

Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije
Zavod za termodinamiku, strojarstvo i energetiku



ENERGETIKA

Studij: Kemijsko inženjerstvo (V semestar)

doc. dr. sc. Igor Sutlović

*How does a
wind turbine
work?*



Vjetroelektrane

Električna snaga vjetroelektrane

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \cdot c_p \cdot \eta_g \cdot \eta_m \quad [\text{W}]$$

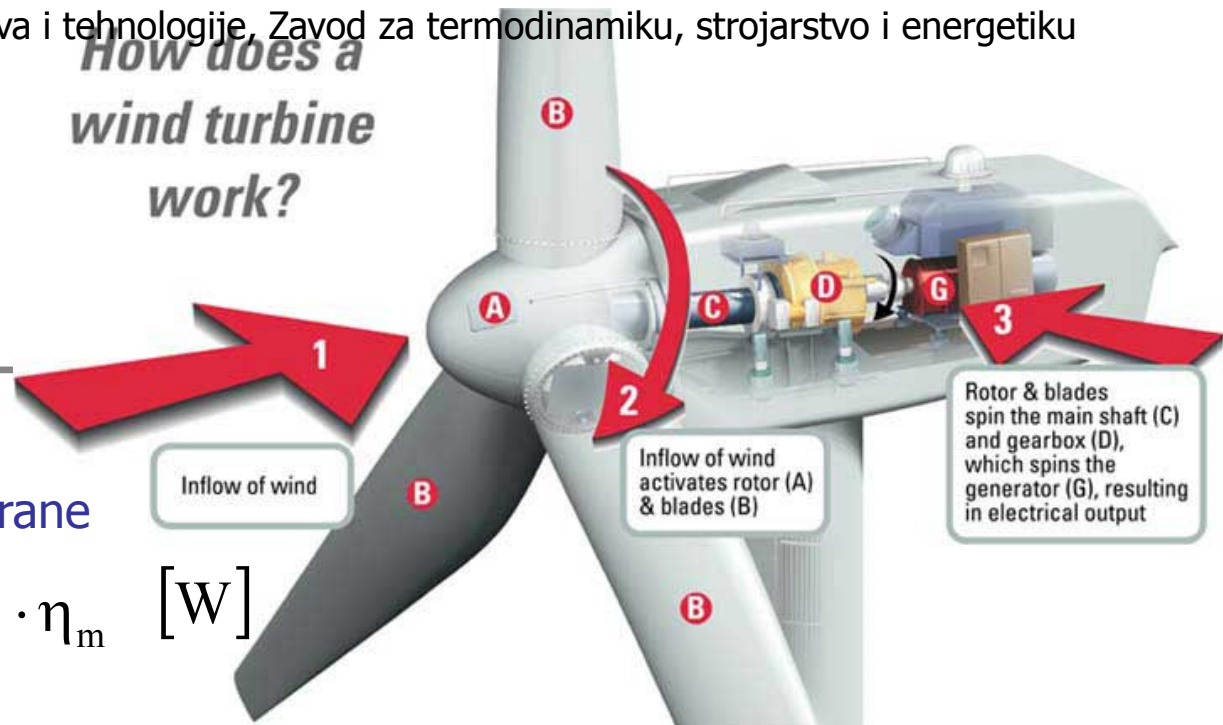
$v \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$ - brzina vjetra kroz rotor

$\rho \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$ - gustoća zraka

η_m - mehanički stupanj iskorištenja

η_g - stupanj iskorištenja generatora

c_p - stupanj iskorištenja rotora vjetroelektrane (max 0,59)



Za opskrbu izoliranog područja potrebno je izgraditi vjetropark. Odredite koliko je jednakih vjetroelektrana potrebno izgraditi ako je potrebno osigurati snagu 3MW, a brzina vjetra kroz rotor vjetroelektrane iznosi 18m/s. Zadano je: površina rotora $A=210\text{m}^2$, stupanj iskorištenja rotora $c_p=0,35$, mehanički stupanj iskorištenja $\eta_m=0,93$, $\eta_g=0,78$, gustoća zraka $\rho=1,23\text{kg/m}^3$. Koliko bi se povećala snaga vjetroelektrane ako bi se mehanički stupanj iskorištenja povisio za 1%. Koliko bi se dodatno proizvelo električne energije ako vrijeme rada vjetroelektrane iznosi 3400 sati?

