

E52: Fysische Transportverschijnselen - III

Moduulnaam	:	Fysische Transportverschijnselen - III
Moduulcode	:	E52
Studielast	:	40 studiebelastingsuren
Vakgroep	:	Energie- & Procestechniek
Docenten	:	G. P. Beukema, M. van de Ven
Auteur	:	G. P. Beukema

Inhoudsopgave

Inhoudsopgave	1
1. Modulebeschrijving	3
1.1. Inleiding	3
1.2. Doelstellingen	3
1.3. Leerdoelen	3
1.3. Organisatie	3
1.5. Onderwijs en leermiddelen	4
Opmerking: beide drukken van Mills "Heat Transfer" verschillen alleen in het aantal opgaven, daardoor is de nummering van de opgaven anders en de nummering van de bladzijden ook. In de studiehandleiding is de nummering (zowel van de opgaven als van de bladzijden) van de eerste druk aangehouden, tussen haakjes is de nummering van de tweede druk vermeld.	Fout! Bladwijzer niet gedefinieerd.
1.6. Vereiste voorkennis	4
1.7. Toetsen en beoordelen	4
2. Uitwerking studietaken	5
2.1. Week 1: Inleiding. Warmteoverdracht d.m.v. geleiding	5
Leerdoelen week 1	5
Instructieopgaven week 1	5
Aanwijzingen bij de instructieopgaven week 1	6
2.2. Week 2: Warmteoverdracht d.m.v. straling en d.m.v. convectie, thermische circuits, energiebalans aan het oppervlak	7
Leerdoelen week 2:.....	8
Instructieopgaven week 2	8
Aanwijzingen bij de instructieopgaven week 2:	8
2.3. Week 3: Warmteoverdracht d.m.v. geleiding (vervolg) en gedwongen convectie, thermische weerstand	10
Leerdoelen week 3:.....	10
Instructie opgaven week 3:	10
Aanwijzingen bij de instructieopgaven week 3:	10
2.4. Week 4: Responsietijd. Convectie en straling gecombineerd. Computerprogramma LUMP. Warmtewisselaars	12
Instructieopgaven week 4:	12
Aanwijzingen bij de instructieopgaven van week 4:	13

2.5. Week 5: Convector nader bekeken. Kengetallen. Computerprogramma CONV.....	14
Instructieopgaven week 5:	15
Opmerkingen	15
Aanwijzingen bij de instructieopgaven van week 5:	15
2.6. Week 6: Convector nader bekeken (slot).....	17
Leerdoelen week 6:	18
Instructieopgaven week 6:	18
Aanwijzingen bij de instructieopgaven van week 6:	18
2.7. Week 7: Herhaling, wegwerken van achterstanden.....	19

1. Modulebeschrijving

1.1. Inleiding

Fysische transportverschijnselen-III is een onderdeel van het vak Energieleer. De Energieleer houdt zich bezig met beschouwingen over energie-omzettingen en energie-overdrachten, kortweg energieprocessen, in apparaten en installaties. Bij energieoverdrachten, waar warmteoverdracht een onderdeel van uitmaakt, is sprake van een aantal fundamenteel verschillende processen, die vaak tegelijkertijd kunnen voorkomen. We zullen de processen eerst zoveel mogelijk apart beschouwen om vervolgens te komen tot een meer geïntegreerde aanpak. Daarbij vindt altijd een afschatting plaats van de importantie van elk van de fundamentele processen. Deze afschatting is vaak gebaseerd op experimenteel onderzoek. In het boek, dat wij gebruiken, staan veel oplossingsmethoden. Het is zo opgezet, dat het gebruikt kan worden als leerboek, maar ook als naslagwerk voor meer praktische problemen. Om niet door al het rekenwerk te worden afgeleid, maken we gebruik van een aantal bijgeleverde computerprogramma's. Bij deelontwerpen van de wasmachine kan hier gebruik van gemaakt worden.

Naast de theoriemodule E52 zal een ondersteunende practicummodule E52p worden aangeboden. Tijdens het practicum worden metingen verricht aan processen die tijdens de theoriemodule zijn ingeleid. Er kan bij de verwerking van de meetresultaten gebruik gemaakt worden van de bij het boek horende computerprogramma's.

