

Algemene Instructies

Experimenteel examen (20 punten)

6 juli 2025

Het niet naleven van een van de volgende regels kan leiden tot diskwalificatie. Het experimentele examen duurt 5 uur en is in totaal 20 punten waard. Het begin en einde van het examen worden aangekondigd, evenals elk uur, met vermelding van de verstreken tijd. Dat wordt ook gedaan dertig, vijftien en vijf minuten voor het einde van het examen.

Succes, Ad en Bouke.

Voor het examen

Open de enveloppen of dozen niet voordat dit wordt aangegeven. Het volgende wordt verstrekt voor gebruik bij het experiment: (1) een pen, (2) een wetenschappelijke rekenmachine.

Tijdens het examen

- Gebruik de verstrekte pen.
- Gebruik de **A**-bladen voor je definitieve antwoorden. Vul de betreffende secties in met je antwoorden en noodzakelijke opmerkingen. Teken de benodigde grafieken.
- Blanco werkbladen met de letter W zijn beschikbaar voor berekeningen. Gebruik deze bladen. Streep onnodige antwoorden en concepten die niet beoordeeld mogen worden door met een X. Gebruik alleen de voorkant van elk blad en houd de marge aan de rand vrij. De achterkant van de bladen wordt niet ingescand en dus niet beoordeeld
- Antwoorden moeten beknopt en leesbaar zijn. Gebruik vergelijkingen, logische operatoren, symbolen en schema's om je ideeën duidelijk te maken. Vermijd het gebruik van verklarende teksten, omdat beoordelaars mogelijk niet meertalig zijn.
- Kwantificeer de onzekerheid, tenzij anders vermeld is. Bedenk zelf hoeveel datapunten of meetseries noodzakelijk zijn, tenzij anders aangegeven.
- Verlaat je plaats niet zonder toestemming. Als je naar het toilet moet, water nodig hebt of andere hulp, houd dan het bijbehorende bordje met het "Help"-teken omhoog.

Aan het einde van het examen

- Stop onmiddellijk met schrijven wanneer het einde van het examen wordt omgeroepen.
- Leg alle bladen in de verstrekte envelop. Rangschik ze met de voorkant naar boven in deze volgorde: algemene Instructies, vragenbladen (Q), antwoordbladen (A), werkbladen (W). Sorteer op paginanummer.
- De toezichthouders zullen je meedelen wanneer je kunt vertrekken. Neem niets mee uit de zaal ook niet de rekenmachine.

Wij waarderen je medewerking.

Specifieke instructies

Gebruik tijdens het hele examen altijd de waarden van de natuurkundige constanten die in de instructies gegeven zijn, tenzij anders aangegeven. Wanneer je een reeks metingen uitvoert, geef dan in de tabellen duidelijk aan welke waarden gemeten zijn en welke waarden in de grafieken zijn weergegeven. Let erop dat je het juiste aantal significante cijfers noteert. Uit alle grafieken moet duidelijk blijken welke grootheden weergegeven zijn. Vermeld altijd de eenheden van alle gebruikte waarden.

Ideaal gas, dampdruk en warmtegeleiding [20 punten]

In dit experiment bestudeer je drie natuurkundige verschijnselen: het gedrag van een ideaal gas, de dampdruk van water en warmteoverdracht door geleiding. Het doel van het experiment is om de relaties tussen druk P , luchtvolume V , temperatuur T en tijd t te analyseren. Je moet resultaten in relevante grafieken weergeven en de bijbehorende natuurkundige constanten en de daarmee samenhangende onzekerheden schatten.

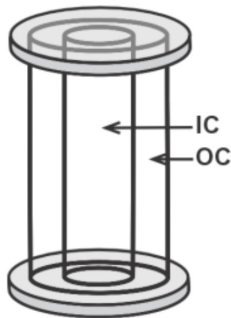


Fig.1a



Fig.1b

Overzicht van de proefopstelling

Lees, voordat je met het experiment begint, de montagebeschrijving, de materiaallijst, de algemene instructies en de procedure voor elk onderdeel van het examen door.

De opstelling bestaat uit twee concentrische cilinders van acryl (Fig. 1a). De binnenste cilinder (hierna **IC**) kan lucht en vloeistof bevatten. De lucht in **de IC** wordt aangeduid als ingesloten lucht (hierna **CA**). De hoeveelheid vloeistof in de **IC** kan worden geregeld door de spuit aan **slang D** aan te sluiten.

