

The Norwegian University of Science and Technology  
Department of physics

ENGLISH + NORWEGIAN  
*Norsk oversettelse av oppgavene på s 6-7*

Contact person:

Name: Turid Worren Reenaas

Tel: 4121 5871

**EXAM IN TFY 4300 Energy and environmental physics**

Friday December 14<sup>th</sup> 2007

Duration: 9-13

Number of pages: 7

Permitted aids: Calculator HP30S, English Dictionary

Physical parameters and lists of equations are given in the appendix. A translation of the problems to Norwegian is found on page 6-7 in the appendix.

You can answer in either Norwegian or English, and you have to answer all questions in all 4 problems. The weight for each problem is given in the parentheses.

**Problem 1. The Greenhouse effect, the carbon cycle and fossil fuels**

- a) (5%) What is the natural greenhouse effect? What gasses contribute the most to the natural greenhouse effect? What would the temperature on the surface of the Earth be if there was no atmosphere?
- b) (5%) Make a schematic drawing of the global carbon cycle. Include the atmosphere, land, fossil fuels, surface layers of the oceans and deep oceans. Indicate in the drawing the order of magnitudes of carbon content in the various parts of the system. Indicate also in what parts of the system the carbon content is increasing and where it is decreasing.
- c) (15%) Describe how fossil fuels are utilized today and explain briefly what the problems related to fossil fuels are. If we use the (global) known reserves of fossil fuels at the same rate as today, how long will they last, approximately?

**Problem 2. Nuclear energy**

- a) (10%) Give an expression for the fission process involving  $^{235}\text{U}$  and a slow neutron, and describe the process briefly. How much energy is released in the process? Where does this energy come from?

- b) (10%) Describe how the number  $\nu$  of fast neutrons from each fission process of  $^{236}\text{U}$  is reduced, and slowed down to the number  $k$  of slow neutrons in a typical fission reactor running on  $^{235}\text{U}$ . Why does the amount of neutrons need to be controlled, and why must the neutrons be slowed down in this reactor?
- c) (5%) What are delayed neutrons? Why are they essential for the safe operation of a nuclear power plant?

### Problem 3. Bioenergy

- a) (10%) What is energy farming? What are the advantages and problems related to energy farming?
- b) (5%) What biofuels (primary and secondary) are used today? Which one of these has the highest energy density (measured in J/kg)?

### Problem 4. Energy supply

In 2008 you get a job in the city council of Madrid, and they want you to evaluate the potential of four different energy sources for electricity production. You can use a (flat) area of maximum  $1\text{km}^2$ .

- a) (5%) The incident solar radiation amounts to  $4497\text{ Wh/m}^2$  per day on average. Assume that you can cover 80% of the area with (horizontal) solar cells with an efficiency of 15%. How much electric energy (measured in TWh and joules) can be produced in one year?
- b) (5%) Alternatively one can grow sunflowers that can be harvested once a year. The energy from the sunflowers amounts to  $29\text{GJ/ha}$  per harvest. How much electric energy (measured in TWh and joules) can you produce in one year if the sunflowers are used to power a steam turbine power plant with a conversion efficiency of 20%?
- c) (5%) A third alternative is to extract heat from the ground, utilizing dry rock fracturing. Drilling 7 km deep one can extract heat amounting to  $294\text{MW/km}^2$ . Assume that the temperature of the water that is pumped from the ground is  $103^\circ\text{C}$ , and that the conversion efficiency of the power plant is 6%. How much electric energy (measured in TWh and joules) can be produced in one year? Assume that the power plant operates 90% of the time.
- d) (5%) One can also install wind turbines with a rotor diameter of 90m that have an efficiency of 55% of the theoretical maximum. Each wind turbine needs an area of  $500\times 500\text{m}^2$ . Assume that the average wind speed in Madrid is  $u=7\text{m/s}$ . As a rule-of-thumb the amount of available wind power is taken to be twice the power available at the average wind speed. Explain why this is the case.

Calculate the amount of electricity (measured in TWh and joules) generated by one turbine, and by the maximum number you can place in the allotted area of  $1\text{km}^2$ . Assume that the generator efficiency is 95%. The density of the air in the Madrid region is on average  $\rho = 1.123\text{kg m}^{-3}$ .

- e) (15%) Make a list of the main advantages and disadvantages for the four proposed energy sources/technologies.

Compare the proposed energy sources, and make a recommendation to the city council what source will have the largest potential for electricity generation and at the same time has “acceptable” disadvantages.

