

# Fluidisatie in allerlei vormen

In de vorige twee artikelen is de rol die lucht kan spelen in bulk solids processing in zowel positieve als negatieve zin besproken. In dit verhaal gaan we wat dieper in op een van de belangrijkste toepassingen van lucht als hulpmiddel bij het verloop van diverse processen, namelijk fluidisatie.

Ir. Gerard Haaker  
en Ir. Piet van der Kooij

Bij het doorstromen van een gepakt bed van een fluidiseerbaar stortgoed met een gas of vloeistof zal bij niet te hoge snelheden de drukval evenredig toenemen met de luchtsnelheid  $u_c$  dan wel het debiet  $Q$  (zie figuur 1). Hierbij zal in eerste instantie het bed niet of nauwelijks expanderen. Bij verdere toename van de luchtsnelheid wordt punt A bereikt, waarbij de kracht op de deeltjes ongeveer gelijk is aan het schijnbare gewicht van de deeltjes. Vanaf dit punt treedt expansie van het bed op en een lichte afname van de stromingsweerstand. Iets verdere opvoering van de snelheid leidt in punt B tot het los van elkaar komen van de deeltjes, waarbij ook de onderlinge wrijving zeer klein wordt, en de drukval licht afneemt, punt C. De totale drukval is vanaf hier gelijk aan het bedgewicht, en bij verdere toename van

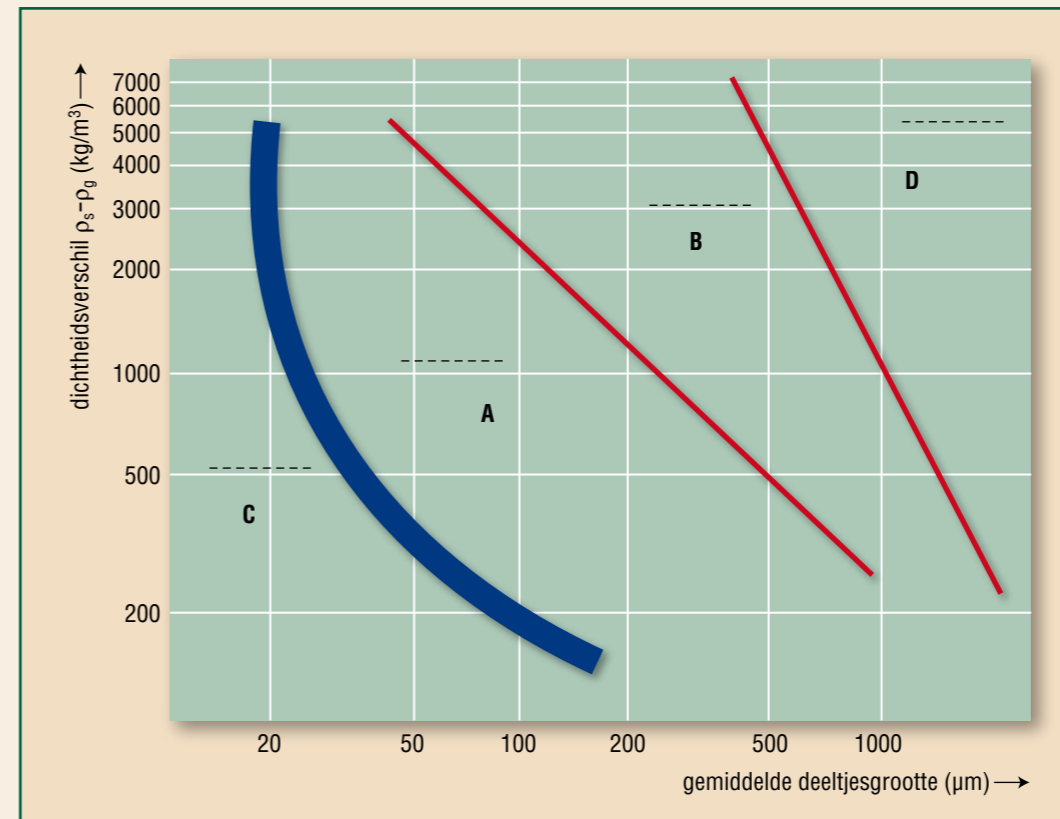
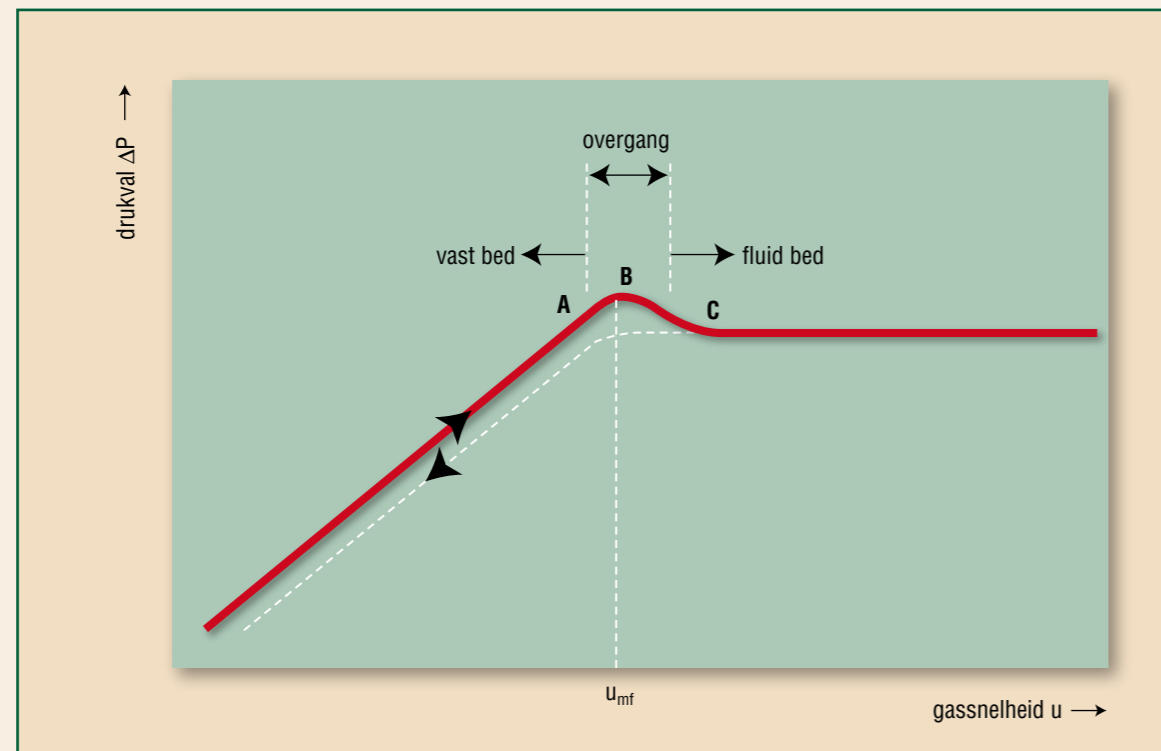
de snelheid zal geen verdere drukdaling meer optreden, wel mogelijk nog een kleine bedexpansie. Verdere toename van de snelheid zal als resultaat hebben dat deeltjes door de stroming worden meegenomen, zodat uiteindelijk transport optreedt. Vanaf punt B treedt de zogenaamde fluidisatie op waarbij de deeltjes geen onderlinge wrijving meer vertonen en het bulkproduct zich in feite als een vloeistof gedraagt. De snelheid waarbij deze situatie net wordt bereikt, noemen we de minimum fluidisatiesnelheid  $u_{mf}$ . Deze minimaal benodigde snelheid kan voor een ideaal bed van kleine deeltjes met niet te veel spreiding in de deeltjesgrootte theoretisch redelijk worden berekend. Maar in de praktijk blijkt de waarde van  $u_{mf}$  meestal wat hoger te liggen. De voornaamste redenen hiervoor zijn mogelijk optredende agglomeratie van deeltjes, elektrostatische krachten tussen de deeltjes, invloed van de wand van het reactorvat en soms de vorming van stroomkanaaltjes. Een test in een fluidisatiekolom geeft meestal een wat meer betrouwbare waarde van  $u_{mf}$  dan de berekende waarde. Behalve de minimum fluidisatiesnelheid kan ook de snelheid  $u_{mb}$  waarbij de eerste bellen ontstaan, worden onderscheiden. In de praktijk wordt meestal een fluidisa-