De buitenste cilinder (hierna **OC**) kan alleen met water worden gevuld en fungeert als een thermische mantel. Het waterpeil ervan kan worden aangepast met behulp van inlaat- en uitlaatslangen en kleppen. De temperatuur wordt geregeld door een elektrische verwarming. In de **IC** zijn twee sensoren geïnstalleerd: één voor druk en één voor temperatuur. In de **OC** is een aparte temperatuursensor aanwezig.

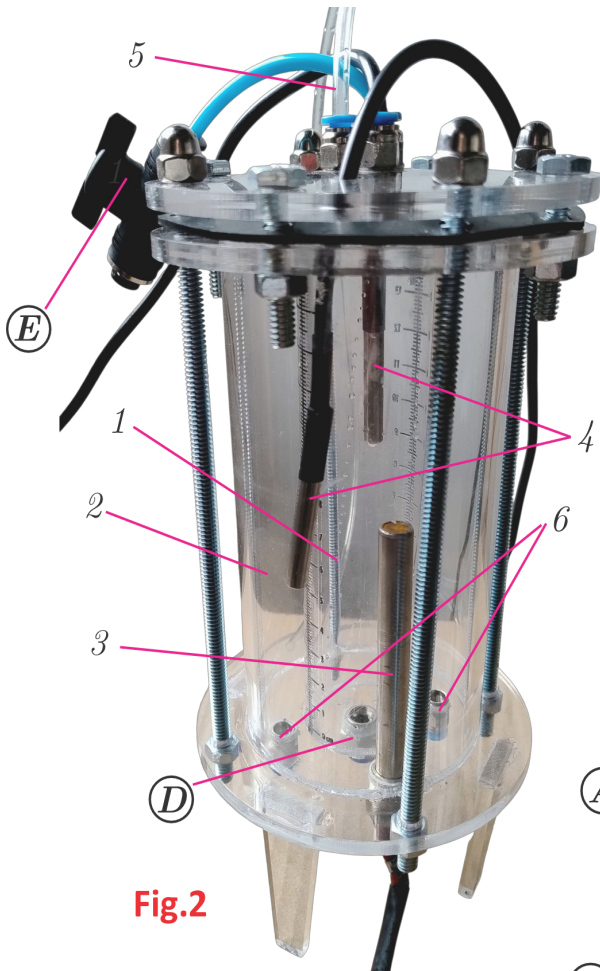


Fig.2



Fig.3



Fig.4



Fig.5

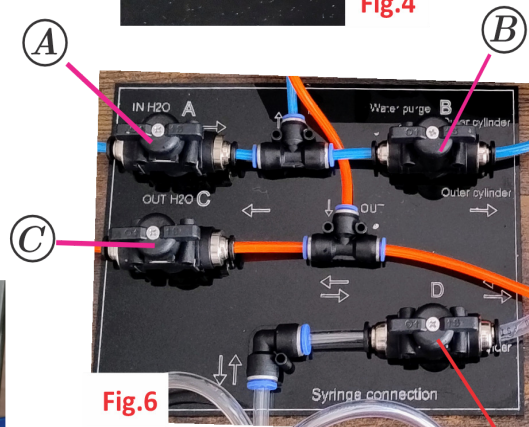


Fig.6

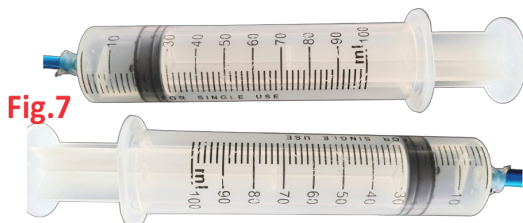


Fig.7



Fig.8

Experimentele apparatuur

Hoofdapparaat (zie afb. 2)

1. **Binnencilinder (IC):** voorzien van schaalverdeling in stappen van twee centimeter. De vaste deksels maken de cilinder luchtdicht.
2. **Buitencilinder (OC):** fungeert als thermische mantel.
3. **Verwarmingselement:** geïnstalleerd in de **OC** en aangestuurd door de elektronische module.
4. **Temperatuursensoren:** twee sensoren, die via zwarte snoeren met de elektronische module zijn verbonden, meten de temperatuur in elke cilinder.
5. **Slang voor de druksensor:** verbindt de **CA** met een druksensor in de elektronische module, waardoor de interne druk gemeten kan worden.
6. **Wateraansluitingen OC:** twee slangen zorgen voor de watertoevoer toe- en afvoer van de **OC**.