Are the assumptions made for the estimates of the electricity generation reasonable? Why/why not?

Can any of the proposed energy technologies perform better than estimated? If so, how?

**APPENDIX**

## Physical constants

Planck's constant:  $h = 6.626 \times 10^{-34}$  JsThe speed of light:  $c = 2.998 \times 10^8$  m/sBoltzmann's constant:  $k = 1.38 \times 10^{-23}$  J/KStefan-Boltzmann's constant:  $\sigma = 5.672 \times 10^{-8}$  W/(m<sup>2</sup>K<sup>4</sup>)Avogadro's number:  $N_A = 6.022 \times 10^{23}$  mol<sup>-1</sup>The electron charge:  $e = 1.602 \times 10^{-19}$  CThe radius of the sun:  $r_s = 6.96 \times 10^8$  mThe radius of the earth:  $r_e = 6.4 \times 10^6$  mThe sun-earth distance:  $d_{se} = 1.49 \times 10^{11}$  m

## List of equations

$pV = nRT$ $p = \rho R_{air} T$ $\frac{\partial p}{\partial z} = -\frac{\rho}{H}$ $\frac{\partial T}{\partial z} = -\frac{g}{c_p} = -\Gamma_d$  $E = h\nu$ $I_E dE = \frac{2\pi\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{h\nu/kt} - 1} dE$ $I_\lambda = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda kt} - 1}$ $\lambda_{max} T = 2898 [\mu m K]$ $I(T) = \sigma T^4$  $\Delta T_s = G\Delta I$ $G_f = \frac{G}{1 - \sum_n GH_n}$ $\Delta T_s = G_f \Delta I$ $\Delta T_s(t) = (\Delta T_s)_{ss} (1 - e^{-t/\tau})$  $P_T = IV$	$P_{ij} = \frac{\Delta T}{R_{ij}}$ $q = \frac{P}{A} = \frac{\Delta T}{r}$ $r = \frac{1}{h} = RA$  $r_n = \frac{\Delta x}{k}$ $r_v = \frac{X}{\mathcal{N}k}$ $r_r = \frac{(T_1 - T_2)}{q}$ $P_v = A\mathcal{N} \frac{k(T_s - T_f)}{X}$ $\mathcal{R} = \frac{uX}{v}$ $\mathcal{A} = \frac{g\beta X^3 \Delta T}{\kappa v}$  $P_m = \frac{dm}{dt} c(T_3 - T_1)$ $P_m = \frac{dm}{dt} \Lambda$ $-mc \frac{d}{dt} (T_1 - T_0) = \frac{(T_1 - T_0)}{R_{10}}$	$\alpha_\lambda + \rho_\lambda + \tau_\lambda = 1$ $P_r = A\varepsilon\sigma T^4$ $P_{12} = \sigma(T_1^4 - T_2^4) A_1 F_{12}$ $P_{12} = A_1 F'_{12} \sigma(T_1^2 + T_2^2)(T_1 + T_2)(T_1 - T_2)$ $R_r = [A_1 F'_{12} \sigma(T_1^2 + T_2^2)(T_1 + T_2)]^{-1}$  $P_{net} = \tau_{cov} \alpha_p A_p G - \frac{T_p - T_a}{R_L} = \eta_{sp} A_p G$ $P_u = \eta_{pf} P_{net} = \begin{cases} mc \frac{dT_f}{dt} \\ \frac{dm}{dt} c(T_2 - T_1) \end{cases}$ $mc \frac{dT_r}{dt} = \tau\alpha GA + P_{boost} - \frac{(T_r - T_a)}{R}$  $\eta = \frac{W}{Q_H} = 1 - \frac{Q_C}{Q_H}$ $\eta_{Carnot} = 1 - \frac{T_C}{T_H}$ $COP = \frac{Q_C}{W_{in}}$ $B = (U - U_f) + p_o(V - V_f) - T_o(S - S_f)$ $B = Q \left( 1 - \frac{T_0}{T_H} \right)$
---	--	---

$$c = 2c_g = \frac{g}{2\pi} T$$

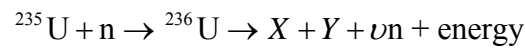
$$E = k_E H^2; \quad k_E = \frac{\rho g}{8}$$

$$J = c_g E$$

$$J = k_J T H^2; \quad k_J = \frac{\rho g^2}{32\pi}$$

$$E = \rho g H^2 / 8$$

$$E = \rho g \int_0^\infty S(f) df \equiv \rho g H_s^2 / 16$$



$$\eta = \nu \frac{N(235)\sigma_f(235)}{N(235)[\sigma_f(235) + \sigma_c(235)] + N(238)\sigma_c(238)}$$

