

Warmte- en stoftransport tijdens het verhitten van gerezen deegprodukten

U.A. de Vries, P. Sluimer en P. Verlaan

TNO-Voeding

Samenvatting

Warmte- en stoftransport in brood en cake zijn onderzocht tijdens het bakken. Het bleek dat stoftransport in de vorm van successievelijk verdamping en condensatie van water de belangrijkste bijdrage levert aan het warmtetransport in het produkt. Een fysisch-mathematisch model is ontwikkeld om het gecombineerde proces van warmte- en stoftransport in gerezen deegprodukten te beschrijven tijdens het verhitten (bakken). De resultaten van dit model komen goed overeen met de experimentele gegevens.

Inleiding

In de bakkerijsector is er een toenemende belangstelling voor zaken als beheersing van productieprocessen en produktkwaliteit, procesinnovatie en productieplanning. Centraal hierbij staat de behoefte aan inzicht in de relatie tussen produktkwaliteit en de uitvoeringsvorm van de procesapparatuur, in dit geval de oven.

Voor de jaarlijkse broodproductie in Nederland worden ca. 12,8 miljoen balen gebruikt (1 baal = 50 kg meel). Hiervan wordt ca. 40 % geproduceerd door bedrijven met continu-ovens (industriële sector) en 60 % door bedrijven die uitgerust zijn met charge-ovens (ambachtelijke sector). Daarbij wordt er jaarlijks ook nog zo'n 275 000 ton banket geproduceerd. Voor deze brood- en banketproductie is jaarlijks zo'n 5 PJ energie nodig (1 PJ (pentajoule) = 10^{15} J).

In 1989 vormde het hierboven gestelde aanleiding voor het IGMB-TNO om in samenwerking met de NOVEM te komen tot een plan van onderzoek waarin beheersing van de produktkwaliteit en de ontwikkeling van de 'ideale oven' centraal staat (Verlaan et al., 1989). Afgeleide doelstellingen van dit plan zijn vermindering van het energieverbruik en een beperking van de milieuoverlast (geuremissie).

Centraal in dit plan staat de ontwikkeling van een fysisch-mathematisch model dat met name het stof- en warmtetransport tijdens het bakken beschrijft. Dit model zal een essentiële rol spelen bij het beheersen van het bakproces en de ontwikkeling van nieuwe ovens. Op deze manier kan op termijn het bakproces worden geregeld op basis van produktparameters en niet, zoals thans het geval is, op basis van machineparameters.

Om dit te realiseren zal het model een geïntegreerde beschrijving moeten geven van de vier verschillende niveaus waarop het bakproces zich afspeelt:

- I. De ovenschil. Op dit niveau worden de processen in het warmteopwekkings- en warmtedistributiesysteem beschreven.
- II. De bakruimte en het microklimaat rond het produkt. Op dit niveau wordt de warmteoverdracht van de ovenatmosfeer naar het produktoppervlak beschreven.
- III. Het produkt op macroschaal. Op dit niveau wordt transport van warmte, vocht en aromacomponenten in het produkt beschreven.
- IV. Het produkt op microschaal. Op dit niveau worden chemische reacties en fysische verschijnselen beschreven, zoals verstijfseling van zetmeel, denaturatie van eiwit, vorming van kleurcomponenten, aromastoffen enz.

Voor het onderdeel II hebben Krist-Spit & Sluimer (1987) een studie verricht naar de bijdragen van de mechanismen straling en convectie aan de totale warmteoverdracht naar een busbrood in een gewone convectie-oven. De effecten van stofoverdracht zijn niet bestudeerd. Voor wat betreft het onderdeel III is door verschillende auteurs reeds over de warmtegeleidbaarheid in broodkruim en -korst gerapporteerd. Rask (1990) geeft een overzicht van de beschikbare gegevens en de literatuur op dit gebied. Sluimer & Krist-Spit (1987) hebben aangetoond dat warmtegeleiding in de vloeistoffase van het deeg niet het enige mechanisme voor warmtetransport kan zijn. Zij introduceerden het gecombineerde optreden van verdamping en condensatie als het mechanisme dat verantwoordelijk is voor het relatief snelle warmtetransport in het produkt tijdens het bakken. Dit mechanisme, dat ook bekend staat als het principe van Watt, verklaart tevens het waargenomen vochttransport naar de kern van het produkt.

Modellering van warmte- en stofoverdracht in het produkt

Het warmtetransport in deeg en kruim (dat wil zeggen deeg dat in kruim is overgegaan tijdens het bakken) wordt verondersteld een gevolg te zijn van twee verschillende vormen van warmteoverdracht:

- geleiding in de continue vloeistoffase
- verdamping-condensatie in de gasfase (principe van Watt).