1.2. Doelstellingen

De doelstellingen van deze module zijn:

- het verwerven van basiskennis voor het berekenen van warmteoverdracht in niet al te ingewikkelde situaties: **rechte wanden zonder en met isolatie, buizen zonder en met isolatie bij gedwongen convectie**;
- het verkrijgen van inzicht in fysische processen bij warmteoverdracht en het kunnen **kies**en van een **praktisch oplossingsmodel**;
- inleiding op het vakgebied **warmtewisselaars** (onderdeel van E6)

1.3. Leerdoelen

- bepalen van warmte-overdrachtscoëfficiënten en warmtedoorgangscoefficienten voor bovengenoemde situaties;
- ervaring opdoen met het maken van gerichte keuzes m.b.t. een oplossingsmodel;

1.3. Organisatie

Eén dagdeel warmteoverdracht per week gedurende zeven weken. Deze middag is opgedeeld in twee delen:

- Twee lessen in de collegezaal.
- De docent behandelt de stof van één week aan de hand van 2 à 3 kernen. Deze kernen zijn overzichtelijk aangegeven in paragraaf 2 van deze handleiding. De in het college gepresenteerde sheets staan op Internet:
<http://www.fontys.nl/werktuigbouwkunde/medewerker/gbeukema/warmte.html> of op :
<http://home.wanadoo.nl/g.pbeukema/>.
- De rode draad van de theorie wordt in combinatie met voorbeelden behandeld. Tevens wordt een strategie voor het oplossen van bijbehorende opdrachten gegeven.

- Eén lesuur in responsiecollege. Interactief werken in twee kleine collegezalen. De docent bespreekt de door hem opgemerkte struikelpunten, inventariseert en bespreekt oplossingsmethoden en alternatieven interactief met de zaal.

Daarnaast wordt van de student verwacht dat hij/zij thuis de nodige uren aan het vak besteedt, vooral als de drie lessen onvoldoende blijken te zijn om de stof te verwerken.

Er is een ondersteunende practicummodule E52p. Het practicum omvat per koppel studenten één opdracht naar keuze:

- proef 1 (de kA-waarde van een warmtewisselaar, aangevuld met het onderwerp straling)
- proef 2 (stralingsproef, aangevuld met convectie)

Er hoeft geen verslag van gemaakt te worden, de metingen worden verwerkt met het computerprogramma CONV (proef 1) en met RAD1/RAD2 (proef 2). Bovendien bestaat de mogelijkheid de metingen te verwerken met het spreadsheetprogramma Excel. Geadviseerd wordt dat per IW-groep beide proeven gekozen zijn, zodat uitwisseling van ervaring mogelijk is.

1.5. Onderwijs en leermiddelen

Verplicht boek:

A.F.Mills: Heat transfer, 2^e druk, Uitgeverij Prentice Hall, ISBN 0-13-947624-5
Bij het boek hoort een computerprogramma, dat je van internet kunt downloaden (website Prentice Hall en/of warmte-site Beukema)

Verplichte dictaten:

Studiehandleiding E52 (opgenomen in Studiehandleiding TW- en PW-modulen periode 5 en 6, dictaatnr. 8585)
Practicumhandleiding Warmteoverdracht (HE 4244)

1.6. Vereiste voorkennis

HAVO-natuurkunde en differentiëren + integreren (wiskunde)

1.7. Toetsen en beoordelen

Aan het einde van de periode wordt een toets gehouden, gecombineerd met de andere theorievakken.

Verplichte stof voor de toets:

Mills: Hoofdstuk 1, hoofdstuk 2 t/m Example 2.5, hoofdstuk 4 t/m Example 4.6 .
Opmerking: Bij hoofdstuk 4 gaat het vooral om de resultaten: je moet snel een bruikbaar model kunnen vinden voor het probleem.

Tijdens de toets mag gebruik gemaakt worden van:

- een eenvoudige rekenmachine
- het Polytechnisch Zakboekje
- het boek van Mills

Dus geen verdere aantekeningen, geen handouts, geen andere boeken en/of dictaten!

2. Uitwerking studietaken

2.1. Week 1: Inleiding. Warmteoverdracht d.m.v. geleiding

Boek: Hoofdstuk 1, § 1.1 t/m 1.3.1, Example 1.1

kern 1: Relatie warmteoverdracht en thermodynamica (E1):

$$\dot{m}\Delta h = \dot{Q} \text{ met } h = u + pv$$

Let op: in Mills wordt voor de druk de hoofdletter P gebruikt, wij zijn gewend om hiervoor de kleine letter p te schrijven en zullen dat ook hier doen (zie ook blz. 875 (941) t/m 879 (945))

$$\text{Voor ideale gassen : } \Delta h = \int_{T_1}^{T_2} c_p dT$$

$$\text{Voor niet-samendrukbare vloeistoffen: } \Delta h = \int_{T_1}^{T_2} c_v dT + \frac{p_2 - p_1}{\rho} \text{ met } c_p = c_v.$$

meestal te verwaarlozen t.o.v. eerste term

Tweede hoofdwet: als twee voorwerpen met verschillende temperaturen T_1 resp. T_2 met elkaar in contact komen en als $T_1 > T_2$ dan vindt er warmteoverdracht plaats, spontaan en onomkeerbaar van voorwerp 1 naar voorwerp 2 en **neemt de entropie toe.**

kern 2: Warmtegeleiding: wet van Fourier (1-dimensionaal)

$$q = -k \frac{dT}{dx}$$

Begrippen: warmteweerstand en thermisch circuit, analogie met elektrisch circuit.

kern 3: Warmtegeleiding door meerdere lagen, Wet van Ohm, begrip thermische weerstand.