$$\frac{dN}{dt} = \frac{\rho N}{l}$$

$$l^* = (1 - \beta)l + \beta t_d$$



$$P_L = \alpha n^2 \sqrt{kT} + 3n \frac{kT}{\tau_E}$$

$$P_{th} = \langle \sigma u \rangle E \frac{n^2}{4}$$

$$P_T = P_L + P_{th}$$

$$\eta P_T > P_L$$

$$F_g = \frac{Gm_1 m_2}{R_{12}} \quad F_c = mR\omega^2$$

$$\frac{GMM'}{D^2} = ML\omega^2 = M'L'\omega^2$$

$$\frac{\partial^2 z}{\partial t^2} = gh \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} = c^2 \frac{\partial^2 z}{\partial x^2}; \quad c = \sqrt{gh}$$

$$T_r = \frac{\lambda}{c} = \frac{4L}{jc} = \frac{4L}{j\sqrt{gh}}$$

$$\bar{P} = \frac{\rho AR^2}{2} g \cdot \frac{1}{\tau} = \frac{\rho Ag}{2\tau} R^2 \quad \bar{P} \approx \frac{\rho Ag}{2\tau} \left( \frac{R_{\max}^2 + R_{\min}^2}{2} \right)$$

$$q = \frac{P}{A} = \frac{\rho u^3}{2}$$

$$\bar{q} = \eta \frac{\rho u^3}{2} = \eta \frac{\rho u_0^3 \int_{t=0}^{t=\tau/4} \sin^3(2\pi t/\tau) dt}{\int_{t=0}^{t=\tau/4} dt} \approx 0.1 \rho u_0^3$$

$$V_B = \frac{E_g}{e} - (\phi_n + \phi_p)$$

$$np = C = n_i^2$$

$$W \approx \sqrt{\frac{2\varepsilon_0 \varepsilon_r V_B}{e\sqrt{np}}}$$

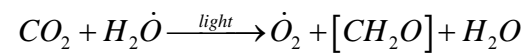
$$I(V) = I_L - I_D = I_L - I_0 \left[ \exp\left(\frac{eV}{AkT}\right) - 1 \right]$$

$$\Delta\mu = E_{Fn} - E_{Fp} = eV$$

$$\eta = \frac{I_m \cdot V_m}{P_{in}} = FF \cdot \frac{I_{sc} \cdot V_{oc}}{P_{in}}$$

$$FF = \frac{I_m \cdot V_m}{I_{sc} \cdot V_{oc}}$$

$$\rho = \frac{(n_0 - n_1)^2}{(n_0 + n_1)^2}$$



$$P_T = C_p A \frac{\rho u_0^3}{2}$$

$$P_o = A \frac{\rho u_0^3}{2}$$

$$F_A = \frac{\Delta p}{\Delta t} = \frac{m(u_0 - u_2)}{\Delta t} = \rho A_1 u_1 (u_0 - u_2)$$

$$F_A = A_1 (p_{1u} - p_{1d}) = A_1 \rho (u_0^2 - u_2^2) / 2$$

$$P = u_1 F_A$$

$$P_T = u_1 F_A = u_1 \frac{dm}{dt} (u_0 - u_2)$$

$$P_T = \frac{1}{2} \frac{dm}{dt} (u_0^2 - u_2^2)$$

$$a = \frac{u_0 - u_1}{u_0}$$

$$P_T = [4a(1-a)^2] P_o$$

$$C_p \leq \frac{16}{27}$$

$$\frac{1}{(D \pm r)^2} = \frac{1}{D^2} \left( 1 \pm \frac{2r}{D} \right)$$

**NORSK OVERSETTELSE:**

Du kan svare enten på norsk eller engelsk, og du må svare på alle spørsmålene i alle 4 oppgavene. Vekten er hver oppgave er gitt i parentes foran hver deloppgave.

**Oppgave 1. Drivhuseffekten, karbonsyklusen og fossile brensler**

- a) (5%) Hva er den naturlige drivhuseffekten? Hvilke gasser bidrar mest til den naturlige drivhuseffekten? Hva ville temperaturen på jorda ha vært hvis det ikke var noen atmosfære på jorda?
- b) (5%) Lag en skjematisk figur som viser den globale karbonsyklusen. Inkluder atmosfæren, landområder, fossilt brensel, overflatevann i havene og dyphav. Indiker i figuren størrelsesorden for karboninnholdet i de ulike delene av systemet. Indiker også i hvilke deler av systemet karbon innholdet øker og hvor det avtar.
- c) (15%) Beskriv hvordan fossile brensler utnyttes på jorda i dag, og forklar kort hva problemene relatert til bruk av fossile brensler er. Hvis vi bruker de (globale) kjente reservene av fossilt brensel med same rate som i dag, ca hvor lenge vil de vare?