Het verdamping/condensatiemechanisme wordt in het model verondersteld het enige mechanisme te zijn dat bijdraagt aan vochttransport in het produkt. Volgens de wet van Fourier is het warmtetransport, in dit geval de warmteflux door geleiding, evenredig met de temperatuurgradiënt. Voor een gecombineerde beschrijving van warmte- en vochttransport door het verdamping/condensatiemechanisme moet de snelheidsbepalende stap eerst bekend zijn. Daartoe is er een lokaal thermodynamisch evenwicht verondersteld tussen de gasfase en de vloeistoffase, terwijl diffusie in de gasfase als snelheidsbepalend wordt aangemerkt. Hierdoor wordt, uitgaande van de wet van Fick, warmtetransport evenredig met de vochtigheidsgradiënt in de gasfase.

Met behulp van de bovengenoemde veronderstellingen kunnen de stof- en de energiebalans in het produkt worden opgesteld:

$$\frac{\partial x_g}{\partial t} = \frac{1}{z_R^2} \frac{\partial}{\partial \varrho} \left(r^2 \frac{\partial x_g}{\partial \varrho} \right) - \frac{\partial x_l}{\partial t} \quad (1)$$

$$c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{z_R^2} \frac{\partial}{\partial \varrho} \left(r^2 k \frac{\partial T}{\partial \varrho} \right) + L \frac{\partial x_l}{\partial \varrho} \quad (2)$$

waarin:

- X_g en X_l = waterconcentratie in respectievelijk de gasfase en de vloeistoffase (kg/kg [dm])
 ϱ = dimensieloze coördinaat verbonden aan de droge stof
 D en k = getransformeerde diffusiecoëfficiënt respectievelijk warmtegeleidingscoëfficiënt
 z_R = waarde van de coördinaat verbonden aan de droge stof op het oppervlak.

Aangezien de gasfase expandeert tijdens het verhitten, beïnvloedt de porositeit van het gefermenteerde (gerezen) deegproduct het warmteoverdrachtsproces aanzienlijk. Immers, het is het verdamping/condensatiemechanisme in de gasfase dat de belangrijkste bijdrage levert aan het totale warmtetransport. Om hiermee rekening te houden is tijdens de berekening gebruik gemaakt van een meebewegend coördinatiestelsel, dat gekoppeld is aan de droge stof van het deeg.

Philip & de Vries (1957) gebruikten enkel een warmtebalans met een effectieve warmtegeleidingscoëfficiënt gecorrigeerd voor het verdamping/condensatie-effect. Een nadere bestudering van zo'n effectieve geleidingscoëfficiënt geeft een aanwijzing over de grootte van de individuele bijdragen van de verschillende warmtetransportmechanismen:

$$k_{eff} = k_l + k_g + k_{vc}$$

$$= \tau_l (1-\epsilon) \cdot k_l^0 + \tau_g \cdot \epsilon \cdot k_g^0 + \tau_g \cdot \epsilon \cdot L \cdot D \cdot \frac{\delta h}{\delta T} \quad (3)$$

waarin k_l , k_g en k_{vc} de bijdragen van respectievelijk geleiding in de vloeistoffase, geleiding in de gasfase en van verdamping en condensatie zijn. k_g^0 en k_l^0 zijn de geleidingscoëfficiënten in de gasfase, respectievelijk de vloeistoffase. τ is de tortuositeitfactor, ϵ de porositeit, L de verdampingswarmte, D de diffusiecoëfficiënt van waterdamp in CO_2 , h de waterdampconcentratie in de gasfase en T de temperatuur.

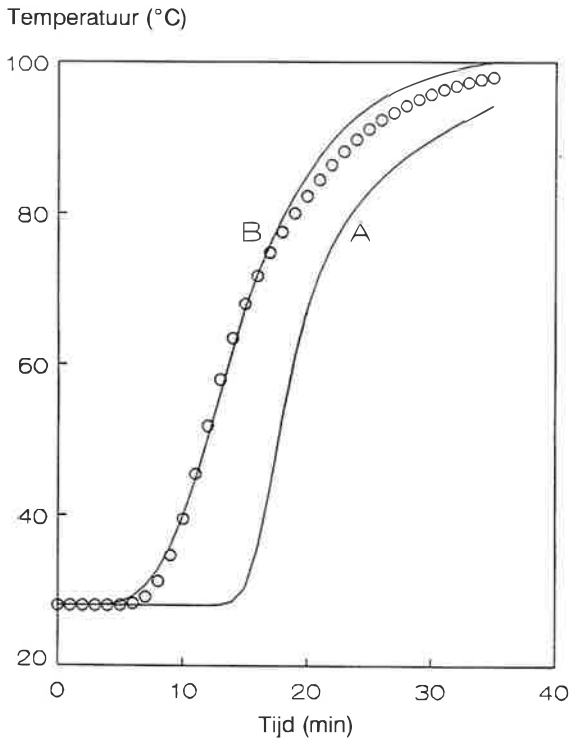
Vergelijking 3 laat zien dat warmteoverdracht in een poreus deeg of kruim een functie is van de temperatuur, de druk (diffusie in de gasfase is omgekeerd evenredig met de druk) en de porositeit van het materiaal.

