

**Beschikbare tijd:** 100 minuten

Instructies voor het invullen van het antwoordblad.

1. Dit open boek tentamen bestaat uit **5** opgaven.
2. U mag tijdens het tentamen gebruik maken van:
  - Een tabellenboek, zonder aantekeningen;

Toegestane boeken:

- Ketelinstallaties HWTK;
- Milieu en Chemie B; vakcode 58.95;
- Stoomturbines HWTK;
- Productieproces B; vakcode 58.92
- Warmteleer voor Technici; ir. A.J.M. van Kimmenaede; 8<sup>ste</sup> druk, 2001
  
- Rekenmachine
- Stoomtabel
- HS-diagram

3. Het aantal te behalen punten.

1	2	3	4	5
10	10	10	10	10

$$cijfer = \frac{\text{aantal behaalde punten}}{5}$$

**Veel succes!**



**Opgave 1: (10 punten)**

Een 3-traps Curtisturbine is geschakeld vóór een Zoellyturbine. De Zoellyturbine bevat 20 trappen. De intredehoek van de stoom ten opzichte van de loopwielen is voor beide turbinegedeelten  $18^\circ$ . Het toerental 3000 rpm. De beide turbinegedeelten draaien met maximaal rendement. Het stoomverbruik bedraagt 100 kg/s. en het mechanisch rendement bedraagt 96%.

Bereken de totale warmteval over de turbine als de gemiddelde diameter van het Curtiswiel 0,7 m bedraagt en de gemiddelde diameter van het Zoellywiel is 0,8 m.

**Opgave 2: (10 punten)**

Een middeldrukdruk Parsonsturbine is ter compensatie van de optredende kracht uitgevoerd met een evenwichtszuiger met een diameter van 1,2 m op basis van een druk van de toegevoerde stoom van 50 bar en een uitlaatdruk van 3,5 bar. Hiermede wordt beoogd, dat er een resterende kracht gewaarborgd is. De gemiddelde rotordiameter is 1 m. Echter, de stoomdruk wijzigt tot 45 bar, terwijl de massaflow van de stoom met 15% afneemt.

Met hoeveel kN neemt nu de axiale kracht af?

**Opgave 3:**

Een turbogenerator is belast met 70% van het nominale vermogen en draait daarbij parallel aan het net. De generator heeft één poolpaar. De netfrequentie is 60 Hz. De turbine werkt met een statiek van 6%.

Gevraagd:

a: Teken de toerenvermogenskarakteristiek.

**(3 punten)**

b: Indien in deze situatie onverhoopt de elektrische belasting zou worden afgeschakeld, met welk toerental zal de machine gaan draaien?

**(3 punten)**

c: Als in de situatie van vraag a de netfrequentie daalt tot 59,52 Hz, bij welk percentage van het nominale vermogen zal dan weer een evenwichtssituatie ontstaan?

**(4 punten)**

**Opgave 4: (10 punten)**

Van een stoomturbine-installatie is het HD-gedeelte voorzien van een regelwiel. Dit regelwiel bestaat uit een Curtiswiel. De hoek, die de straalbuizen maken met de omtreksrichting is  $18^\circ$ . Na een grote overhaul blijkt uit een controle, dat de straalbuizen verkeerd zijn gemonteerd. De hoek, die de straalbuizen nu maken met de omtreksrichting is  $21^\circ$ .

Gevraagd: Met hoeveel % is nu het stromingsrendement veranderd?

Alle overige mogelijk optredende verliezen mogen bij de oplossing van dit vraagstuk worden verwaarloosd. Aan u de keuze of u het vraagstuk analytisch dan wel grafisch oplost.

**Opgave 5: (10 punten)**

Nadat een stoomturbine uit bedrijf is genomen, wordt op een daartoe bestemde plaats een ventilator aangesloten met een capaciteit van 1000 m<sup>3</sup>/hr, die lucht naar binnen blaast met een absolute vochtigheid van 2 gram per kilogram droge lucht en een temperatuur van 40°C. De ingeblazen lucht trekt door de machine en treedt de installatie uit door een geopend mangatdeksel van de condensor. Het water in de turbine en condensor bevindt zich op omgevingstemperatuur, te weten 15°C.

Na 5 uur draaien van de ventilator is de luchtvochtigheid van de ingeblazen lucht gelijk aan de luchtvochtigheid van de uittredende lucht. De soortelijke massa van de droge lucht is 1,112 kg/m<sup>3</sup> bij 40 °C en 1 bar.  
De soortelijke massa van water is 1000 kg/m<sup>3</sup>.