Leerdoelen week 1

de relatie tussen warmteoverdracht en thermodynamica kunnen aangeven

- drie soorten warmteoverdracht kunnen onderscheiden
- de basisvergelijking voor warmtegeleiding kunnen noemen en toepassen in 1-dimensionale situaties

Instructieopgaven week 1

Het is interessant is voor mensen die in de V.S. gaan werken of contacten onderhouden met Amerikaanse bedrijven om opgave 1-5 te maken, m.b.v. het computerprogramma UNITS kun je vrij gemakkelijk zo'n probleem oplossen.

Werk in groepjes van twee à drie aan de volgende studietaken:

kern 1: opgaven 1-2 en 1-3
kern 2: opgaven 1-6, 1-8
kern 3: opgave 1-9

Aanwijzingen bij de instructieopgaven week 1

1-2: stationaire stroming, dichtheid van helium bij in- en uitlaat bepalen m.b.v. $\rho = pM/RT$ (vorm van de ideale gaswet), dan kan m.b.v. $\dot{m} = \rho VA$ de snelheid berekend worden.

Om de warmteoverdracht te bepalen kun je de eerste hoofdwet toepassen waarbij een aantal termen = 0 gesteld kunnen worden.

Commentaar: - in een warmtewisselaar is $\dot{W} = 0$;
- ondanks het feit dat de snelheid van de helium aanzienlijk is, is de kinetische energie bijdrage klein vergeleken met de warmteoverdracht.

1-3 pas vgl. (1.4) en (1.6b) toe.
m.b.v. tabel A.12a kan de temperatuur van de stoom opgezocht worden, evenals de verdampingsenthalpie.

Commentaar: de bijdrage $(p_2 - p_1)/\rho$ aan de enthalpieverandering van de vloeistof kan verwaarloosd worden als je de enthalpieverandering van de warmtewisselaar bepaalt. Ga zelf na dat de eenheid van $(p_2 - p_1)/\rho$ gelijk is aan die van de enthalpie.

1-9: neem aan dat er 1-dimensionale warmtegeleiding plaatsvindt (wanneer mag dat bij de bol). Neem aan dat de warmte weerstand van de tankwand te verwaarlozen is. Gebruik tabel A.12c (blz. 903) om de verdampingsenthalpie op te zoeken, pas $\dot{Q} = \dot{m} h_{fg}$ toe op de 1^e hoofdwet. Gebruik dan vgl. (1.9) om L te berekenen.

Commentaar: omdat de druk op 1 atmosfeer blijft, blijft de vloeibare stikstof op 77,4 K (kookpunt) gedurende de verdamping.

2.2. Week 2: Warmteoverdracht d.m.v. straling en d.m.v. convectie, thermische circuits, energiebalans aan het oppervlak

Boek: Hoofdstuk 1, § 1.3.2 t/m 1.4.2, Examples 1.2 t/m 1.5.

kern 1: Thermische straling:

$$\dot{Q}_{12} = A_1 F_{12} (\sigma T_1^4 - \sigma T_2^4)$$
 met F_{12} is overdrachtscoëfficiënt, afhankelijk van aard en vorm van de oppervlakken 1 en 2 (zie computerprogramma RAD1 en tabel 6.1).
 Simpel voorbeeld: oppervlak 1 omgeven door oppervlak 2 en $A_1 \ll A_2$ dan is:

$$F_{12} = \varepsilon_1 \text{ en } \dot{Q}_{12} = A_1 \varepsilon_1 \sigma_1 (T_1^4 - T_2^4)$$
 met wat wiskunde om te schrijven tot: $\dot{Q}_{12} \approx A_1 h_r (T_1 - T_2)$.

kern 2: Warmteoverdracht d.m.v. convectie

- gedwongen convectie
- vrije (= natuurlijke) convectie
- getal van Reynolds
- warmteoverdrachtscoëfficiënt h_c : $q_s = h_c \Delta T$

Voorbeeld gedwongen convectie: warmteoverdracht d.m.v. convectie naar stromende vloeistof in buis:

$$\Delta T = T_s - T_b \quad \text{met } T_b = \text{(gemiddelde) bulktemperatuur}$$

laminaire stroming: $h_c = 3,66 \frac{k}{D}$

turbulente stroming: $h_c = 0,023 \frac{V^{0,8} k^{0,6} (\rho c_p)^{0,4}}{D^{0,2} \nu^{0,4}}$