Toetsing van het model aan de praktijk

De massa en warmtebalans (volgens formules 1 en 2) zijn numeriek opgelost met behulp van de voorwaartse differentiërmethode. Experimentele gegevens van bakexperimenten met wit- en volkorenbrood en cake zijn gebruikt om het model te verifiëren. De brooddegen zijn bereid volgens de methode van de Vries et al. (1988). De initiële condities waren: temperatuur 28°C, vochtgehalte 0,78 kg per kg droge

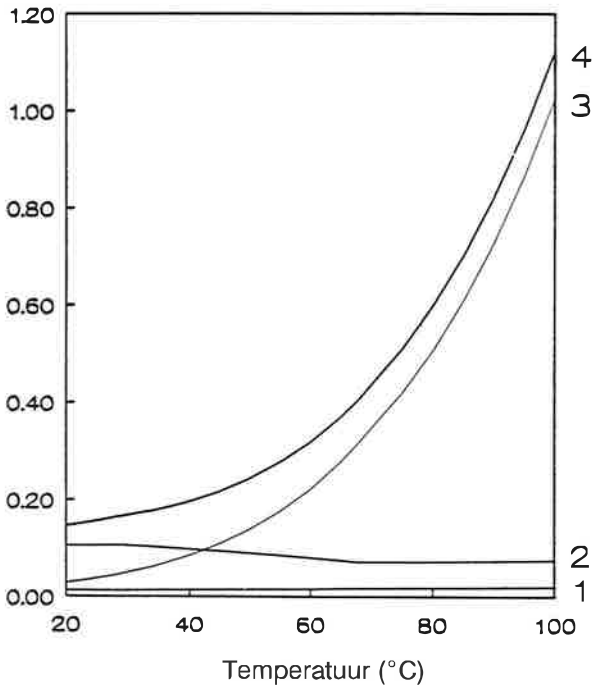
stof, diameter van de deegcilinder 100 mm, porositeit 0,77. Aan het eind van het bakproces was de porositeit 0,84. Gegevens over de thermische eigenschappen zijn ontleend aan de literatuur (de Vries et al., 1988). De wateractiviteit is gelijk gesteld aan één. Voor het cakebeslag zijn de initiële condities als volgt vastgelegd: temperatuur 21 °C, vochtgehalte 0,39 kg per kg droge stof, porositeit 0,43. Aan het eind van het bakproces bedroeg de porositeit 0,77. De cakes werden gebakken in blikken met een gemiddelde diameter van 70 mm. De simulaties zijn gedaan op basis van een cilindergeometrie met een diameter gelijk aan de bovengenoemde diameter. De thermische eigenschappen van het beslag zijn berekend met het COSTHERM-programma. De waarden voor de wateractiviteit zijn berekend met behulp van het Oswin-model.

De berekeningen gebaseerd op de formules 1 en 2 en volgens de methoden zoals omschreven komen goed overeen met de experimentele gegevens zoals uit figuur 1 blijkt. Uit figuur 1 blijkt ook dat, hoewel het verdamping/condensatiemechanisme de belangrijkste bijdrage levert aan de warmteoverdracht, warmtegeleiding niet kan worden verwaarloosd. In figuur 2 zijn de afzonderlijke bijdragen van geleiding en verdamping/condensatie aan de totale warmteoverdracht weergegeven in de vorm



Figuur 1. Experimenteel en berekend temperatuurverloop in de kern van een brooddeeg. o - o - o experimenteel; _____ berekend. A: verdamping - condensatie; B: verdamping - condensatie + geleiding.

Warmtegeleidingscoëfficiënt (J/mKs)



Figuur 2. Numerieke waarden van de individuele bijdragen van de effectieve warmtegeleidingscoëfficiënten. 1 = k_g ; 2 = k_f ; 3 = k_{vc} ; 4 = k_f (vgl. formule 3).