Klep E — Aansluiting van de IC op de buitenlucht: opent of sluit de verbinding tussen de **IC** en de buitenlucht.

Elektronische module (zie afb. 3)

De elektronische module moet vóór gebruik op het stroomnet worden aangesloten. De aan/uitschakelaar, met het opschrift '**Power**', bevindt zich aan de achterzijde van de module (afb. 4).

Het digitale display geeft de volgende waarden weer:

- **Interne druk:** druk binnenin de **IC** (**INT. PRESSURE**).
- **Atmosferische druk:** lokale luchtdruk (**ATM. PRESSURE**).
- **Interne temperatuur:** temperatuur binnenin de **IC** (**INT. TEMPERATURE**).
- **Externe temperatuur:** temperatuur in de **OC** (**EXT. TEMPERATURE**).
- **Stopwatch:** timerwaarde (**TIMER**).

De vier genummerde knoppen onder het scherm regelen de belangrijkste functies van de module:

- **Knop 1 — Timer:** start of stopt de stopwatch.
- **Knop 2 — Reset:** wist de timerwaarde.
- **Knop 3 — Grafische weergave:** schakelt tussen grafische weergave en numerieke weergave.
Deze functie wordt niet gebruikt in de experimenten.
- **Knop 4 — Verwarming:** schakelt de verwarming in of uit. Wanneer de verwarming actief is, wisselt de geanimeerde indicator in de rechteronderhoek van het scherm van kleur tussen rood en groen.

Opmerking: Schakel het verwarmingselement nooit in als deze niet volledig in water is ondergedompeld. Wanneer de OC-temperatuur 65 °C bereikt, wordt het verwarmingselement uitgeschakeld. Deze mag pas weer worden ingeschakeld nadat de geanimeerde indicator niet langer rood is.

De rechterkant van de module (afb. 5) bevat de aansluitingen voor de **IC**-temperatuursensor (Internal Temp.), de **OC**-temperatuursensor (**External Temperature**), de verwarming (**Water Heater**) en de slang die **de CA** verbindt met de druksensor (**Internal Pressure**).

Hydraulische module (zie afb. 6)

De hydraulische module bevat vier kleppen, aangeduid met **A**, **B**, **C** en **D**. Elke klep regelt een specifiek vloeistofpad in het apparaat:

- **Klep A — Watertoevoer naar OC:** regelt de waterstroom naar de **OC** via **slang A (IN H2O)**.
- **Klep B — Recirculatieklep:** regelt de waterstroom door de recirculatiecyclus, zoals beschreven in de onderstaande instructies voor het gebruik van de pomp.
- **Klep C — Wateruitlaat uit de OC:** regelt de waterstroom uit de **OC** via **slang C (OUT H2O)**.
- **Klep D — Spuitverbinding:** regelt de in- en uitstroom van vloeistoffen in de **IC** met behulp van de spuit die is aangesloten op **slang D** (afb. 2). Als de klep lekt, kunt je de slang loskoppelen van de opstelling en de spuit rechtstreeks op de slang aansluiten.