- warmtewisselaars
- condensors
- boilers

Voorbeeld: vrije (natuurlijke) convectie:

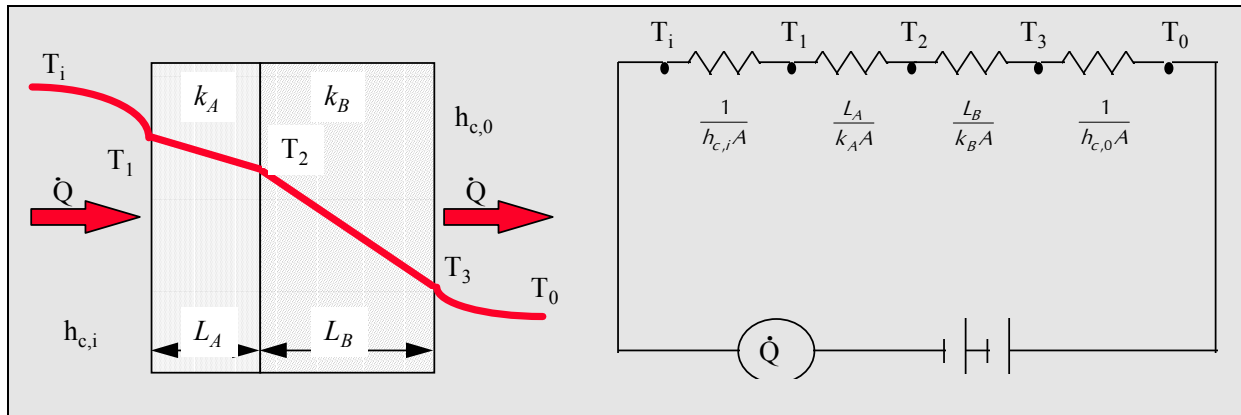
laminair: $q_s \propto \Delta T^{5/4} \Rightarrow h_c \propto \Delta T^{1/4}$

turbulent: $q_s \propto \Delta T^{4/3} \Rightarrow h_c \propto \Delta T^{1/3}$

dus let er op, dat h_c niet altijd constant is !!

kern 3: Gecombineerde vormen van warmteoverdracht, energiebalans aan oppervlak

- analogie met elektrische circuits
- wet van Ohm: $I = \frac{1}{R} \cdot \Delta U$ wet van Newton: $\dot{Q} = UA \cdot \Delta T$
- begrip thermische weerstand: $\frac{1}{UA} = \frac{1}{h_{c,i}} + \frac{L_A}{k_A} + \frac{L_B}{k_B} + \frac{1}{h_{c,o}}$



Leerdoelen week 2:

Na afloop van week 2 kun je:

- de basisvergelijking voor warmtestraling kunnen noemen en toepassen in het geval van voorwerpen met een eenvoudig oppervlak (kubus, cilinder, bol).
- de drie soorten warmteoverdracht van elkaar onderscheiden
- de formules bij eenvoudige gedwongen stroming toepassen.
- m.b.v. een elektrisch analogon een samengesteld warmteoverdrachtsprobleem oplossen
- het begrip thermische weerstand toepassen in de warmte-overdrachtsvergelijking

Instructieopgaven week 2

kern 1: 1-10, 1-11, 1-13

kern 2: Example 1.3, 1-14(1-15), 1-15(1-16)

kern 3: 1-20 (1-21), 1-22 (1-23), 1-23 (1-24), 1-25 (1-35), 1-26 (1-36), 1-29 (1-39)

Aanwijzingen bij de instructieopgaven week 2:

1-10: gebruik vgl. (1.14)

Commentaar: merk op dat q zeer sterk toeneemt met de temperatuur (4^e macht van de absolute temperatuur (in K))

1-14: Re_D uitrekenen voor water, olie en lucht en soort stroming bepalen. Turbulent, dan vgl. (1.22) gebruiken, laminair, dan (1.21).

Commentaar: - merk op dat h_c voor water 86x groter is dan voor lucht, hoewel deze met 10x grotere snelheid stroomt;
- onderzoek de rol van k , ρ , c_p en V in het resultaat.

1-15: zie 1-14

1-20: maak een tekening, gebruik de vgl.^{en} (1.29) en (1.30a)

Commentaar: - er zal ook warmtegeleiding plaatsvinden langs in- en uitlaat en door de grondplaat;
- reken uit hoeveel het kost om het water op te warmen van 20°C naar 65°C ;
- wanneer mag je 1-dimensionaal model gebruiken ?