Gevraagd: Hoeveel liter water is er maximaal afgevoerd?  
(Bij de oplossing gebruik maken van tabel op blz. 20 van les 18)

# Uitwerkingen:

## Vraag 1

Gemiddelde diameter Curtiswiel is 0,7 m. Toerental = 3000 rpm = 50 Hz

$$U_c = \pi \cdot D_g \cdot n = \pi \cdot 0,7 \cdot 50 = 109,96 \text{ m/s}$$

$$U_c = \frac{C_{1c} \cdot \cos \alpha}{2 \cdot z}$$

$$C_{1c} = C_{1c} = \frac{U_c \cdot 2 \cdot z}{\cos \alpha} = \frac{109,96 \cdot 2 \cdot 3}{\cos 18^\circ} = 693,7 \text{ m/s}$$

$$C_{1c} = \sqrt{2000 \cdot \Delta h_c}$$

$$\Delta h_c = \frac{C_{1c}^2}{2000} = 240,6 \text{ kJ/kg}$$

Gemiddelde diameter Zoellywiel is 0,8 m

$$U_z = \pi \cdot D_z \cdot n = \pi \cdot 0,8 \cdot 50 = 125,66 \text{ m/s}$$

$$U_z = 0,5 \cdot C_{1z} \cdot \cos \alpha = C_{1z} = \frac{2 \cdot U_z}{\cos \alpha} = \frac{125,66 \cdot 2}{\cos 18^\circ} = 264,3 \text{ m/s}$$

$$C_{1z} = \sqrt{2000 \cdot \frac{\Delta h_z}{m_z}}$$

$$\Delta h_z = \frac{C_{1z}^2 m_z}{2000} = \frac{264,3 \cdot 20}{2000} = 698,5 \text{ kJ/kg}$$

→ Gezamenlijke warmteval  $\Delta h_{sam} = 240,6 + 698,5 = 939,1 \text{ kJ/kg}$

→ **Totale warmteval**  $\Delta H_{tot} = \frac{m \cdot \Delta h_{sam}}{\eta_m} = \frac{100 \cdot 939,1}{0,96} = 97822,9 \text{ kJ/s} = 97,8 \text{ MW}$

## Vraag 2

Volgens de kegelwet van Stodola geldt:

$$\sqrt{\left(\frac{p_{toe}^2 - p_{af2}^2}{p_{toe}^2 - p_{af1}^2}\right)}$$

$$= \frac{m_{deellast}}{m_{vollast}} = 0,85 \rightarrow 0,7225 \cdot (p_{toe}^2 - p_{af1}^2) = (p_{toe}^2 - p_{af2}^2)$$

$$0,7225 \cdot (50^2 - 3,5^2) = 45^2 - p_{af2}^2 \rightarrow p_{af2} = 15,08 \text{ bar}$$

$$F_{\text{evenwicht}} = \Delta p \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (D_{\text{ez}}^2 - D_{\text{rotor}}^2) = \frac{4500000 - 1508000}{1000} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (1,2^2 - 1^2) = 1033,96 \text{ kN}$$

$$F_{\text{axiaal-2}} = F_{\text{evenwicht}} + F_{\text{zuiger}} = 1033,96 + F_{\text{zuiger}} \text{ kN}$$

$F_{\text{axiaal-1}}$  was:

$$F_{\text{axiaal-1}} = F_{\text{evenwicht}} + F_{\text{zuiger}} = \Delta p \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (D_{\text{ez}}^2 - D_{\text{rotor}}^2) + F_{\text{rotor}} = \frac{5000000 - 350000}{1000} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (1,2^2 - 1^2) + F_{\text{zuiger}} = 1606,9 + F_{\text{zuiger}} \text{ kN}$$

**De axiale kracht neemt dus af met  $1606,9 + F_{\text{zuiger}} - 1033,96 - F_{\text{zuiger}} = 572,9 \text{ kN}$**

### Vraag 3

a: Zie onderstaande grafische weergave.

