förhållande till husvagnens inre väggyta.

(5 p)

**Givet:**

$$q_{tot} = 1,4 \text{ kW}$$

$$T_{rum} = 20^\circ\text{C} = 293,15 \text{ K}$$

$$T_{H_2O, start} = 80^\circ\text{C} = 353,15 \text{ K}$$

$$\dot{v}_{H_2O} = 0,1 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$h_{konv} = 7,1 \text{ W}/\text{m}^2\text{C}$$

$$\varepsilon_{Cu} = 0,7$$

$$d_o = 24 \text{ mm}$$

$$d_i = 20 \text{ mm}$$

**Sökt:**

Nödvändig längd, L, på kopparröret för att tillfredsställa värmebehovet,  $q_{tot}$ .

**Lösning:**

Värmeöverföring från kopparröret dels genom konvektion,  $q_{konv}$ , och dels genom strålning,  $q_{strål}$ .

Använd följande samband för att beräkna överfört värme genom konvektion:

$$q_{konv} = h_{konv} \times A \times (T_{rum} - T_{Cu, utsida})$$

Eftersom arean på röret ej är känd, utan ska bestämmas, beräknas värmeöverföringen per areaenhet,  $q_{konv}/A$ .

$T_{Cu, utsida} = T_{H_2O}$  eftersom koppar är en mycket bra ledare av värme. Eftersom temperaturen på vattnet ändras längs röret, ändras ju också temperaturen på kopparröret. Beräknar därför hur mycket vattnets temperatur, och därmed kopparens temperatur, minskar längs röret för att kunna beräkna ett medelvärde på  $q_{konv}/A$ .

$$q_{tot} = \dot{m}_{H_2O} \times c_{p, H_2O} \times \Delta T_{H_2O} = \dot{v}_{H_2O} \times \rho_{H_2O} \times c_{p, H_2O} \times \Delta T_{H_2O}$$

Gissar att temperaturen sjunker ca 10°C, vilket betyder att ämnesdata för vatten ska tas vid ca 75°C.

$$\rho_{H_2O}(75^\circ\text{C}) = 974,8 \text{ kg}/\text{m}^3 \quad \text{D\&D s.76}$$

$$c_{p, H_2O}(75^\circ\text{C}) = 4189,5 \text{ J}/\text{kg}^\circ\text{C} \quad \text{D\&D s.76}$$

$$\Rightarrow \Delta T_{H_2O} = \frac{1,4 \times 10^3}{\frac{0,1}{3600} \times 974,8 \times 4189,5} = 12,3^\circ C \Rightarrow T_{H_2O, slut} = 67,7^\circ C$$

$\Rightarrow T_{H_2O, medel} \approx 74^\circ$  Ämnesdata tagna vid  $75^\circ C$ , så OK!

$$\Rightarrow \frac{q_{konv}}{A} = 7,1 \times (80 - 20) = 426 \frac{W}{m^2} \text{ vid början av röret}$$

$$\Rightarrow \frac{q_{konv}}{A} = 7,1 \times (67,7 - 20) = 338,7 \frac{W}{m^2} \text{ vid slutet av röret}$$

$$\Rightarrow \frac{q_{konv}}{A} = 382,3 \frac{W}{m^2} \text{ som medelvärde}$$

För att beräkna  $q_{strål}$  används ekvation 23-36 i WWW:

$$q_{strål} = \frac{A \times \varepsilon_{Cu}}{\rho_{Cu}} \times (E_{b,Cu} - J_{Cu})$$

Precis som för konvektionsbidraget beräknas värmeöverföringen per areaenhet,  $q_{strål}/A$ .

$$\rho_{Cu} = 1 - \varepsilon_{Cu} = 1 - 0,3 = 0,7 \text{ från ekv. 23-1 i WWW}$$

$$E_{b,Cu} = \sigma \times T_{Cu, utsida}^4 \text{ ekv. 23-12 i WWW}$$

$$\sigma = 5,676 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4} \text{ Stefan - Boltzmanns konstant}$$

$E_{b,Cu}$  kommer alltså att ändras längs med röret.

Bestämning av  $J_{Cu}$ , använd ekv. 23-38 i WWW eftersom temperaturerna är kända:

$$(1 - F_{ii} + \frac{\varepsilon_i}{\rho_i}) \times J_i - \sum_{j=1}^n F_{ij} \times J_j = \frac{\varepsilon_i}{\rho_i} \times E_{bi}$$

Koppar - 1 och rummet - 2

$$\left(1 - F_{11} + \frac{\varepsilon_1}{\rho_1}\right) \times J_1 - F_{12} \times J_2 = \frac{\varepsilon_1}{\rho_1} \times E_{b1} \quad (1)$$

$$\left(1 - F_{22} + \frac{\varepsilon_2}{\rho_2}\right) \times J_2 - F_{21} \times J_1 = \frac{\varepsilon_2}{\rho_2} \times E_{b2} \quad (2)$$

Bestämning av siktfaktorerna:

$F_{11} = 0$  kopparröret ser inte sig själv (mer än ytterst marginellt)

$F_{12} = 1$  kopparröret ser rummet

$$F_{21} = \frac{A_1 \times F_{12}}{A_2} \text{ ekv. 23 - 17 i WWW}$$

eftersom  $A_2 \gg A_1 \Rightarrow F_{21} \approx 0 \Rightarrow F_{22} \approx 1$

Insättning i (2)  $\Rightarrow \frac{\varepsilon_2}{\rho_2} \times J_2 = \frac{\varepsilon_2}{\rho_2} \times E_{b2} \Rightarrow J_2 = E_{b2}$

Insättning i (1) och ytbrytning av  $J_1$  ger:

$$J_1 = \frac{\frac{\varepsilon_1}{\rho_1} \times \sigma \times T_1^4 + F_{12} \times \sigma \times T_2^4}{1 + \frac{\varepsilon_1}{\rho_1}} \Rightarrow$$

$$J_1 = J_{Cu} = 743,7 \text{ då } T_1 = T_{Cu,utsida} = 80^\circ\text{C} = 353,15 \text{ K}$$

$$J_1 = J_{Cu} = 662,0 \text{ då } T_1 = T_{Cu,utsida} = 67,7^\circ\text{C} = 340,85 \text{ K}$$

$\Rightarrow$

$$\frac{q_{strål}}{A} = \frac{\varepsilon_{Cu}}{\rho_{Cu}} \times (\sigma \times T_{Cu,utsida}^4 - J_{Cu}) = 324,6 \text{ då } T_{Cu,utsida} = 80^\circ\text{C} = 353,15 \text{ K}$$

$$\frac{q_{strål}}{A} = 242,9 \frac{W}{m^2} \text{ då } T_{Cu,utsida} = 67,7^\circ\text{C} = 340,85 \text{ K}$$

$$\frac{q_{strål}}{A} = 283,7 \frac{W}{m^2} \text{ som medelvärde}$$

Beräkning av arean och längden på kopparröret:

$$q_{tot} = A \times \left( \frac{q_{konv}}{A} + \frac{q_{strål}}{A} \right) \Rightarrow A = \frac{1,4 \times 10^3}{382,3 + 283,7} = 2,102 \text{ m}^2$$

$$A = d_o \times \pi \times L \Rightarrow L = \frac{2,102}{3,1415 \times 24 \times 10^{-3}} = 27,9 \text{ m}$$

Svar: Kopparröret måste vara minst 27,9 m för att tillgodose värmebehovet i husvagnen.