



## Termodynamiikkaa

Energiatekniikan automaatio  
TKK 2007

*Yrjö Majanne, TTY/ACI*

*Martti Välisuo, Fortum Nuclear Services*

## Termodynamiikan perusteita

- Konventionaalisessa lämpövoimaprosessissa muunnetaan polttoaineeseen sitoutunut kemiallinen energia lämpö/sähköenergiaksi höyryprosessin avulla
- Palamisprosessissa polttoaineesta vapautunut kemiallinen energia siirretään höyryyn lämpöenergiaksi
- Höyryyn sitoutunut lämpöenergia muunnetaan mekaaniseksi energiaksi höyryturbiinissa
- Generaattorissa muunnetaan mekaaninen energia sähköenergiaksi



# Termodynamiikan keskeisiä suureita

- Energia, yksikkö = Joule [J]

$$J = Nm = \frac{kg \ m}{s^2} m$$

- Wattitunti (kilowattitunti [kWh], megawattitunti [MWh])

$$Wh = W \cdot 3600s = 3600J = 3,6kJ$$

- Teho, yksikkö = Watti [W]

$$W = \frac{J}{s} = \frac{Nm}{s} = \frac{kg \ m \ m}{s^2 \ s}$$



# Termodynamiikan keskeisiä suureita

- Entalpia  $h$ , yksikkö J/kg

- Aineen lämpöenergiasisältö

- Entropia  $s$ , yksikkö J/K

- Energian sisäinen järjestäytyneisyys (epäjärjestys), tasapainotilan todennäköisyyden mitta

- Entropiaan liittyvä epäjärjestys tarkoittaa useimmiten energian tai materiaalin jakautumista yhä tasaisemmin sille varatussa tilassa



# Termodynamiikan keskeisiä suureita

- Termodynamiikan ensimmäinen pääsääntö, **energian säilyminen**
  - Energiaa ei voida luoda eikä hävittää, ainoastaan vain muuttaa muodosta toiseen.
- Termodynamiikan toinen pääsääntö, **entropian kasvu**
  - Tiedetyt ilmiöt tapahtuvat itsestään tai tiettyyn suuntaan; lämpötilaerot pyrkivät tasaantumaan, aineet sekoittuvat jne.
    - Lämpö ei koskaan siirry itsestään kylmemmästä kappaleesta lämpimämpään
    - On mahdotonta palauttaa mitään todellista systeemiä täysin alkutilaansa
    - Jokainen systeemi muuttuu itsekseen jätettynä kohti suurinta todennäköisyyttä, eli uuden tasapainotilan entropia on suurempi kuin alkuperäinen



# Termodynamiikan keskeisiä suureita

Tavanmukaisissa esityksissä	Tässä esityksessä
Energian muutos	Energian muutosnopeus
Työ	Teho
Lämpömäärä	Lämpövirta, energiavirta



# Energian lajeja

- Mekaaninen energia
  - Liike-energia
    - Kineettinen energia (liike-energia), esim. turbiinin pyörivän roottorin energia
  - Potentiaalienergia
    - Potentiaalienergia (asemaenergia), esim. vesiputouksen putouskorkeus
- Sisäenergia
  - lämpöenergia
  - kemiallinen energia



# Energian siirtymisen tapoja

Energian siirtymisen syy	Siirtymistä kuvaava suure
Voima (tai vääntömomentti tai paine) ja liike	Teho $P$
Massavirta	Energiavirta $q_E$
Lämpötilaero	Lämpövirta $\Phi$



## Energian siirtyminen neste- tai kaasuputkessa

**Hydraulinen teho = paine × tilavuusvirta**  
**= paine × ominaistilavuus × massavirta**

$$P = pq_v = pvq_m$$

**Sisäenergiavirta = ominaissisäenergia × massavirta**

$$q_U = uq_m$$



## Energian siirtyminen neste- tai kaasuputkessa

**Entalpiavirta = hydraulinen teho + sisäenergiavirta**  
**= ominaisentalpia × massavirta**

$$q_H = pvq_m + uq_m = hq_m$$

$$h = pv + u$$



# Lämmönsiirtymisen mekanisme

- **Säteily**
  - Liekistä höyrystinputkien pintaan
  - liekistä tulistinputkien pintaan
- **Konvektio (kulkeutuminen)**
  - nesteestä tai kaasusta lämmönvaihtimen putkien pintaan ja päinvastoin
- **Johtuminen**
  - lämmönvaihtimen putkien sisällä sisäpinnasta ulkopintaan ja päinvastoin



