

HET DIMENSIONEREN VAN EEN MEERTRAPSINDAMPER

H. Rozema, P.D. Feitsma

Op de AHOF-studierichting levensmiddelentechnologie is een rekenmodel ontwikkeld voor het dimensioneren en controleren van meertrapsindampers (1-7 traps). Het computerprogramma dat hieruit is voortgekomen kan worden gebruikt om het verwarmend oppervlak, de produktstromen, de dampstromen en drogestof gehalten te berekenen. Rekening is gehouden met het plaatsen van warmtewisselaars en een thermocompressor.

Inleiding

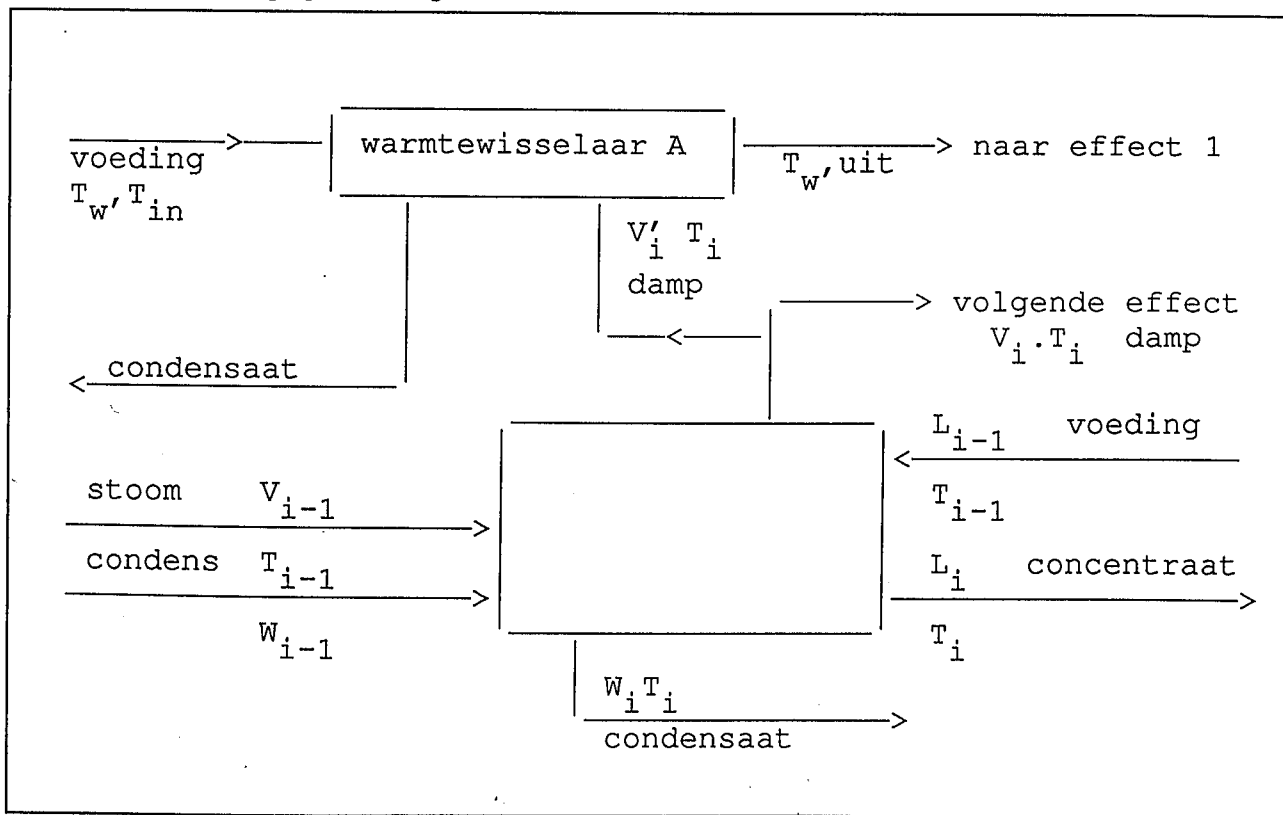
Indampen is een techniek die in de voedingsmiddelenindustrie veel wordt toegepast. In de groente- en fruitsector bij het concentreren van vruchtensappen, in de suikerindustrie en zetmeelindustrie bij het concentreren van suikers. De zuivelindustrie past de indamper toe bij de bereiding van gecondenseerde melk en o.a. voor het maken van melk- en weipoeder.