Snaga jedne vjetroelektrane računa se prema izrazu:

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \cdot c_p \cdot \eta_g \cdot \eta_m$$

$$P = \frac{1}{2} \cdot 1,23 \cdot 210 \cdot 18^3 \cdot 0,35 \cdot 0,78 \cdot 0,93 = 191230,7\text{W} = 191,2\text{kW}$$

Broj potrebnih vjetroelektrana da bi se osigurala potrebna snaga je:

$$N = \frac{3 \cdot 10^6 \text{W}}{191230,7\text{W}} = 15,7$$

Ovaj broj zaokružuje se na prvi veći cijeli broj pa je potrebno **16** vjetroelektrana:



Povećanje mehaničkog stupnja djelovanja za 1% dovodi i do povećanja snage vjetroelektrane za 1% pa ona iznosi:

$$P' = 1,01 \cdot P = 193143,0W$$

Količina proizvedene el. energije sa starim stupnjem iskorištenja i za trajanje pogona od 3400h:

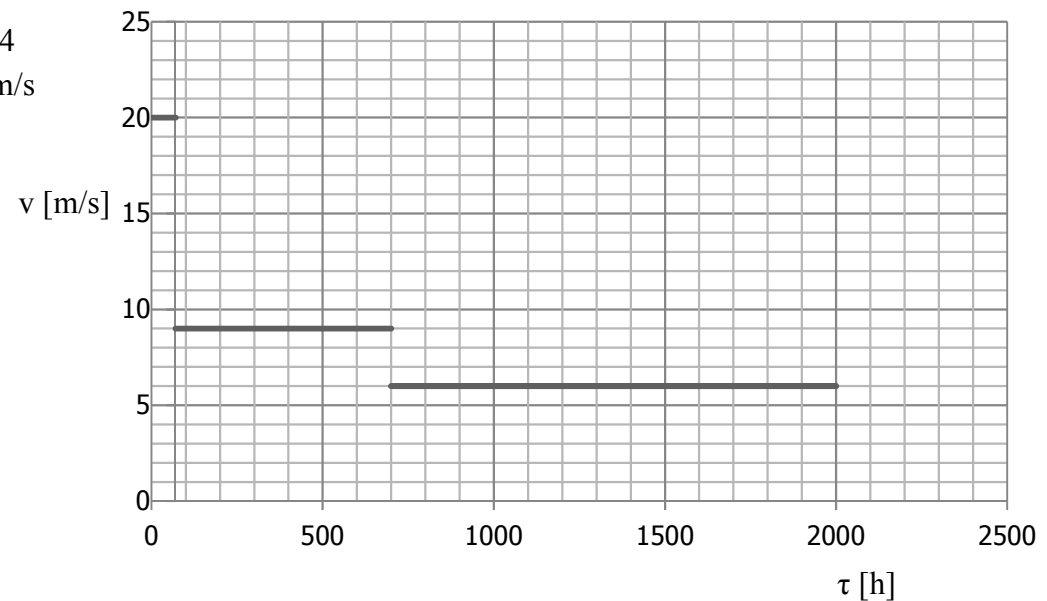
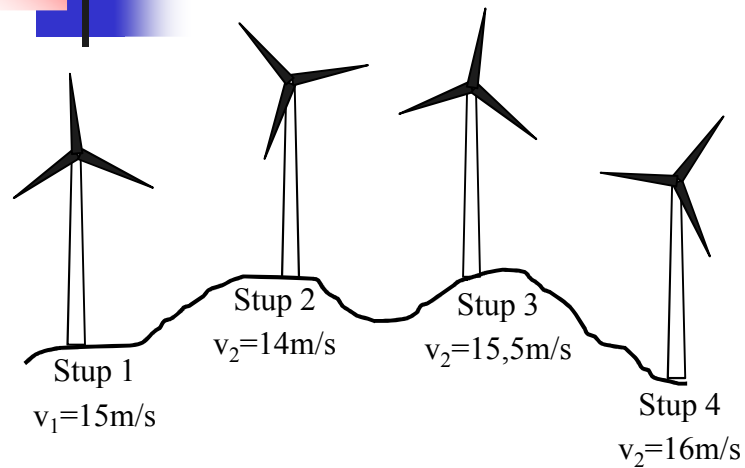
$$E_{el} = 191230,7W \cdot 3400h = 650182kWh$$

a za novi stupanj iskorištenja i za trajanje pogona od 3400h:

$$E'_{el} = 193143,0W \cdot 3400h = 656686,2kWh$$

$$\Delta E = 6504,2kWh$$

Vjetropark se sastoji od četiri stupa na kojima su izmjerene različite brzine vjetra. Izračunajte koliko je električne energije proizvedeno (MWh) u tom vjetroparku u trajanju od 70h. Koliko je električne energije proizvedeno na 1. stupu ako je zadan dijagram trajanja vjetra za taj stup. Zadano je još: $\rho_z=1,23\text{kg/m}^3=\text{konst.}$, $A=860\text{m}^2$, $c_p=0,35$, $\eta_m=0,93$, $\eta_g=0,85$.