# Lämmön siirtyminen lämmönsiirtimissä

**Kun hallitsevat lämmönsiirtomekanismit ovat konvektio ja johtuminen,**

- **lämpövirta = lämpökonduktanssi × keskimääräinen lämpötilaero**

$$\Phi = G\Delta T$$

- **Kokonaislämmönsiirtokerroin = lämpökonduktanssi / pinta-ala**

$$k = \frac{G}{A}$$



# Lämmön siirtyminen lämmönsiirtimissä

- **Lämpökonduktanssi ja kokonaislämmönsiirtokerroin riippuvat virtauksesta, lämpötiloista ja paineesta**
  - Eräs mallinnuksessa käytetty lämmönsiirron korrelaatio

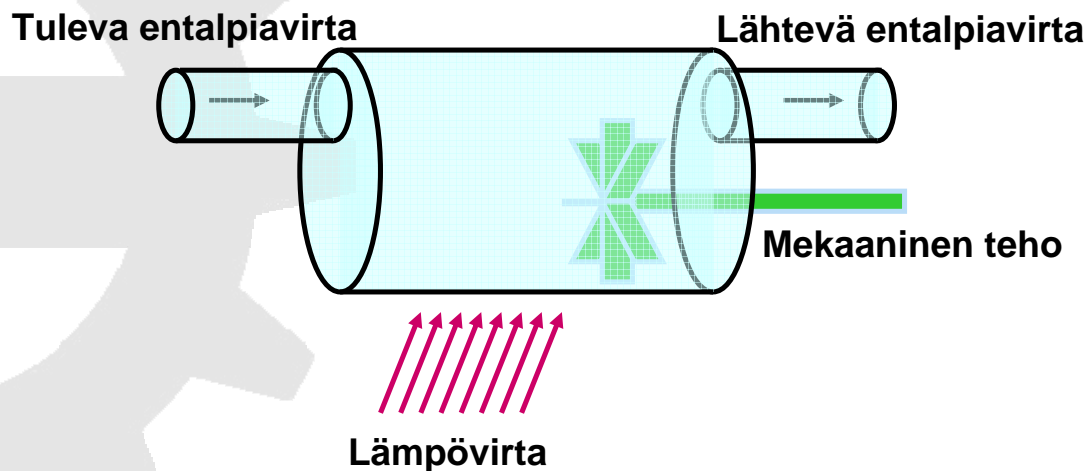
$$Q = kq_m^{0,8} \Delta T$$

- **Tehon siirtyminen säteilemällä**
  - Lämpöteho on verrannollinen absoluuttisten lämpötilojen [K] neljänsien potenssien erotukseen

$$\Phi \sim T_1^4 - T_2^4$$



# Avoin termodynaaminen järjestelmä



# Energiansäilymlaki

- Järjestelmään varastoituneen energian muutos = nettoentalpiavirta + lämpövirta + teho

$$\frac{dE}{dt} = \sum q_H + \Phi + P$$

- Tasapainotilassa energian muutos on nolla.



# Energian säilyminen virtauskoneissa

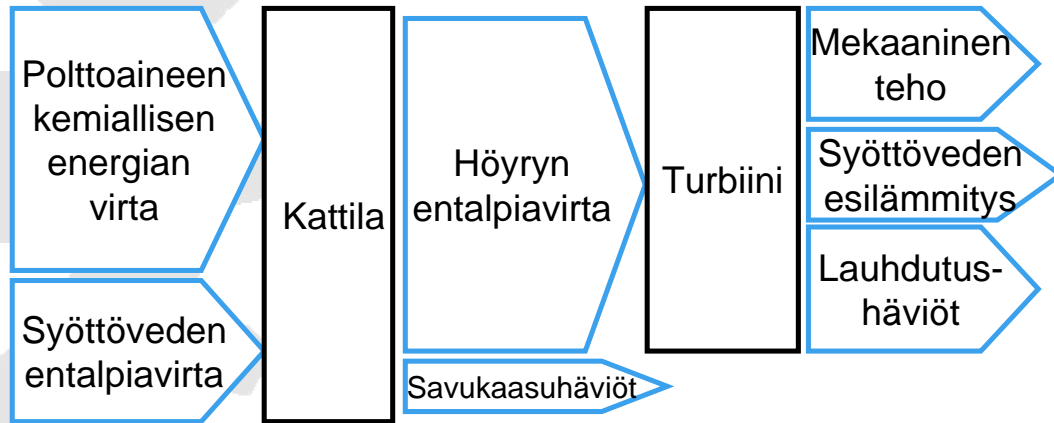
- Virtauskoneita ovat turbiinit, kompressorit, puhaltimet ja pumput.
- Mekaaninen teho = tuleva entalpiavirta – lähtevä entalpiavirta