Werking valstroomverdamer

Aan de binnenzijde van een valstroomverdamer stroomt de in te dampen grondstof in een dunne laag langs het oppervlak naar beneden. Aan de buitenkant van de pijp condenseert de damp of stoom, waarmee de warmte die nodig is voor de verdamping wordt aangevoerd.

Aan het oppervlak van de vloeistoffilm in de buis, verdampt het water uit de grondstof. De damp en vloeistof stromen naar beneden en worden gescheiden in een afscheider. De damp kan weer worden gebruikt als verwarmingsmedium in een volgende trap. Door meerdere trappen toe te passen kan het aantal kilogrammen stoom om een kg water te verdampen, het specifiek stoomverbruik, worden verlaagd. Bij een viertrapsverdamer is de totale waterverdamping ongeveer vier maal de hoeveelheid stoom die de eerste trap binnenkomt. Bij het toepassen van een thermokompressor kan het specifiek stoomverbruik verder worden verlaagd. Zuigt de thermokompressor, geschakeld op de tweede trap, evenveel damp aan als er stoom aan de kompressor wordt toegevoerd, dan is de verdamping in de eerste en tweede trap tweemaal zo groot als het stoomverbruik. Het specifiek stoomverbruik wordt teruggebracht tot ca. 1/6.

De kooktemperatuur van de eerste en laatste trap ligt min of meer vast. De temperatuur van het condensaat bepaalt in de laatste trap de kooktemperatuur. In de eerste trap is het gebruikelijk de temperatuur te beperken tot ca. 80°C.



Figuur 1: Massastromen en temperaturen voor effect i .

Mathematisch model

Wanneer tijdens het indampen een stationaire toestand is bereikt, kunnen om een willekeurige trap i , de volgende vergelijkingen worden opgesteld:

Massabalans om trap i :

$$L_{i-1} = L_i + V_i \quad (1)$$

$$L_{i-1} \cdot x_{i-1} = L_i \cdot x_i = L_o \cdot x_o \quad (2)$$

$$L_o = V_i + L_n \quad (3)$$

Warmtebalans om trap i :

$$L_{i-1} \cdot c_{p_{i-1}} \cdot T_{i-1} + V_{i-1} \cdot h_{i-1} + W_{i-1} \cdot r_{i-1} = (V_i - V'_i) \cdot h_i + L_i \cdot c_{p_i} \cdot T_i + W_i \cdot r_i + \text{warmteverliezen.}$$

Per effect zijn er twee typen warmtewisselaars gedefinieerd. Warmtewisselaar type A, voor het opwarmen van toegevoerde grondstof en warmtewisselaar type B voor het opwarmen van reeds gedeeltelijk geconcentreerd product uit één van de effecten.

Warmtebalans warmtewisselaar A:

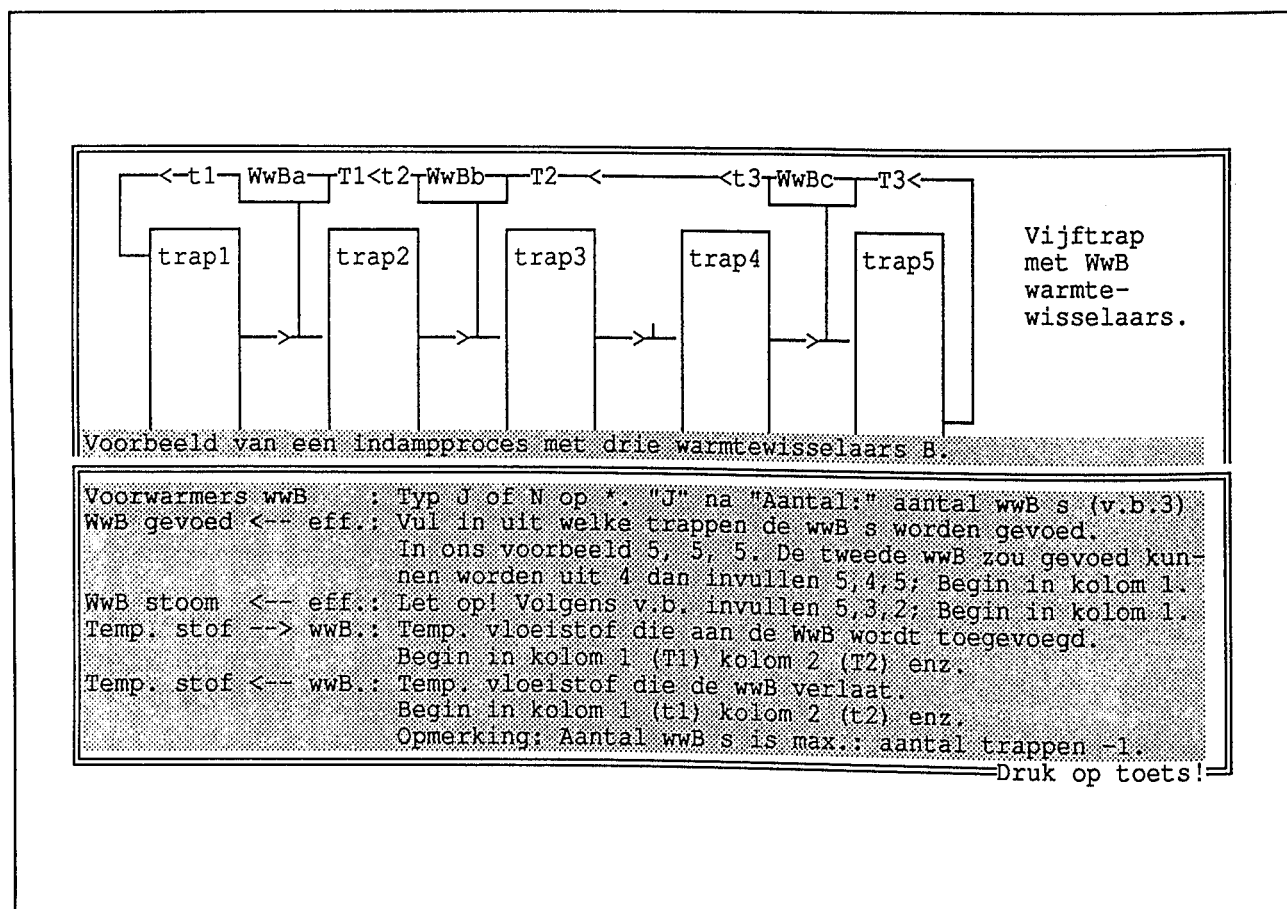
$$V'_i \cdot h_i = L_o \cdot c_{p_o} \cdot (T_{w,uit} - T_{w,in}) + V'_i \cdot r_i$$

De warmtebalans voor warmtewisselaar B is te vergelijken met de balans voor warmtewisselaar A. Door warm-

tewisselaar A stroomt de oorspronkelijke grondstof en door warmtewisselaar B de grondstof die reeds is geconcentreerd en afkomstig is van één van de effecten. De bovenstaande vergelijkingen worden samengevoegd tot een matrix waarna door iteratie de onbekenden worden berekend. In de bovenstaande vergelijkingen is de dampstroom de onbekende. De temperaturen van de eerste en het laatste effect zijn bekend, terwijl de temperaturen van de overige effecten worden vastgesteld.

De soortelijke warmte van de vloeistofstromen, c_p , wordt berekend aan de hand van het drogestofgehalte en de temperatuur. Daar de dampstromen onbekend zijn worden deze eerst globaal berekend en worden c_p waarden geschat aan de hand van de berekende dampstromen. Daarna worden de exacte berekeningen een aantal keren uitgevoerd totdat de c_p -waarden tussen twee opeenvolgende berekeningen minder dan 1 promille van elkaar verschillen.