Rješenje:

Snaga i-tog stupa vjetroparka općenito je:

$$P_i = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v_i^3 \cdot c_p \cdot \eta_m \cdot \eta_g$$

proizvedena električna energije u vjetroparku općenito je:

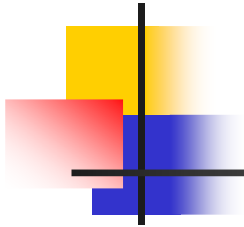
$$E_{el} = \sum_i P_i \cdot \tau_i \quad [W]$$

proizvedena električna energije u vjetroparku uz zadane brzine vjetra:

$$E_{el} = P_1 \cdot \tau_1 + P_2 \cdot \tau_2 + P_3 \cdot \tau_3 + P_4 \cdot \tau_4$$

$$\tau_1 = \tau_2 = \tau_3 = \tau_4 = \tau \quad (\text{tekst zadatka})$$

$$E_{el} = (P_1 + P_2 + P_3 + P_4) \cdot \tau = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot c_p \cdot \eta_m \cdot \eta_g \cdot (v_1^3 + v_2^3 + v_3^3 + v_4^3) \cdot \tau$$

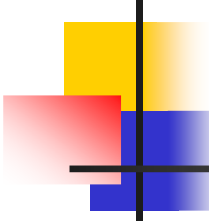


$$E_{el} = \frac{1}{2} \cdot 1,23 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 860 \text{m}^2 \cdot 0,35 \cdot 0,93 \cdot 0,85 \cdot (15^3 + 14^3 + 15,5^3 + 16^3) \frac{\text{m}^3}{\text{s}^3} \cdot 70 \text{h} =$$
$$= 1,4376 \cdot 10^9 \text{Wh} = 1,4376 \text{GWh}$$

proizvedena električna energije na stupu 1 vjetroparka uz zadani dijagram brzine vjetra

$$E_{el} = \sum_i P_i \cdot \tau_i = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot c_p \cdot \eta_m \cdot \eta_g \cdot (v_1^3 \cdot \tau_1 + v_2^3 \cdot \tau_2 + v_3^3 \cdot \tau_3)$$

$$E_{el} = \frac{1}{2} \cdot 1,23 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 860 \text{m}^2 \cdot 0,35 \cdot 0,93 \cdot 0,85 \cdot (20^3 \cdot 70 + 9^3 \cdot 630 + 6^3 \cdot 1300) \frac{\text{m}^3}{\text{s}^3} \cdot h =$$
$$= 1,9157 \cdot 10^9 \text{Wh} = 1,9157 \text{GWh}$$



Vjetroelektrana je u zimskom periodu (uz gustoću zraka ρ_{ZIMA}) koji je trajao 950h radila s prosječnom snagom $P_{zima}=1,349MW$ pri brzini $v_{zima}=14m/s$. Kolika je bila prosječna brzina vjetra u ljetnom periodu koji je trajao 1600 sati ako je vjetroelektrana u oba perioda proizvela 3,54GWh električne energije. Gustoća zraka se u zimskom periodu povećala za 6% u odnosu na onu u ljetnom razdoblju.

Rješenje:

Ukupno proizvedena električna energija u zimskom i ljetnom periodu je:

$$E_{el} = E_{ljetno} + E_{zima} = P_{zima} \cdot \tau_{zima} + P_{ljetno} \cdot \tau_{ljetno} = 3,54GWh = 3,54 \cdot 10^3 MWh$$

$$P_{ljetno} = \frac{E_{el} - P_{zima} \cdot \tau_{zima}}{\tau_{ljetno}} = \frac{3,54 \cdot 10^3 MWh - 1,349MW \cdot 950h}{1600h} = 1,412MW$$

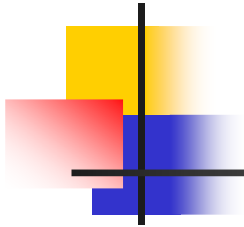
Odnos gustoća zraka zima/ljeto – v.tekst:

$$\rho_{zima} = 1,06 \cdot \rho_{ljetno}$$

Snaga vjetroelektrane po zimi i ljetu:

$$P_{zima} = \frac{1}{2} \cdot 1,06 \cdot \rho_{ljetno} \cdot A \cdot v_{zima}^3 \cdot c_p \cdot \eta_m \cdot \eta_g$$

$$P_{ljetno} = \frac{1}{2} \cdot \rho_{ljetno} \cdot A \cdot v_{ljetno}^3 \cdot c_p \cdot \eta_m \cdot \eta_g$$