$$P = q_{H,in} - q_{H,out}$$

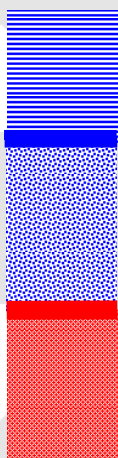




# Energian siirtyminen voimalaitoksessa



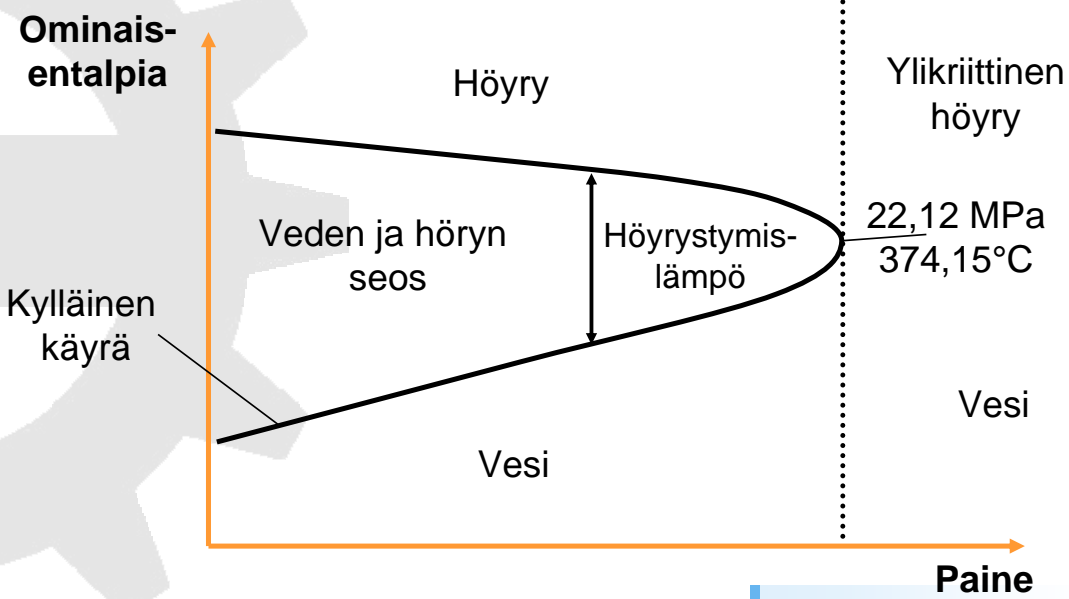
# Veden ja höyryn olomuodot



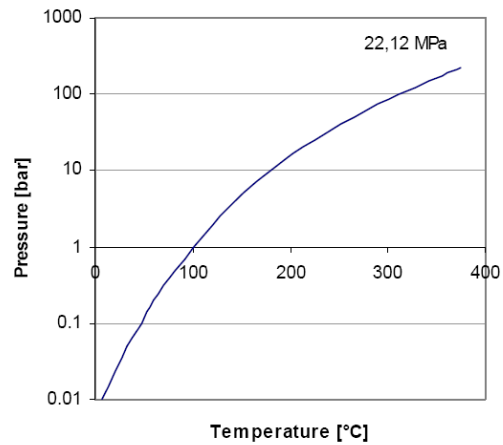
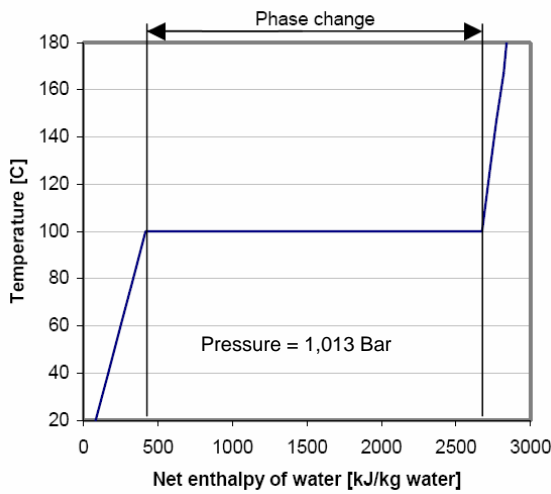
- “Jäähtynyt” vesi
- Kylläinen vesi
- Veden ja höyryn seos, kostea kylläinen höyry
- Kuiva kylläinen höyry
- Tulistettu höyry