1-22: maak een tekening, breid vgl. (1.30a) uit tot drie wanden en neem even vgl. (1.32) mee om h_c te vervangen door $h = h_c + h_r$, pas vervolgens vgl. (1.29) toe.

Commentaar: merk op dat het vermiculate (= slakwol) verantwoordelijk is voor 80 % van de thermische weerstand. Dus alleen de dikte + thermische gegevens van het vermiculate hoeven bekend te zijn, de andere warmteweerstanden niet precies.

1-23: gebruik vgl. (1.30a)

1-29: gebruik de vgl.^{en} (1.30b) en (1.32)

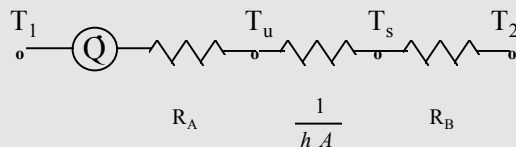
Commentaar: merk op dat de temperatuurgradiënt in PVC veel groter is dan in staal, hoewel het PVC dunner is is zijn thermische geleidbaarheid veel kleiner dan die van staal.

2.3. Week 3: Warmteoverdracht d.m.v. geleiding (vervolg) en gedwongen convectie, thermische weerstand

Boek: § 1.3.3, 1.4.2, 2.1 t/m 2.3.3, Examples 1.3, 1.5, 2.1, 2.2 en 2.3

kern 1: begrip contactweerstand ($\div 1/h_i$); $\dot{Q} = h_i A (T_u - T_s)$

contactweerstand in thermisch circuit:



kern 2: Warmtegeleiding in cilinders: $\dot{Q} = \frac{2\pi kL(T_1 - T_2)}{\ln(r_2 / r_1)}$

thermische weerstand van cilinderwand: $R = \frac{\ln(r_2 / r_1)}{2\pi kL}$

Ga zelf na, dat: met $r_2 = r_1 + \delta$ en $\delta \ll 1$: $R = \frac{\delta}{2\pi r_1 kL} = \frac{\delta}{kA}$ (zie 1.30a)

invloed van dikte isolatiemateriaal, berekening kritische dikte (kostprijs versus energiebesparing)

Leerdoelen week 3:

Na afloop van week 3 kun je:

- het begrip contactweerstand gebruiken bij meerdere lagen-systemen
- in cilinder- en bolsymmetrische voorwerpen de warmteoverdracht bepalen

Instructie opgaven week 3:

kern 1 2-5

kern 2 2-2, 2-8 (2-14), 2-9 (2-15), 2-10 (2-16), 2-11 (2-17), 2-12 (2-18)

herhaling: 2.3, 2.16 (2-29)

Aanwijzingen bij de instructieopgaven week 3:

2-3 veronderstel 1-dimensionale warmtegeleiding, thermische weerstanden in serie:

$$\dot{Q} = \frac{\Delta T}{\sum R} = \frac{\Delta T}{\left[\frac{nt}{k_A A} + \frac{nt}{k_B B} \right]} = \frac{k_A \cdot k_B}{k_A + k_B} \cdot \frac{A \cdot \Delta T}{nt}$$

ook geldt: $\dot{Q} = \frac{k_{\text{eff}} \cdot A}{W} \cdot \Delta T$ met $W = 2nt$.

2-5: teken elektrisch analogon

bepaal $r = \frac{1/h_i}{(L_A + L_B)/k + 1/h_i}$ en teken r als functie van h_i .

2-9: 1-dimensionaal probleem, verwaarloos de thermische weerstand van staal en verwaarloos straling, gebruik vgl. (2.17)

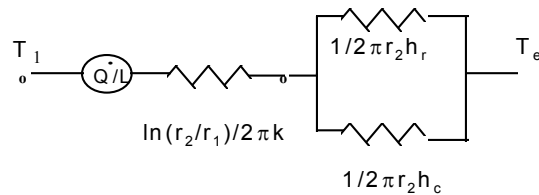
Commentaar: - de thermische weerstand wordt hoofdzakelijk door kurk bepaald
 - als je het kurk afdekt met aluminiumfolie zal er nog minder stralingsverlies zijn t.g.v. een geringere ϵ .

2-10: gebruik vgl. (2.16), maak een schatting van de temperatuur om een waarde voor k te vinden (schat $T_3 = 50^\circ\text{C}$ en kijk in tabel A.3), gebruik vgl. (2.17).

2-11: gebruik vgl.^{en} (2.14) en (1.24)

2-12: gebruik vgl.^{en} (2.16) en (2.17) en tabel A.3 bij $\bar{T} = (500 + 300)/2 = 400\text{ K}$.

2-16: thermisch circuit:



uiteindelijk vergelijking oplossen d.m.v. iteratie.