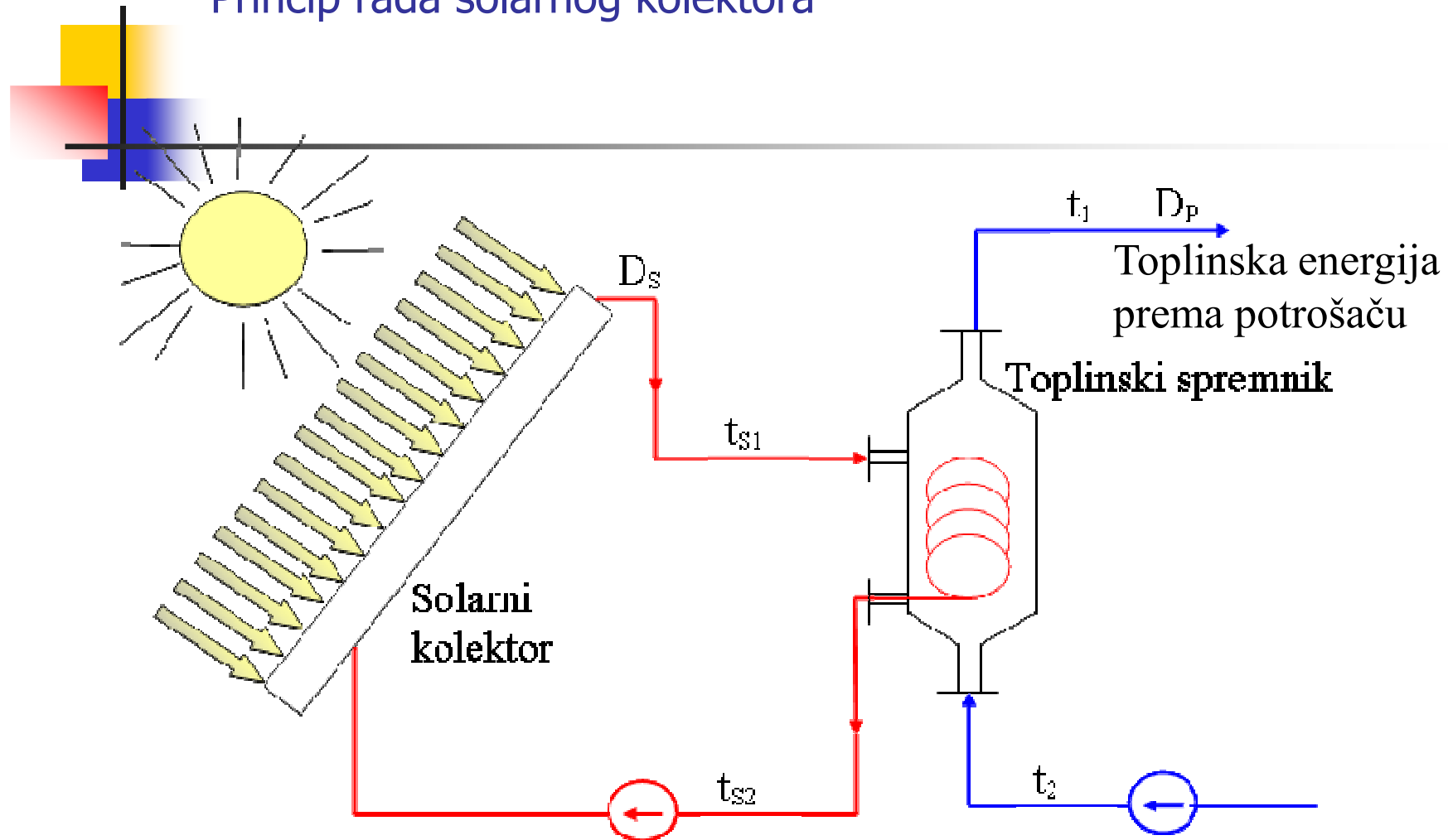
$$\frac{P_{zima}}{P_{ljetno}} = \frac{\frac{1}{2} \cdot 1,06 \cdot \rho_{ljetno} \cdot A \cdot v_{zima}^3 \cdot c_p \cdot \eta_m \cdot \eta_g}{\frac{1}{2} \cdot \rho_{ljetno} \cdot A \cdot v_{ljetno}^3 \cdot c_p \cdot \eta_m \cdot \eta_g} = \frac{1,06 \cdot v_{zima}^3}{v_{ljetno}^3}$$

prosječna brzina vjetra u ljetnom periodu je:

$$v_{ljetno} = \sqrt[3]{\frac{P_{ljetno} \cdot 1,06 \cdot v_{zima}^3}{P_{zima}}} = v_{zima} \cdot \sqrt[3]{\frac{1,06 \cdot P_{ljetno}}{P_{zima}}} = 10 \cdot \sqrt[3]{\frac{1,06 \cdot 1,412}{1,349}} = 14,5 \frac{m}{s}$$