# Veden ja höyryn ominaisuuksia



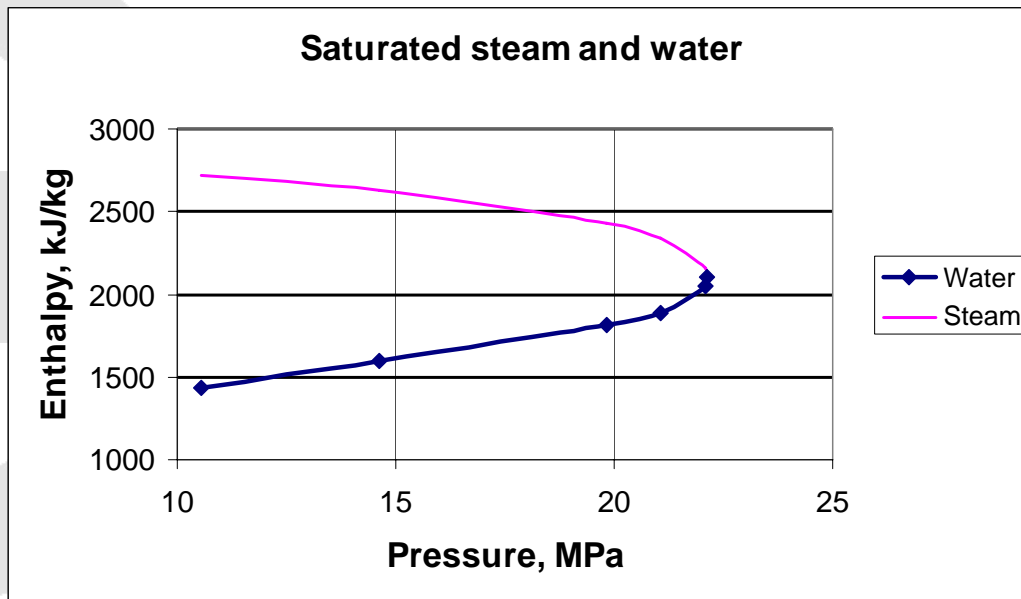
# Veden ja höyryn ominaisuuksia



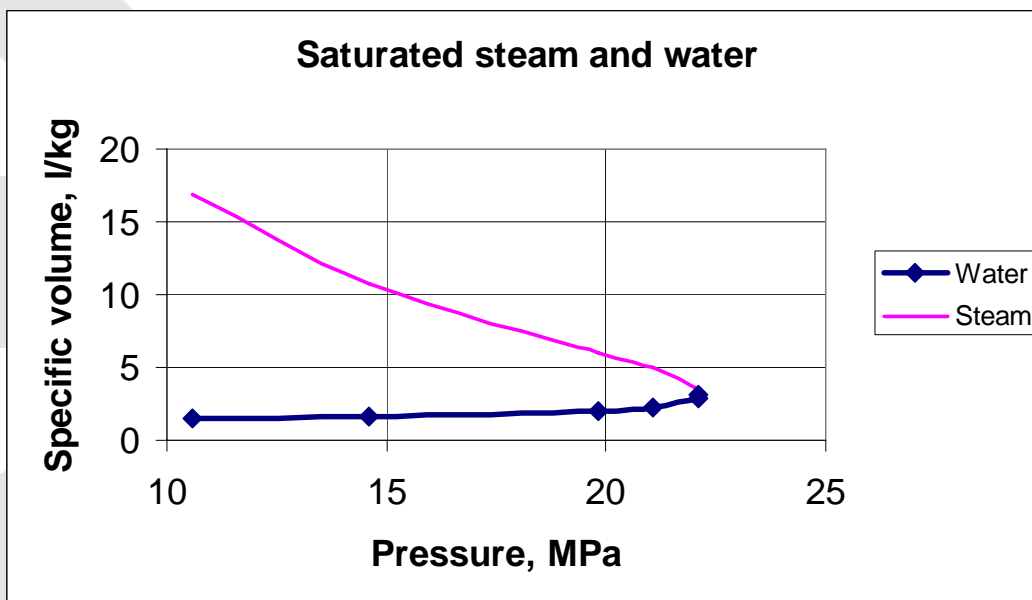
**Nyrkkisääntö:**  

$$T \approx 100\sqrt{\sqrt{p}}, \quad p = \text{paine [bar]}$$

# Veden ja höyryn ominaisuuksia



# Veden ja höyryn ominaisuuksia



# Veden ja höyryn ominaisuuksia