2.4. Week 4: Responsietijd. Convectie en straling gecombineerd. Computerprogramma LUMP. Warmtewisselaars

Boek: §§ 1.5 en 1.6, Examples 1.6, 1.7, 1.8

kern 1: - Responsietijd
 - voorbeeld: stuk metaal uit oven in oliebad
 - tijdconstante $t_c = \frac{\rho V c}{h_c A}$
 - als $t = t_c$ dan is de temperatuur gezakt tot 36,8 % van de beginwaarde
 - elektrisch analogon

kern 2: Convectie en straling gecombineerd

$$\frac{dT}{dt} = -\frac{\bar{h} A}{\rho V c} (T - T_e) - \frac{\varepsilon A \sigma}{\rho V c} (T^4 - T_e^4)$$

$$\frac{dT^*}{dt^*} + \frac{h}{h_0} T^* = 0 \Rightarrow \text{computerprogramma LUMP}$$

kern 3: Warmtewisselaars
 - energiebalans: $\dot{m}_H h_{H,in} + \dot{m}_C h_{C,in} = \dot{m}_H h_{H,uit} + \dot{m}_C h_{C,uit}$ (zie figuur 1.23 a)
 - effectiviteit: $\varepsilon = 1 - e^{-N_{tu}}$ met $N_{tu} = \frac{U \varphi L}{\dot{m}_C c_{pC}}$ en φ = omtrek
 - energiebalans: $\dot{m}_H h_{H,in} + \dot{m}_C h_{C,in} = \dot{m}_H h_{H,uit} + \dot{m}_C h_{C,uit}$ (zie figuur 1.23 a)
 - ontwerpparameters

Leerdoelen week 4:

- omgaan met warmteoverdracht in niet-evenwichtsituaties (opwarmen en afkoelen)
- toepassen van het lumped thermal capacity model (denk bij lump aan het begrip lump sum financiering van het HBO)
- effectiviteit bepalen van een eenvoudige warmtewisselaar

Instructieopgaven week 4:

kern 1: 1-33 (1-43), 1-34 (1-44), 1-35 (1-45), 1-37 (1-47), 1-40 (1-50)

kern 2: 1-38 (1-48), 1-39 (1-49)

kern 3: 1-49 (1-65), 1-50 (1-66), 1-55 (1-71)

Aanwijzingen bij de instructieopgaven van week 4:

- 1-33: gebruik vgl. (1.38) om t/t_c te bepalen, met $t_c = \sum \rho V c / \bar{h} A$
- 1-34: gebruik vgl. (1.38)
 $f_{out} = T - T_e = (T_0 - T_e) e^{-t/t_c}$
- 1-35: vervang \bar{h}_c in vgl. (1.38) door U .
 Commentaar: of het model toegepast mag worden hangt af van het kengetal van Biot (dat moet in de buurt van 0,1 liggen). Kies een tankdiameter van 0,32 m, dan is
 $L \approx D/4 = 0,08$ en $Bi = \frac{UL}{k} \approx \frac{1,0 \cdot 0,08}{0,6} = 0,13$
- 1-37: (i) gebruik vgl. (1.36)
 (ii) neem als karakteristieke lengte $V/A = D/6$
 Commentaar: warmteoverdracht bij koken wordt behandeld in H7 (geen E52-stof).
- 1-40: gebruik vgl. (1.36)
- 1-38: gebruik LUMP
- 1-39: gebruik LUMP
- 1-49: gebruik vgl. (1.52) om \dot{m}_H te bepalen en vervolgens vgl.^{en} (1.58) en (1.59).
- 1-50: maak tekeningen van de situatie en schets temperatuurverloop voor $x = 0$ tot $x = L$, gebruik de stoomtabel A.12a om de temperatuur bij de verzadigingsdruk van $3 \cdot 10^4$ Pa te bepalen.
- 1-55: (i) los de vgl.^{en} (1.52) en (1.54) op voor $A = \varnothing L$.
 (ii) teken grafiek van $\varnothing L = - (946/40) \ln[1 - 1,44/(320 - T_{c,in})]$
 (iii) $U/V^{0,6} = \text{constant} \rightarrow U = 26,4V^{0,6}$.