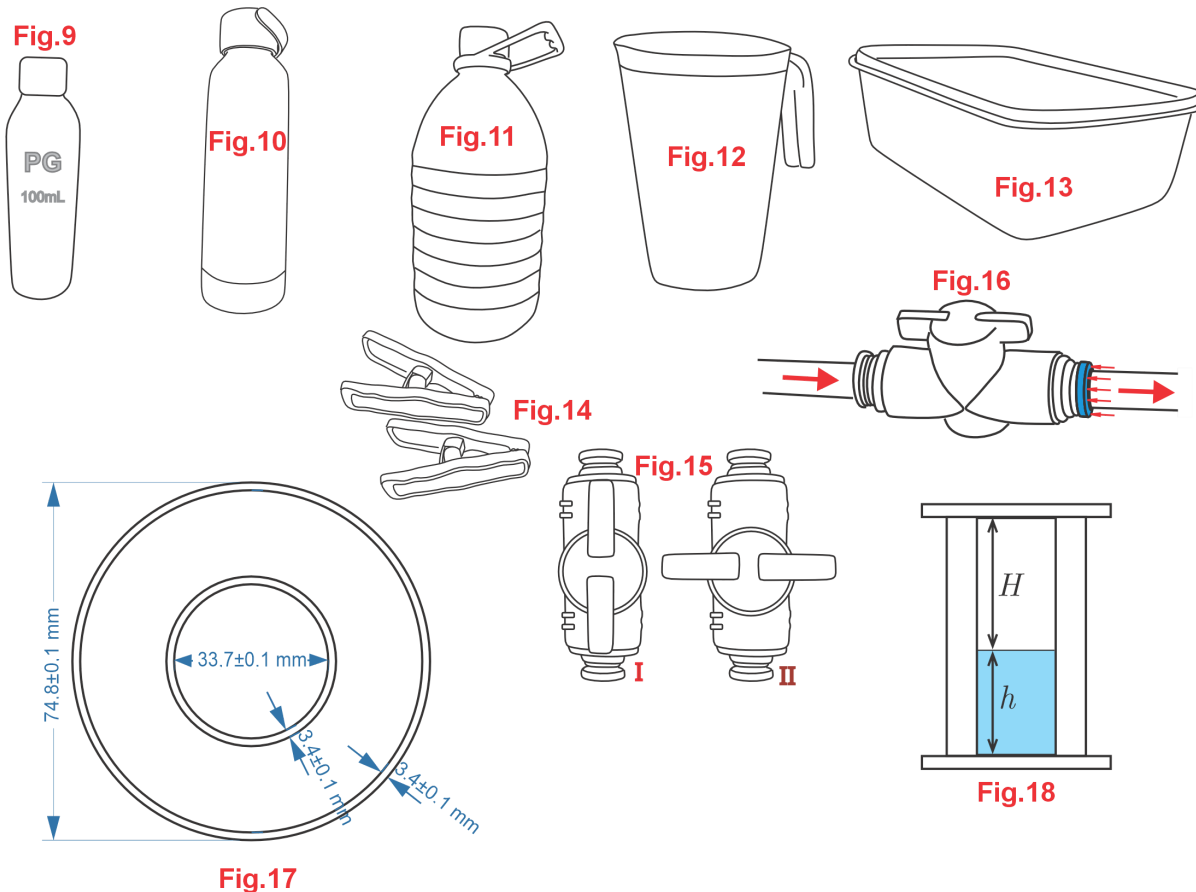
Werking van de pomp en de kleppen

De pompschakelaar (**PUMP**), die zich aan de voorkant van de elektronische module bevindt (afb. 8), activeert de pomp in de elektronische module. Stel, voordat je de pomp inschakelt, de kleppen in overeenkomstig de handeling die je wilt uitvoeren. Bevestig de slangen met de klemmen aan de rand van de reservoirs voordat u de pomp in werking stelt.

- **Vul de OC met water:** open **klep A** en sluit **kleppen B** en **C**. Plaats **slang A** in een watercontainer. Sluit **klep A** zodra het gewenste niveau is bereikt. Zorg ervoor dat het waterpeil minimaal 1 cm onder het deksel van de cilinder blijft. *Als er niet voldoende water in de OC stroomt, open en sluit dan onmiddellijk **klep B** om de pomp door te spoelen.*
- **Laat het water uit de OC lopen:** sluit **klep A** en open **kleppen B** en **C**. Plaats **slang C** in een bak om het water op te vangen.
- **De temperatuur van de OC gelijkmatig maken:** open **klep B** en sluit **kleppen A** en **C**. In deze opstelling circuleert het water in een gesloten kringloop door de **OC**, waardoor de temperatuur gelijkmatig wordt verdeeld.

Sluit voor de volgende handelingen de spuit aan op **slang D**. De pomp wordt in deze gevallen niet gebruikt.

- **Vloeistof toe aan de IC toevoegen:** open **kleppen D en E** en gebruik vervolgens de spuit om de vloeistof toe te voeren.
- **Vloeistof uit de IC verwijderen:** open **kleppen D en E** en gebruik vervolgens de spuit om de vloeistof af te tappen.



Extra benodigdheden: de volgende materialen worden voor het experiment meegeleverd.