b: Bij de afschakeling wordt  $P/P_{\text{nom}} = 0\%$ . Dan wordt de frequentie :

$$60 + \frac{\Delta s}{200 \cdot 60} = 61,8 \text{ Hz}$$

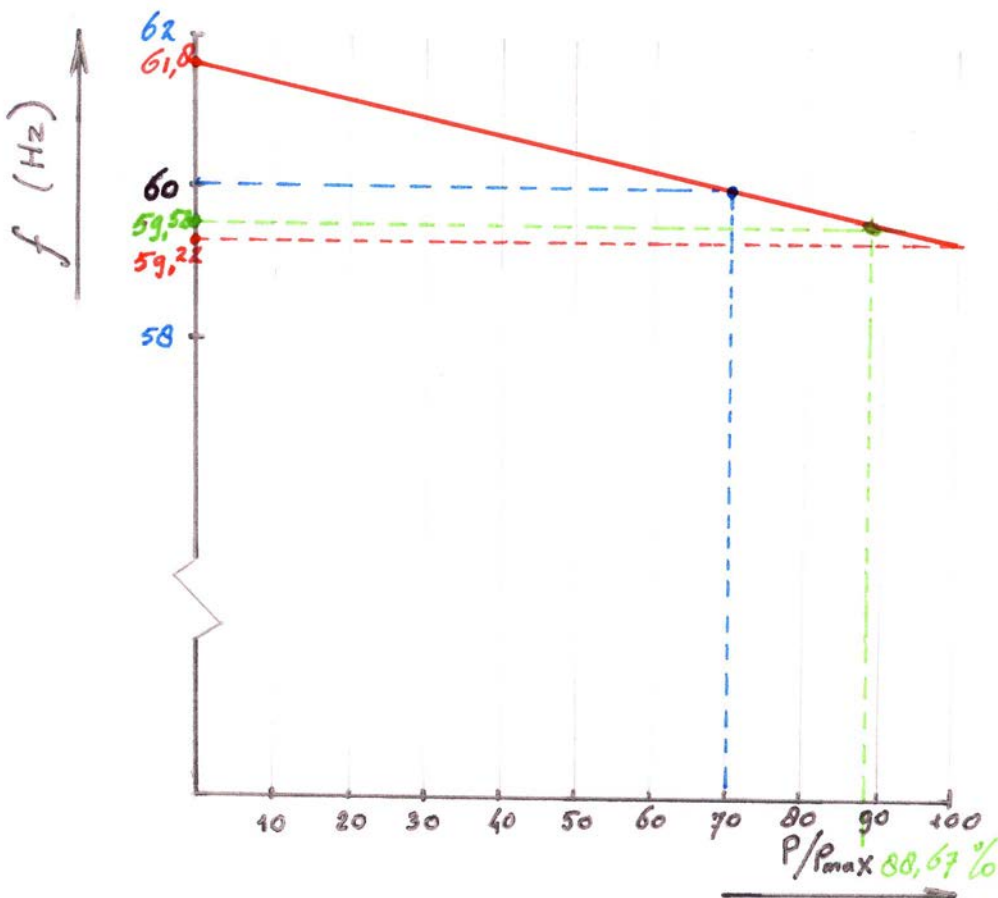
Dit is  $61,8 \cdot 60 = 3708$  toeren per minuut.

c: Voor de statiekurve geldt:  $f = 60 \cdot \left\{ 1 - 0,03 \cdot \left( \left( \frac{P}{P_{\text{nom}}} \right) - 1 \right) \right\}$

( te bepalen uit de vergelijking voor de rechte lijn)

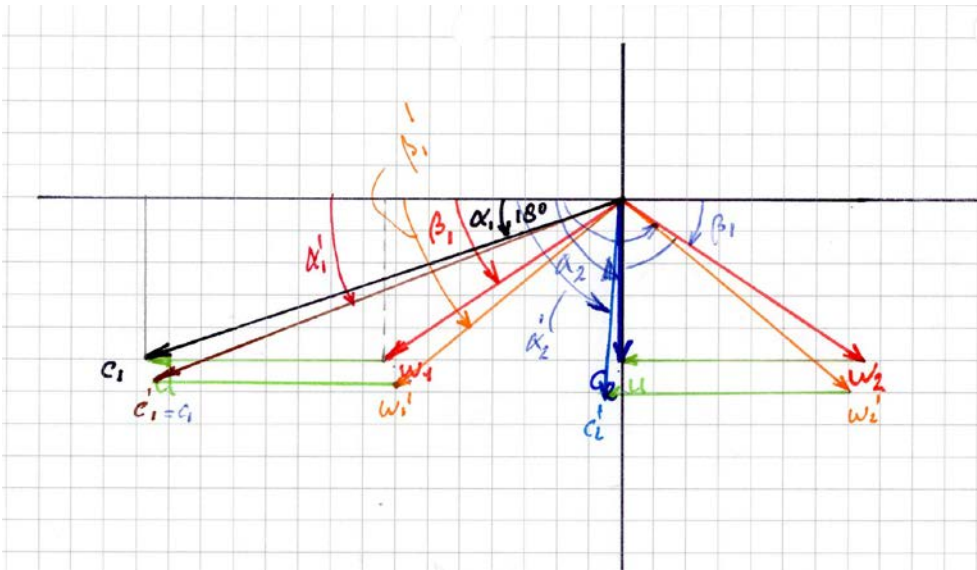
bij  $f = 59,52$  Hz geldt dan:  $\frac{59,52}{60} = 1 + 0,03 - 0,00042857 \cdot \frac{P}{P_{\text{nom}}}$