2.5. Week 5: Convectie nader bekeken. Kengetallen. Computerprogramma CONV

Boek: §4.1 t/m 4.2.2, 4.3.1. Example 4.2

kern 1: Onderscheid in beschrijvingswijze van warmteoverdracht voor enerzijds geleiding/straling en anderzijds convectie. Warmteoverdrachtscoëfficiënt wordt gedefiniëerd voor drie typen overdracht:

- een externe gedwongen stroming
- een interne natuurlijke stroming
- een interne gedwongen stroming

Vergelijkingen zijn ingewikkeld, met zakrekenmachine vaak nog monnikenwerk. M.b.v. computers met geschikte programma's kom je veel verder. Het programma CONV is zo'n programma, maar alleen zinvol te gebruiken als je op de hoogte bent van de stof in hoofdstuk 4. Daarvoor zul je een aantal "slagen" moeten maken

Vergelijkingen voor de convectieve warmteoverdrachtscoëfficiënt h_c :

Tabel 4.1

soort stroming	vergelijking die h_c bepaalt	commentaar
externe stroming over oppervlak	$q_s = h_c(T_s - T_e)$	T_e is de temperatuur van het vrijstromende medium
natuurlijke stroming in een omsloten ruimte	$\frac{\dot{Q}}{A} = \bar{h}_c(T_H - T_C)$	T_H en T_C zijn de opp.temp. van resp. hete en koude oppervlak
interne stroming in een kanaal	$q_s = h_c(T_s - T_b)$	T_b is de temperatuur van de bulk

kern 2: Kengetallen

- dimensieanalyse

voorbeeld 1: getal van Reynolds: $Re = \frac{\rho VL}{\mu} = \frac{VL}{\nu}$

voorbeeld 2: stroming over een cilinder:

$$\bar{q}_s = f(V, D, \rho, \mu, \Delta T, c_p, k)$$

eenheden:

\bar{q}_s	V	D	ρ	μ	ΔT	c_p	k
$W.m^{-2}$	$m.s^{-1}$	m	$kg.m^{-3}$	$kg.m^{-1}.s^{-1}$	K	$J.kg^{-1}.K^{-1}$	$W.K^{-1}.m^{-1}$

dimensieloze grootheid Π : $\Pi = \bar{q}_s^a V^b D^c \rho^d \mu^e \Delta T^f c_p^g k^h$

- beschrijving van verschillende stromingen leidt tot Tabel 4.3

kern 3: Gedwongen convectie

- gedwongen convectie in ronde buizen

- kengetal van Nusselt: $Nu = \frac{h_c L}{k}$

als Nu bekend is, L (afmeting) is bekend en k (soort stof) dan kan h_c uitgerekend worden. Er zijn verschillende uitdrukkingen voor Nu in de literatuur gegeven, afhankelijk de soort stroming en die wordt weer vastgelegd door Pr (kengetal van Prandtl en Re): zie formules (4.44) t/m (4.47).

Voorbeeld: $Nu_D = 0,023 Re_D^{0,8} Pr^{0,4}$ voor $Re > 10.000$

(met $Re_D = \frac{\rho V L}{\mu} = \frac{\dot{m} D}{\mu A_c} = \frac{GD}{\mu}$, L = karakteristieke lengte, hier dus de diameter van de buis)

Leerdoelen week 5:

Aan het eind van week 5:

- ben je vertrouwd met verschillende manieren van beschrijven van warmteoverdracht t.g.v. convectie
- kun je het juiste model kiezen voor een bepaald probleem

Instructieopgaven week 5:

kern 1: 4-8 (i)

kern 3: 4-11, 4-12, 4-13, 4-14; 4-19, 4-21

Opmerkingen

Het computerprogramma CONV kan voor 25 verschillende configuraties (zie tabel 4.10) de volgende zaken uitrekenen:

- de warmteoverdrachtscoëfficiënt h_c
- de schuifspanning aan de wand (= wall shear stress)
- de drukgradiënt

Wij houden ons alleen met h_c bezig.

CONV heeft een menu voor 5 verschillende gassen en 10 verschillende vloeistoffen, waarvan de fysische eigenschappen vermeld staan in de tabellen A.7, A.8, A.10 en A.13a.

Aanwijzingen bij de instructieopgaven van week 5:

4-8(i): gebruik tabel A.8, bepaal Re , kies juiste formule voor h_c

4-11: gebruik tabel A.8, bepaal Re , gebruik ook vgl. (4.45) om Nu_D uit te rekenen (het bepalen van de wrijvingscoëfficiënt f om de drukgradiënt te bepalen, kun je overslaan). Vergelijk met een enkelestroom warmtewisselaar (vgl. (1.59) of (4.11)). Controleer met CONV.

4-12: gebruik tabel A.8 om Re_D uit te rekenen, kies juiste formule voor Nu_D (4.50), bepaal weer alleen \bar{h}_c (en niet drukgradiënt). Controleer met CONV.