**Oppgave 2. Kjernekraft**

- a) (10%) Gi et uttrykk for fisjonsprosessen som involverer  $^{235}\text{U}$  og et langsomt nøytron, og beskriv prosessen kort. Hvor mye energi frigjøres i prosessen? Hvor kommer denne energien fra?
- b) (10%) Beskriv hvordan antallet y raske nøytroner fra hver fisjonsprosess av  $^{236}\text{U}$  reduseres og bremses ned til antall k langsomme nøytroner i en typisk fisjonsreaktor som bruker  $^{235}\text{U}$  som drivstoff. Hvorfor må antall nøytroner kontrolleres og hvorfor må nøytronene bremses ned i en slik reaktor?
- c) (5%) Hva er forsinkede nøytroner? Hvorfor er de essensielle for sikker drift av et kjernekraftverk?

**Oppgave 3. Bioenergi**

- a) (10%) Hva er energi-jordbruk? Hva er fordelene og problemene relatert til energi-jordbruk?
- b) (5%) Hvilke biodrivstoff (primære og sekundære) brukes i dag? Hvilken av disse har størst energitetthet (målt i J/kg)?

*Fortsettelse på neste side.*

#### Oppgave 4. Energiforsyning

I 2008 får du jobb i kommunen i Madrid, og de vil at du skal evaluere potensialet for fire ulike energikilder for elektrisitetsproduksjon. Du kan bruke et (flatt) område på maksimalt  $1\text{km}^2$ .

- (5%) Innkommende solstråling er på  $4497\text{ Wh/m}^2$  per dag i gjennomsnitt. Anta at du kan dekke 80% av området med (horisontale) solceller med en effektivitet på 15%. Hvor mye elektrisk energi kan produseres (målt i TWh og joule) kan produseres på ett år?
- (5%) Alternativt kan man dyrke solsikker som kan høstes en gang i året. Energiinnholdet i solsikker er på  $29\text{GJ/ha}$  per innhøsting. Hvor mye elektrisk energi (målt i TWh og joule) kan produseres på ett år, hvis solsikkene brukes som drivstoff i et dampturbin kraftverk som har en effektivitet på 20%?
- (5%) En tredje mulighet er å ta varme fra jorda, ved hjelp av fraktuering av tørt fjell. Ved å bore  $7\text{km}$  dypt kan man ta ut  $294\text{MW/km}^2$ . Anta at temperaturen på vannet som pumpes opp fra bakken er  $103^\circ\text{C}$  og at effektiviteten for kraftverket er 6%. Hvor mye elektrisk energi (målt i TWh og joule) kan produseres på ett år? Anta at kraftverket kan operere 90% av tida.
- (5%) Man kan også installere vindturbiner med en rotordiameter på  $90\text{m}$ , som har en effektivitet som er 55% av det teoretiske maksimumet. Hver vindturbin trenger et område på  $500\times 500\text{m}^2$ . Anta at gjennomsnittlig vindhastighet i Madrid er  $u=7\text{m/s}$ . Som en tommelfingerregel anslåes mengden tilgjengelig vindkraft å være det dobbelte av vindkraft tilgjengelig ved gjennomsnittlig vindhastighet. Forklar hvorfor dette er tilfelle.

Beregn mengde elektrisitet (målt i TWh og joule) generert av én turbin og deretter av det maksimale antall vindturbiner du får plass til på det tildelte arealet på  $1\text{km}^2$ . Anta at generatoren har en effektivitet på 95%. Lufttettheten i Madrid er i gjennomsnitt  $\rho = 1.123\text{kg m}^{-3}$ .

- (15%) Lag en liste over de viktigste fordelene og ulempene for de fire foreslåtte energikildene/-teknologiene.

Sammenlign de foreslåtte energikildene og gjør en anbefaling til byrådet om hvilken av dem som har størst potensial for elektrisitetsgenerering og som samtidig har "akseptable" ulemper.

Er antagelsene i beregningene av elektrisitetsproduksjonen fornuftige? Hvorfor/hvorfor ikke?

Kan noen av energikildene yte bedre en estimert? I så fall; hvordan?