$$\frac{P}{P_{\text{nom}}} = \frac{(0,992 - 1 - 0,03)}{(-0,00042857)} = 88,67\%$$



#### Vraag 4:

Hierbij wordt gebruik gemaakt van onderstaande figuur.



Stel voor de loopschoepen de absolute intredesnelheid  $c_1$  met bijbehorende intredehoek  $\alpha_1$ , de omtrekssnelheid  $u$  en de relatieve intredesnelheid  $w_1$  met intredehoek  $\beta_1$ . Stel in de uitrede de absolute snelheid  $c_2$  met bijbehorende uittredehoek  $\alpha_2$  en de relatieve snelheid  $w_2$  met bijbehorende uittredehoek  $\beta_2$ . Voor het tweede geval, bij  $21^\circ$ , worden deze symbolen voorzien van een accent.

#### Oorspronkelijke situatie:

$$\alpha_1 = 18^\circ$$

$$u = 0,5 \cdot c_1 \cdot \cos \alpha_1 = 0,4755 \cdot c_1$$

$$w_1^2 = c_1^2 \cdot \sin^2 \alpha_1 + 0,25 \cdot c_1^2 \cdot \cos^2 \alpha_1$$

$$w_1 = c_1 \cdot (0,09549 + 0,22613)^{0,5} = c_1 \cdot 0,5671$$

$$\frac{u}{w_1} = \cos \beta_1 \rightarrow \cos \beta_1 = \frac{0,4755 \cdot c_1}{0,5671 \cdot c_1} = 0,8385 \rightarrow \beta_1 = 33,015^\circ$$

$$w_2 = w_1 \rightarrow w_2 = c_1 \cdot 0,5671$$

$$\beta_2 = 180 - \beta_1 = 180 - 33,015 = 146,985^\circ$$

$$\alpha_2 = 90^\circ$$

$$c_2 = w_2 \cdot \cos(90 - \beta_1) = c_1 \cdot 0,5671 \cdot \cos(90 - 33,015) \rightarrow$$

$$c_2 = c_1 \cdot 0,30899$$

$$\Delta c_u = c_1 \cdot \cos \alpha_1 - c_2 \cdot \cos \alpha_2 = c_1 \cdot \cos 18 - c_2 \cdot \cos 90 \rightarrow$$

$$\Delta c_u = c_1 \cdot 0,95106$$

en dus

$$\eta_{str18} = \Delta c_u \cdot \frac{u}{(1000 \cdot \Delta h_0)} = \frac{c_1 \cdot 0,95106 \cdot 0,4755 \cdot c_1}{(1000 \cdot \Delta h_0)}$$

$$\eta_{str18} = c_1^2 \cdot \frac{0,45222}{(1000 \cdot \Delta h_0)}$$

#### Situatie na overhaul

$\alpha_1 = 21^\circ$ ,  $u = \text{constant}$  en  $c_1 = \text{constant}$  ) (hier zit de crux)  
 en ook hier  $w_1' = w_2'$  (vanwege continuïteitswet)  
 ( In deze aannames blijkt het inzicht van de kandidaat in de materie)

dus:  $u = 0,4755 \cdot c_1$

$$w_1'^2 = c_1^2 \cdot \sin^2 \alpha_1' + (c_1 \cdot \cos \alpha_1' - u)^2 = c_1^2 \cdot 0,1284 + (c_1 \cdot 0,9336 - c_1 \cdot 0,4755)^2$$

$$= c_1^2 \cdot 0,1284 + c_1^2 \cdot 0,2099 \rightarrow w_1' = 0,5816 \cdot c_1$$

$$\sin \beta_1' = \frac{c_1 \cdot \sin \alpha_1'}{w_1} = \frac{c_1 \cdot 0,3584}{0,5816 \cdot c_1} = 0,6162$$