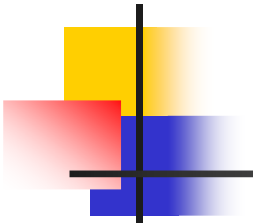
Pasivno korištenje sunčeve energije

Princip rada solarnog kolektora



Toplinski učin sunčeva kolektora-iskorištena energija Sunčevog zračenja

$$Q_S = D_S \cdot c_{pS} \cdot (t_{S1} - t_{S2}) \quad [\text{kW}] \quad t_{S1} > t_{S2}$$



$D_S \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right]$ - maseni protok solarne tekućine kroz kolektor

$t_{S1} \left[^\circ\text{C} \right]$ - izlazna temperatura iz kolektora

$t_{S2} \left[^\circ\text{C} \right]$ - ulazna temperatura u kolektor

Toplina izmijenjena u toplinskom spremniku – topla struja iz kolektora predaje toplinu koja se isporučuje potrošaču toplinske energije. Izmjena topline teče uz određene gubitke.

$$Q_P = D_P \cdot c_p \cdot (t_1 - t_2) \quad [\text{kW}] \quad t_1 > t_2$$

$t_1 \left[^\circ\text{C} \right]$ - izlazna temperatura iz toplinskog spremnika

$t_2 \left[^\circ\text{C} \right]$ - ulazna temperatura u toplinski spremnik

c_p, c_{pS} – specifični toplinski kapaciteti tekućina koje izmijenjuju toplinu, mogu se uzeti jednaki, $c_p=4,187\text{kJ/kgK}$



Toplina izmijenjena u toplinskom spremniku ovisi o njegovom stupnju iskorištenja η_{TS}

$$Q_P = \eta_{TS} \cdot Q_S \quad \eta_{TS} \leq 1$$

Računanje površine kolektora

$$A = \frac{F \cdot Q_S}{\eta_{SC} \cdot Q_{SOLAR}} \quad [m^2]$$

$F=1,25$ – faktor sigurnosti

η_{SC} – stupanj iskorištenja sunčevog kolektora, prema tablici

Q_{SOLAR} – dozračena Sunčeva energija, prema tablici

Dozračena Sunčeva energija i stupanj iskorištenja kolektora u ovisnosti o mjesecu

	Siječanj	Veljača	Ožujak	Travanj	Svibanj	Lipanj	Srpanj	Kolovoz	Rujan	Listopad	Studeni	Prosinac
$Q_{\text{SOLAR}} \cdot 10^3 \text{ kJ/m}^2 \text{ dan}$	6,29	10,4	13,8	18,7	22,6	25,9	24,8	21,6	17,3	12,2	7,6	5,6
Iskorištenje kolektora $\eta_{\text{SC}}, \%$	25	25	25	50	50	65	65	65	50	25	25	25

Općenito, iskorištenje dozračene Sunčeve energije ovisi o godišnjem dobu, nagibu kolektora (u odnosu na vodoravnu plohu) i položaju kolektora u odnosu na strane svijeta. Kolektor će primiti i iskoristiti najviše dozračene energije ako je postavljen vodoravno i okrenut prema jugu.

Za potrebe pripreme sanitarne tople vode koju je potrebno ugrijati sa 20°C na 50°C i količine 300litara/dan treba odrediti površinu kolektora za dozračenu Sunčevu energiju za mjesec srpanj uz stupanj iskorištenja toplinskog spremnika $\eta_{SC}=0,9$

$$Q_P = D_P \cdot c_p \cdot (t_1 - t_2) = 300 \cdot 4,187 \cdot (50 - 20) = 37683 \frac{\text{kJ}}{\text{dan}}$$

Paziti na jedinice!!!

$$Q_S = \frac{Q_P}{\eta_{TS}} = \frac{37683}{0,9} = 41870 \frac{\text{kJ}}{\text{dan}}$$

$$A = \frac{F \cdot Q_S}{\eta_{SC} \cdot Q_{SOLAR}} = \frac{1,25 \cdot 41870}{0,65 \cdot 24,8 \cdot 10^3} = 3,247 \text{m}^2$$