Tijdens de berekeningen worden de vastgestelde temperaturen in de effecten gecorrigeerd voor kookpuntsverhoging. De enthalpie en temperatuur van de stoom als functie van de druk is weergegeven in polynomen, die zijn opgesteld met stoomtabellen.



Figuur 2: Voorbeeld van een "on-line" hulpscherm.

Voor een temperatuur lager dan 61°C geldt:

$$\text{verdampingswarmte} = 2502.019092 - 2.380532 * \text{temperatuur}$$

voor een temperatuur hoger dan 61°C geldt:

$$\text{verdampingswarmte} = 2517.875074 - 2.606033 * \text{temperatuur}$$

De vergelijkingen zijn zodanig gerangschikt en opgesteld dat oplossingen zijn te vinden voor tegen- en gelijkstroomschakelingen van de effecten, terwijl daarnaast de effecten in willekeurige volgorde geschakeld mogen zijn. De warmtewisselaars B kunnen willekeurig worden geplaatst. De warmtewisselaars A, die dienen voor het opwarmen van de koude grondstof, zijn zonodig uit te schakelen. De warmtewisselaar voor de eerste trap is te voeden met directe stoom, om een extra opwarming te verkrijgen van de grondstof.

Thermokompressor

In het mathematisch model is rekening is gehouden met het plaatsen van een thermokompressor of stoomstraalkompressor over maximaal vier trappen. Voor het berekenen van de damp/stoom verhouding (D/S) van de kompressor is de volgende vergelijking afgeleid:

$$D/S = ((EXP(0.8143426 * LN((EXP(0.3053103 * LN(PS/PTR)) - 1) / (EXP(0.3053103 * LN(PS/PD)) - 1)))) * 0.7344742) - 1;$$

Deze vergelijking is van toepassing op een Korting compressor, voor Ps/PTR van 0,02 - 0,1 en Ps/PD van 0,4 - 0,7. Zonodig kan tijdens het berekenen de berekende D/S verhouding worden gecorrigeerd.

Condensaat

Het rendement van de indampinstallatie is te verbeteren door het condensaat, dat zich vormt in de effecten en warmtewisselaars, door de effecten te sturen. Bij het opstellen van de warmtebalansen is hiermee rekening gehouden.

K-waarde

Indien de warmtedoorgangscoefficiënt, K, per effect bekend is, is het verwarmend oppervlak per effect te berekenen. Is het aantal pijpen en de diameter van de pijpen per effect bekend dan kan de K-waarde per effect worden berekend. De volgende vergelijking wordt voor deze berekeningen gebruikt:

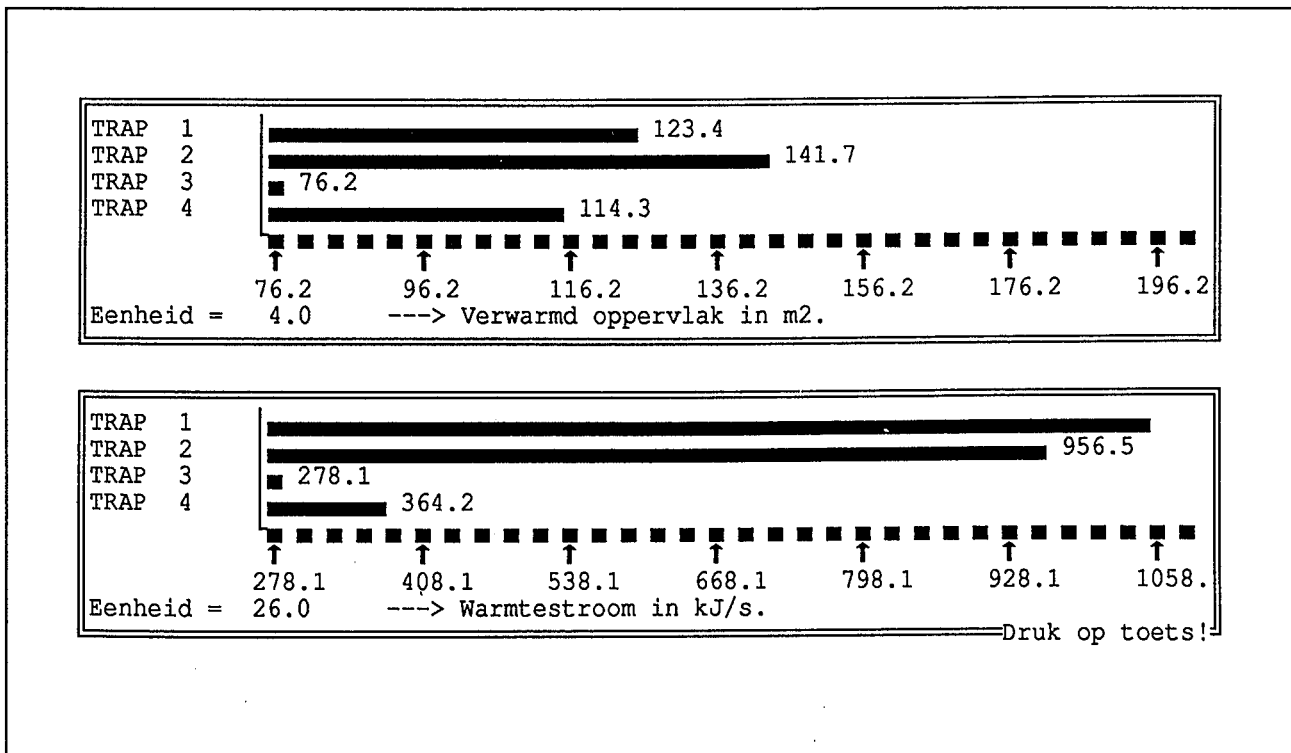
$$Q_i = K_i \cdot A_i \cdot (T_{i-1} - T_i); A_i = D_i \cdot n_i \cdot L_i.$$

Inwendige splitsing

Om een installatie in omvang te beperken splitst men een effect vaak in tweeën. Een effect, dat bestaat uit 400 pijpen, is bijvoorbeeld te splitsen in 250 en 150 pijpen. De grondstof verdeelt zich eerst over de 250 pijpen en gaat daarna via een dampafscheider en pomp naar de volgende 150 pijpen. De 400 pijpen staan aan dezelfde stoom bloot. Bij de berekeningen wordt rekening gehouden met inwendige splitsing per effect.

Indien de dampstromen, het oppervlak en het aantal pijpen per effect bekend zijn, zijn een aantal belangrijke grootheden te berekenen als:

- minimale en maximale dampnelheden in de pijpen;



Figuur 3: Grafische weergave van de berekende waarden.

- bevoeiing per pijp;
- drukverlies over de pijpen.

Minimale en maximale dampsnelheden

Om in de kop van een effect een goede vloeistofverdeling over de pijpen te verkrijgen vindt in de kop vaak een flash verdamping plaats. Hierbij ontstaat een hoeveelheid damp waardoor in het begin van de pijpen een dampsnelheid ontstaat. Door verdamping ontstaan aan het eind van de pijpen dampsnelheden die op kunnen lopen tot ca. 60 m/s. Deze dampsnelheden mogen een bepaalde waarde niet overschrijden daar bij te hoge snelheden te hoge drukverliezen in de pijpen ontstaan en de wanden van de pijpen droogblazen.

De dampsnelheid aan het einde van een pijp is als volgt te berekenen:

$$v = \frac{4 \cdot K \cdot T \cdot \text{lengte}}{\text{verdampingswarmte} \cdot \text{dichtheid} \cdot \text{diameter pijp}} \quad (5)$$

Drukverlies

Voor het berekenen van het drukverlies wordt uitgegaan van de rekenkundig gemiddelde dampsnelheid in de pijpen. De bevoeiing van de pijpwallen is in de berekeningen niet opgenomen. Het berekende drukverlies zal daardoor enigszins afwijken van het werkelijke drukverlies.