- **Twee spuitjes van 100 mL** met een verbindingsslang (afb. 7). Het ene spuitje is voor water, het andere voor **PG**.
- **Propyleenglycol (PG):** een verpakking met 100 ml **PG**, waarvan de dampdruk verwaarloosbaar is binnen het temperatuurbereik dat in dit experiment wordt gebruikt (afb. 9). **Waarschuwing: PG is oplosbaar met water.** Het kan ook vocht opnemen als het aan de lucht wordt blootgesteld. Het wordt aangeraden de container gesloten te houden wanneer deze niet wordt gebruikt.
- **Koud water:** een thermoskan met 500 ml koud water (afb. 10).
- **Water op kamertemperatuur:** een fles water op kamertemperatuur (Fig. 11).
- **Gietbakje:** een bakje dat wordt gebruikt om water in te gieten (Fig. 12).

- **Kan voor overtollig water:** een kan om overtollig water op te vangen (afb. 13).
- **Klemmen:** om slangetjes vast te zetten en onderdelen te ondersteunen tijdens het experiment (afb. 14).
- **Papieren doekjes** om gelekt water op te nemen.

Belangrijke opmerkingen over het gebruik

Houd rekening met de volgende opmerkingen bij het opzetten en bedienen van de opstelling:

- **Klepstanden:** elke klep heeft slechts twee standen: open (**I**) en gesloten (**II**) (afb. 15).
- **Slangaansluiting:** om een slang te verwijderen, duw je de beugel naar buiten en trek je de slang eruit. Om een slang aan te sluiten, schuif je deze zo ver mogelijk in de opening (afb. 16). **Merk op dat de opstelling aan het begin van het examen volledig is gemonteerd en dat de slangen bij normaal gebruik van de opstelling doorgaans niet opnieuw hoeven te worden aangesloten.**
- **Afmetingen van de cilinders:** figuur 17 toont een dwarsdoorsnede met afmetingen van de cilinders.
- **Notatie:** figuur 18 definieert de notatie die wordt gebruikt parameters binnen de **IC**: h is de hoogte van de vloeistof en H is de hoogte van de lucht boven de vloeistof.
- **Volumecorrecties:** het inwendige volume van de verbindingsslangen wordt bij benadering gecompenseerd door het volume van de temperatuursensor in de **IC**. Daarom kunnen deze effecten buiten beschouwing worden gelaten.

Constanten en referentiewaarden

De volgende constanten en referentiewaarden worden gedurende het experiment gebruikt:

- **Constante van Avogadro:** $N_A = 6,022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
- **Soortelijke warmte van water:** $c_0 = 4,184 \times 10^3 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$
- **Dichtheid van water:** $\rho_0 = 1000 \text{ kg/m}^3$
- **Molaire massa van water:** $M_0 = 18,02 \text{ g/mol}$
- **Molaire massa van lucht:** $M_a = 28,96 \text{ g/mol}$
- **Molair volume van een ideaal gas onder normale omstandigheden:** $V_m = 22,4 \text{ L/mol}$, voor $T_0 = 273,15 \text{ K}$ en $P_0 = 101,3 \text{ kPa}$

Deel A [4,0 pt]. Isochoor (isovolumetrisch) proces van een ideaal gas

CA voldoet aan de toestandsvergelijking voor een ideaal gas:

$$PV = nRT \quad (1)$$

waarbij R de universele gasconstante is.

Werkwijze

Breng **PG** in **IC** tot $h = 4,5$ cm en sluit de kleppen **D** en **E**. Dit zorgt ervoor dat het volume van **CA** constant is.

De dichtheid van de omgevingslucht in Bucaramanga varieert afhankelijk van de plaatselijke temperatuur en druk. Gebruik voor de volgende vraag de over de tijd gemiddelde waarde $\rho = 1,12$ kg/m³.

A1. [0,4 pt] Bepaal de massa m , het aantal mol n en het totale aantal luchtmoleculen N in de **CA**.

1. Vul **de OC** tot bijna aan de rand met water op kamertemperatuur.
2. Zet het verwarmingselement aan. Vergeet niet de temperatuur gelijkmatig te verdelen met behulp van de pomp.

A2. [1,0 pt] Noteer in een tabel de druk P in de **CA** als functie van de temperatuur T .