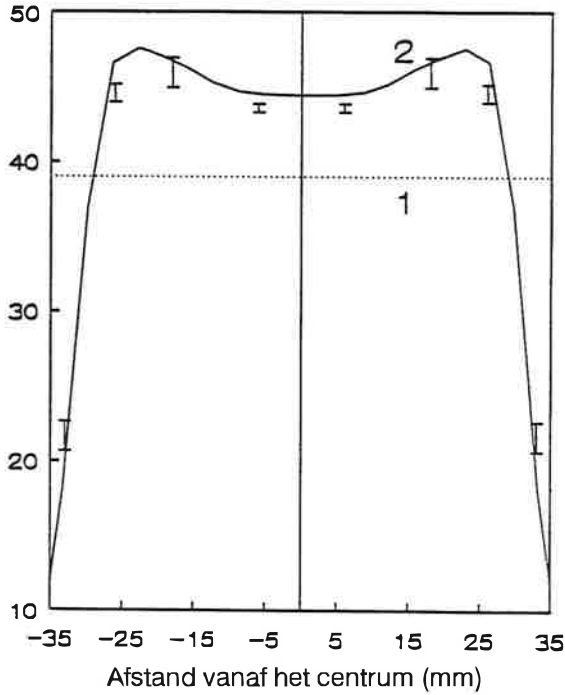
van de warmtegeleidingscoëfficiënt als functie van de temperatuur. Uit figuur 2 blijkt dat het warmteoverdrachtsproces bij lage temperaturen hoofdzakelijk wordt bepaald door warmtegeleiding en bij hoge temperaturen door het verdamping/condensatiemechanisme. De bijdrage van geleiding in de gasfase (CO_2/H_2O) is relatief gering.

In figuur 3 is het berekende vochtprofiel in cake weergegeven, samen met de experimenteel verkregen gegevens. Om deze experimentele gegevens te verkrijgen werd een cakebeslag bereid met een vochtgehalte van 0,39 kg per kg droge stof. Dit beslag werd gebakken tot cake en onmiddellijk na het bakken zijn concentrische cilindersegmenten uit de cake gestoken waarvan het vochtgehalte werd bepaald.

In figuur 3 is duidelijk te zien dat het vochtgehalte van de drie binnenste segmenten duidelijk boven dat van het oorspronkelijke beslag ligt. Het maximum in de curve is te verklaren door het feit dat het verdamping/condensatiemechanisme juist bij hoge temperaturen een significante bijdrage levert aan het warmte- en stoftransport. Hierdoor zal de vochtmigratie aan de randen aanvankelijk snel verlopen terwijl meer naar het centrum, waar de temperatuur lager is, dit proces trager zal verlopen.

Aangezien het beslag een porositeit had van 0,43 en de hieruit bereide cake een porositeit had van 0,77 is voor de modelberekeningen uitgegaan van een lineaire

Vochtgehalte (kg/kg droge stof)



Figuur 3. Berekende en experimentele waarden voor de vochtverdeling in cake vóór en na het bakken. 1, beslag; 2, na het bakken.

toename van de porositeit tussen de initiële temperatuur van 20°C en de temperatuur van 68°C waarbij wordt aangenomen dat fixatie van de structuur optreedt.

Conclusie

Het gepresenteerde fysisch-mathematische model voor gecombineerde warmte- en stoftransport in deeg en kruim komt goed overeen met de praktijk. Met behulp van dit model is aangetoond dat het verdamping/condensatiemechanisme de belangrijkste bijdrage levert aan de warmteoverdracht in gerezen deegproducten. Tevens is aangetoond dat warmte- en vochttransport in deze producten toeneemt naarmate de temperatuur stijgt en de porositeit een grotere waarde heeft.

Literatuur

- Krist-Spit, C.E. & Sluimer, P., 1987. Heat transfer in ovens during the baking of bread. In: I.D. Morton (ed.), *Cereals in a European context*, pp. 344 – 354. Ellis Horwood, Chichester.
- Philip, J.R. & de Vries, D.A., 1957. Moisture movement in porous materials under temperature gradients. *Transactions, American Geophysical Union* 38 (2): 222 – 232.
- Rask, C., 1990. Thermal properties of dough and bakery products – A review of published data. *Journal of Food Engineering* (geaccepteerd).
- Sluimer, P. & Krist-Spit, C.E., 1987. Heat transport in dough during the baking of bread. In: I.D. Morton (ed.), *Cereals in a European context*, pp. 355 – 363. Ellis Horwood, Chichester.
- Verlaan, P., de Vries, U.A., Rouwen, W. & Krist-Spit, C.E., 1989. Basisinformatie ten behoeve van het meerjarenraamplan van activiteiten gericht op energiebesparing in de brood- en banketindustrie. IGMB-TNO rapport I 89-74, april 1989.
- Vries, U.A. de, Sluimer, P. & Bloksma, A.H., 1988. A quantitative model for heat transport in dough and crumb during baking. *Proceedings van een internationaal symposium, 'Cereal Science and Technology in Sweden', Ystad, Zweden, 13 – 16 Juni 1988.*