Toepassingen

Het programma is toe te passen bij het dimensioneren van indampers. Daarnaast leent het zich uitstekend om bestaande indampers te controleren op hun werking. Hierbij valt te denken aan de controle op de dampsnelheden, drukverlies en bevoeiing per pijp.

Daarnaast kan met het programma de standtijd worden geoptimaliseerd. Bij voldoende meetpunten aan de installatie kunnen direct de gegevens in het programma worden opgenomen zodat "on-line" controle tot de mogelijkheden behoort.

Het computerprogramma

Het programma is geschreven in Turbo Pascal. Ten behoeve van de in- en uitvoer wordt gebruik gemaakt van een spreadsheet. Als het programma opstart toont het spreadsheet alle basisgegevens van het lege in- en uitvoerformulier. Op het beeldscherm bestaat het in- en uitvoerformulier uit drie beeldschermen, terwijl het afgedrukt op een A4-blad past. De bovenste regel van het beeldscherm toont de beschikbare Commando/Functie toetsen. De cellen in de spreadsheet waar gegevens kunnen worden ingevuld zijn aangegeven door middel van puntjes. Voordat de berekeningen feitelijk worden uitgevoerd controleert het programma op ontbrekende en/of 'onmogelijke' gegevens. Na de berekening worden de resultaten in de spreadsheet weergegeven. De onderste vier regels van de spreadsheet tonen waarden van fysische grootheden die tijdens de berekeningen zijn gebruikt; hierdoor kan men

achteraf controleren of de waarden van een aantal belangrijke grootheden, die bij het rekenproces zijn gebruikt, correct zijn. Het programma biedt on-line hulp voor het invullen van de gegevens in de spreadsheet. Figuur 2 toont een voorbeeld van een hulpscherm.

Zoals eerder vermeld worden de berekende resultaten in de spreadsheet opgenomen. De belangrijkste resultaten kunnen in de vorm van een histogram worden getoond. Een voorbeeld van een histogram ziet u in figuur 3.

Symbolen

A _i	verwarmend oppervlak (effect i), m
D _i	inwendige diameter pijp (effect i), m
L _i	massastroom (effect i), kg/s
L _o	massastroom voeding (o.a. effect 1), kg/s
PTR	stoomdruk thermokompressor, bar
PS	zuigdruk thermokompressor, bar
PD	persdruk thermokompressor, bar
Q _i	warmtestroom (effect i), Watt
T _i	temperatuur stoom, condens of concentrant (effect i), K
V _i	dampstroom (effect i), kg/s
V' _i	dampstroom naar warmtewisselaar A (effect i), kg/s
W _i	condensaat (effect i), kg/s
c _{pi}	soortelijke warmte concentraat (effect i), J/(kg K)
c _{po}	soortelijke warmte voeding, J/(kg K)
h _i	warmteinhoud damp (effect i), J/kg
n	aantal effecten
n _i	aantal pijpen (effect i)
r _i	warmteinhoud condensaat (effect i), J/kg
x _i	drogestofgehalte (effect i), kg/kg
x _o	drogestofgehalte voeding, kg/kg

Literatuur

Atkinson, L.V., Harley P.J., *An Introduction to Numerical Methods with Pascal*. International Computer Science series, ISBN 0-201-13788-7

Borland International, *Turbo Pascal Owner's Handbook*, Borland International, 4585 Scotts Valley Drive, Scotts Valley, CA 95066 U.S.A

Körting Hannover AG, *Körting Reference Data*.

Miller, Alan R., *Pascal Programs For Scientists and Engineers*, ISBN 0-89588-058X

North European Dairy Journal, *Evaporation, Membranefiltration, Spraydrying in milk powder and cheese production*, ISBN 87-7477-000-4

Rozema, H., *Inleiding in de procestechiek deel 2 en 3*, AHOF, studierichting levensmiddelentechnologie Bolsward, Snekerstraat 11-15, 8700 AB Bolsward. □

Ir H. Rozema is docent Procestechiek en dr. P.D. Feitsma is docent Informatica aan de AHOF, studierichting Levensmiddelentechnologie, Postbus 51 te Bolsward (tel. 05157-4245).