A3. [0,9 pt] Teken aan de hand van de gegevens uit vraag A2 het verloop van de druk als functie van de temperatuur.

Onder de wedstrijdvoorwaarden van de IPhO kunnen de sensoren opzettelijk verkeerd gecalibreerd zijn om de verwachte waarde van R ten opzichte van de referentiewaarde te wijzigen.

A4. [1,0 pt] Gebruik de grafiek uit A.3 om de experimentele waarde van R te bepalen.

De thermische drukcoëfficiënt bij constant volume wordt gedefinieerd door de volgende vergelijking:

$$\beta_0 = \frac{1}{P_0} \left(\frac{\Delta P}{\Delta T} \right), \quad (2)$$

waarbij P_0 de druk van het systeem bij de referentietemperatuur T_0 is, zoals aangegeven in het overzicht van constanten en referentiewaarden.

A5. [0,7 pt] Bepaal de waarde van de coëfficiënt β_0 voor lucht.

Verwijder de PG uit de IC voordat u verdergaat met de andere onderdelen. Als je doorgaat naar onderdeel B, laat het hete water dan in de OC zitten.

Deel B [8,0 pt]. Dampdruk

In een gesloten vat waarin zich een vloeistof en de damp daarvan in evenwicht bevinden, is de dampdruk afhankelijk van de absolute temperatuur T volgens de vergelijking van Clausius-Clapeyron:

$$P_v = P_{v0} e^{-\frac{Q_v}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)} \quad (3)$$

Hierbij is T_0 de referentietemperatuur, die als 0 °C wordt genomen. P_{v0} is de dampdruk bij T_0 . R is de universele gasconstante en Q_v is de molaire latente verdampingswarmte van water.

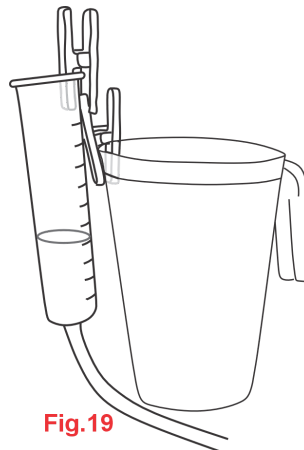


Fig.19

Werkwijze

Houd er rekening mee dat PG en water mengbaar zijn. Gebruik verschillende spuitten voor water en PG

- Vul de **OC** met water tot het waterpeil bijna de bovenkant bereikt.
- Vul een spuit met water, sluit deze aan op **de IC** en open klep **E**, verwijder de zuiger van de spuit en breng de spuit omhoog totdat deze het waterpeil bij $h = 5,0$ cm bereikt. Sluit klep **E** en bevestig vervolgens de spuit aan de kan zoals weergegeven in figuur 19. Deze opstelling houdt de druk in de **IC** ongeveer gelijk aan de atmosferische druk. Zorg ervoor dat er geen luchtbelletjes in de slang achterblijven.
- Verwarm het water in de **OC** tot $65\text{ }^{\circ}\text{C}$. Vergeet niet het recirculatiesysteem te gebruiken om de watertemperatuur gelijkmatig te maken in de thermische mantel.
- Wacht tot de temperatuur begint te dalen om H als functie van T te gaan registreren.
- Om de temperatuur verder te verlagen, kun je het water in de **OC** op het juiste moment vervangen door het meegeleverde koude water.

B1. [1,0 pt] Meet de hoogte H als functie van de temperatuur T . Schrijf je resultaten in een tabel.

B2. [1,0 pt] Gebruik de in B1 verkregen gegevens om H als functie van T uit te zetten.

Bij omgevingstemperatuur is de dampdruk relatief klein en kan de $H(T)$ -curve worden benaderd als lineair.

B3. [0,5 pt] Gebruik de grafiek van B2 om de waarde van H_0 (H bij $0\text{ }^{\circ}\text{C}$) te bepalen door extrapolatie.

B4. [1,0 pt] Stel dat **IC** zowel lucht als waterdamp bevat. Leid een algebraïsche uitdrukking af voor de dampdruk P_v in termen van P_{atm} (luchtdruk), H_0 , H , T_0 en T . Voor deze opgave mag je aannemen dat de dampdruk bij $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ nul is.