$\rightarrow \beta_1' = 38,04^\circ$

$w_2' = w_1' = 0,5816 \cdot c_1$  en  $\beta_2' = 180 - 38,04^\circ = 141,96^\circ$

**Bepaling  $\alpha_2'$  :**

$$\text{tg}(90^\circ - \alpha_1') = \frac{u - w_2' \cdot \cos \beta_1'}{w_2' \cdot \sin \beta_1'}$$

$$= \frac{(0,4755 \cdot c_1 - 0,5816 \cdot c_1 \cdot \cos 38,04)}{(0,6162 \cdot \sin 38,04)} = 0,04866$$

$\rightarrow \alpha_2' = 87,21^\circ$

**Bepaling  $c_2'$  :**

$$\sin(90^\circ - \alpha_2') = \frac{u - w_2' \cdot \cos \beta_1'}{c_2'}$$

$$= \frac{0,4755 \cdot c_1 - 0,5816 \cdot c_1 \cdot \cos 38,04}{c_2'}$$

$\rightarrow c_2' = 0,3583 \cdot c_1$

$\Delta c_u' = c_1' \cdot \cos \alpha_1' - c_2' \cdot \cos \alpha_2' = c_1 \cdot \cos 21 - 0,3583 \cdot c_1 \cdot \cos 87,21 = 0,9336 \cdot c_1 - 0,01744 c_1$   
 $\Delta c_u' = c_1 \cdot 0,9162$

en dus

$$\eta_{str21} = \Delta c_u' \cdot \frac{u}{(1000 \cdot \Delta h_0)} = \frac{c_1 \cdot 0,9162 \cdot 0,4755 \cdot c_1}{(1000 \cdot \Delta h_0)}$$

$$\eta_{str21} = c_1^2 \cdot \frac{0,4356}{(1000 \cdot \Delta h_0)}$$

Er is dus een rendementsafname en wel met :

$$\frac{\eta_{str18} - \eta_{str21}}{\eta_{str18}} \cdot 100\% =$$

$$\frac{\left( \frac{c_1^2 \cdot 0,45222}{1000 \cdot \Delta h_0} \right) - \left( \frac{c_1^2 \cdot 0,4356}{1000 \cdot \Delta h_0} \right)}{\left( \frac{c_1^2 \cdot 0,45222}{1000 \cdot \Delta h_0} \right)} \cdot 100\% =$$

$$\frac{\eta_{str18} - \eta_{str21}}{\eta_{str18}} \cdot 100\% = 3,67\%$$



*Opgemerkt wordt, dat als het antwoord ligt tussen 3,1% en 4,2%, dit als goed moet worden aangemerkt. Immers, indien de snelheden worden bepaald door het opmeten van de snelheidsvectoren, ontstaan er afwijkingen.*

## Vraag 5

Ventilator: 1000 m<sup>3</sup>/hr gedurende 5 uren → door de machine 5000 m<sup>3</sup> droge lucht.  
Er is dan 5000 · 1,112 = 5560 kg droge lucht verplaatst.

$$H_w = m_w \cdot (h_{d40} - h_{w15}) = m_w \cdot (r + c_p \cdot \Delta T) = m_w \cdot (2500 + 104,67) = m_w \cdot 2604,67 \text{ kJ}$$

De af te voeren warmte per kg droge lucht  $\Delta h_{vl}$  wordt hiermede:

$$\Delta h_{vl} = \frac{H_w}{m_{dl}} = m_w \cdot \frac{2604,67}{5560} = m_w \cdot 0,4685 \text{ kJ/kg}$$

$$\Delta h_{vl} = h_{v140} - h_{v115}$$

$$h_{v115} = 15 + \frac{2500 \cdot 2}{1000} + \frac{1,92 \cdot 2}{1000} \cdot 15 = 20,06 \text{ kJ/kg droge lucht.}$$

$$h_{v140} = 40 + \frac{2500 \cdot 49,52}{1000} + \frac{1,92 \cdot 49,52}{1000} \cdot 40 = 167,62 \text{ kJ/kg droge lucht.}$$

$$\Delta h_{vl} = h_{v140} - h_{v115} = 167,62 - 20,06 = 147,56 \text{ kJ/kg droge lucht.}$$

$$m_w \cdot 0,4685 = 147,56$$

$$m_w = \frac{147,56}{0,4685} = 314,96 \text{ kg}$$

Soortelijke massa water = 1 kg/liter → Er is maximaal **315 liter** water afgevoerd.