4-13: zie aanwijzingen 4-12, alleen andere keuze voor Nu_D (4.46)

4-14: zie aanwijzingen 4-12, alleen andere keuze voor Nu_D (4.45)

- 4-19: kies een waarde voor T_{out} (320 K) en zoek de waarde op bij $T = 310$ K (gemiddelde temperatuur), bepaal Re_D en kies formule voor Nu_D (4.50), corrigeer de berekende waarde met tabel 4.6, pas 4.11 toe en vergelijk de uitkomst met je aanname. Controleer met CONV.
- 4-21: met CONV

2.6. Week 6: Convectie nader bekeken (slot).

Boek: § 4.4.1, Examples 4.1 en 4.6

kern 1: Voorbeelden
 - Example 4.1: laminaire stroming van olie in een ronde buis. Re uitrekenen
 → soort stroming → bijbehorende formule kiezen voor Nu, hier:

$$\overline{Nu}_D = 3,66 + \frac{(0,065)(D/L) Re_D Pr}{1 + 0,04[(D/L) Re_D Pr]^{2/3}} = 7,01$$

correctiefactor toepassen m.b.v. tabel 4.6 en tabel A.8:

$$\overline{Nu}_D = 4,89 = \frac{\bar{h}_c D}{k} \rightarrow \bar{h}_c = 66,9 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

Ook kan \bar{h}_c met het programma CONV uitgerekend worden (zeker doen, om ervaring op te doen !!)

- Example 4.2: turbulente stroming in vlak kanaal van warmtewisselaar.
 Re uitrekenen:

$$Re_{D_h} = \frac{(\dot{m}/A_c) D_h}{\mu} = 19.160 \rightarrow \text{turbulent} \rightarrow \text{juiste formule voor } Nu_{D_h} \text{ kiezen,}$$

eventueel corrigeren met tabel 4.6 → \bar{h}_c .Vervolgens met CONV \bar{h}_c uitrekenen.

kern 2: Natuurlijke stroming
 - Voorbeeld: stroming rond een horizontale cilinder (b.v. verwarmingselement)

stroming laminair: $Ra_D = Gr_D \cdot Pr \leq 10^9$

kengetal van Nusselt is dan:

$$\overline{Nu}_D = 0,36 + \frac{0,518 Ra_D^{1/4}}{\left[1 + (0,559 / Pr)^{9/16}\right]^{4/9}} \text{ als } 10^{-6} < Ra_D < 10^9$$

Als $Ra_D > 10^9$ dan is er een overgang van laminair naar turbulent en geldt:

$$\overline{Nu}_D = \left\{ 0,60 + 0,387 \left[\frac{0,518 Ra_D^{1/4}}{\left[1 + (0,559 / Pr)^{9/16}\right]^{16/9}} \right]^{1/6} \right\}^2 \text{ met } Ra_D > 10^9$$

Ga zelf na dat bij $Ra_D = 10^9$ beide vergelijkingen niet erg goed “matchen”.

- Example 4.6: Warmteverlies bij een stoombuis

Reken Ra_D uit → soort stroming → kies juiste formule voor Nu_D →→ \bar{h}_c → \dot{Q}

Leerdoelen week 6:

Aan het eind van week 6 kun je:

- warmteoverdracht door gedwongen convection in buizen oplossen
- onderscheiden wanneer natuurlijke convection een rol speelt en voor eenvoudige geometrieën (langs vlakke wand, rond cilinder) problemen oplossen

Instructieopgaven week 6:

kern 2: 4-43 (4-57), 4-44 (4-58) en 4-45 (4-70)

Aanwijzingen bij de instructieopgaven van week 6:

4-44: de input aan elektrisch vermogen moet in de evenwichtssituatie gelijk zijn aan het warmteverlies t.g.v. convection:

$\dot{Q}/L = I^2 R = \bar{h}_c \phi (T_s - T_e)$, waarbij R de elektrische weerstand per lenseenheid is ($8,84 \Omega \cdot m^{-1}$).

CONV kun je gebruiken om \bar{h}_c uit te rekenen:

configuration number = 6 (transverse cilinder)

fluid = 21 (air)

$T_s = 473$, $T_e = 293$

$\rho = 1.0133 \times 10^5$

$D = 0.12 \times 10^{-3}$

$V = 0.3 - 7$

Zet de resultaten overzichtelijk in een tabel.

4-45: bepaal soort stroming m.b.v. $Ra_D = Gr_D Pr = \frac{g\beta\Delta TD^3 Pr}{\nu^2} \rightarrow$ vgl. (4.87) \rightarrow

$\rightarrow \overline{Nu_D} \rightarrow \bar{h}_c$

Commentaar: - gebruik CONV, item 10 om dit resultaat te controleren.

- voor lucht is \bar{h}_c klein, dus stralingsverlies kan ook een rol spelen.

2.7. Week 7: Herhaling, wegwerken van achterstanden

Opgave te behandelen stof liefst week van te voren via e-mail inleveren.