Gebruik voor de volgende vragen de referentiewaarde $R = 8,31\text{ J/(mol}\cdot\text{K)}$.

B5. [4,0 pt] Maak met behulp van vergelijking (3) en de uitdrukking uit vraag B4 een geschikte grafiek om de experimentele waarde van Q_v te bepalen.

B6. [0,5 pt] Bereken aan de hand van de waarde van Q_v de waarde van L_v (de latente verdampingswarmte per massa-eenheid) en vermeld daarbij de formule die je hebt gebruikt.

Deel C [8,0 pt]. Warmtegeleiding

In dit deel van het examen bestudeer je de warmte-uitwisseling tussen het water in de **OC** en het water in de **IC** via de wand die beide ruimtes van elkaar scheidt. Het doel van dit onderdeel is om de effectieve thermische weerstand van de wand, de evenwichtstemperatuur van het systeem en de thermische geleidbaarheid van acryl te schatten, door de tijdsafhankelijke ontwikkeling van de watertemperatuur in de **IC** (T_{IC}) en de watertemperatuur in de **OC** (T_{OC}) te analyseren,

Warmtegeleiding door een vaste wand volgt de volgende relatie:

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{1}{R_{Th}} (T_{OC} - T_{IC}) \quad (4)$$

waarbij ΔQ de warmte is die het water in de **IC** via de wand ontvangt gedurende het tijdsinterval Δt . De effectieve thermische weerstand R_{Th} hangt af van het materiaal en de geometrie van de wand die de **IC** en de **OC** van elkaar scheidt.

Werkwijze

1. Stel het waterpeil in de **OC** in op $h = 15$ cm.
2. Verwarm het water in de **OC** tot 65°C . Gebruik de pomp om de watertemperatuur gelijkmatig te verdelen.
3. Stel het waterpeil in de **IC** in op $h = 10$ cm en start de stopwatch.

C1. [1,0 pt] Meet de interne temperatuur T_{IC} en de externe temperatuur T_{OC} als functie van de tijd t .

C2. [1,0 pt] Geef in één grafiek de waarden van T_{IC} en T_{OC} weer als functies van de tijd t .

Negeer bij de vragen C3 en C4 de warmtecapaciteit van de opstelling. T_{eq} verwijst naar de evenwichtstemperatuur die zowel IC als OC zouden bereiken als er geen warmteoverdracht naar de omgeving zou plaatsvinden.

C3. [0,7 pt] Zet $T_{OC} - T_{IC}$ uit als functies van zowel T_{OC} als T_{IC} in dezelfde grafiek, waarbij T_{OC} en T_{IC} samen op dezelfde temperatuuras staan en $T_{OC} - T_{IC}$ op de andere as.

C4. [1,1 pt] Bepaal T_{eq} aan de hand van de grafieken die in C3 zijn getekend. Het is niet nodig om voor deze vraag de onzekerheid te berekenen.

Als de variabelen een eindig aantal keren worden gemeten, kan vergelijking (4) als volgt worden uitgedrukt:

$$\frac{T_{IC,j} - T_{IC,(j-1)}}{t_j - t_{j-1}} \propto \bar{T}_{OC} - \bar{T}_{IC} \quad (5)$$

waarbij j het meetnummer vertegenwoordigt en $\bar{T}$ de gemiddelde temperatuur is bij de respectievelijke cilinder gedurende het interval van t_{j-1} tot t_j .

C5. [1,0 pt] Teken de uitdrukking aan de linkerkant van vergelijking 5 grafisch als een functie van de uitdrukking aan de rechterkant.

C6. [1,6 pt] Bepaal de waarde van R_{Th} aan de hand van de grafiek die in C5 is getekend.

De wet van Fourier voor radiale warmtegeleiding door een dunne cilindrische wand kan als volgt worden geschreven:

$$\frac{dQ}{dt} = -\lambda A \frac{dT}{dr} \quad (6)$$

waarbij A de oppervlakte van de wand is, λ de warmtegeleidingscoëfficiënt van het wandmateriaal is en r de afstand tot de as van de cilinder aangeeft.

C7. [1,6 pt] Bepaal met behulp van vergelijkingen (4) en (6) de waarde λ van de warmtegeleidingscoëfficiënt van acryl (het materiaal dat IC en OC van elkaar scheidt), en geef aan welke formule je hebt gebruikt.