tiesnelheid toegepast die wat hoger ligt dan de minimale waarde. De gekozen waarde is hierbij sterk afhankelijk van de toepassing, met name of veel beweging en/of belvorming in het gefluidiseerde bed is gewenst.

### Bedeigenschappen

Hoewel ook bij doorstroming met vloeistoffen een goede fluidisatie kan worden bereikt, beperken we ons hier tot de in de praktijk veel vaker toegepaste gas-vast systemen. Bij fluidisatie iets boven de minimumsnelheid is in het ideale geval sprake van een zeer homogeen en rustig bed dat zich gedraagt als een niet kokende vloeistof. Bij wat hogere snelheden zal veel meer beweging in het bed optreden. Dit gaat vaak gepaard met het optreden van bellen en soms de vorming van voorkeurskanaaltjes van het gas. Het bed lijkt nu meer op een (soms heftig) kokende vloeistof. Een gefluidiseerd bed heeft ten opzichte van een vast bed een aantal duidelijke voordelen. Een goede menging en een veel betere warmte- en stofoverdracht vormen de belangrijkste. Bij hogere snelheden en een grote variatie in deeltjesgrootte bestaat overigens wel weer het risico dat er segregatie in het bed gaat

Figuur 1: Drukval  $\Delta p$  tijdens het stromen van gas door een bed van stortgoeddeeltjes, bij toenemende en afnemende gas-snelheid  $u$ . Tussen A en C treedt een overgang van een vast bed naar een gefluidiseerd bed op



Figuur 2: Globale classificatie van stortgoed naar hun fluidisatiegedrag. Op basis van het dichtheidsverschil tussen deeltjes en gas ( $\rho_s - \rho_g$ ) en de gemiddelde deeltjesgrootte  $d_p$

optreden. Door de hoge snelheid zullen kleine deeltjes uit het bed worden meegevoerd, terwijl de grotere (en/ofzwaardere) deeltjes in het bed naar beneden kunnen zakken.

### Fluidisatie niet altijd mogelijk

Hoewel fluidisatie dus een goed hulpmiddel kan zijn om een proces in een reactievat te verbeteren, blijkt helaas dat lang niet elk stortgoed kan worden gefluidiseerd. De mate van fluidiseerbaarheid van een product hangt sterk af van de gemiddelde deeltjesgrootte, de variatie in de deeltjesgrootte, de dichtheid van het materiaal, de cohesie en de vorm van de deeltjes. Hoewel een fluidisatiekolom meestal een beter beeld geeft van de mogelijkheden van een bepaald product, kan toch op basis van grootte en dichtheid van de deeltjes een eerste idee van de mogelijkheden worden verkregen. Vaak wordt hiervoor gebruik gemaakt van een door Geldart opgestelde classificatie (figuur 2). Hierbij wordt vooral gekeken naar de expansie van het bed en het optreden van bellen en kanaalvorming in het bed.

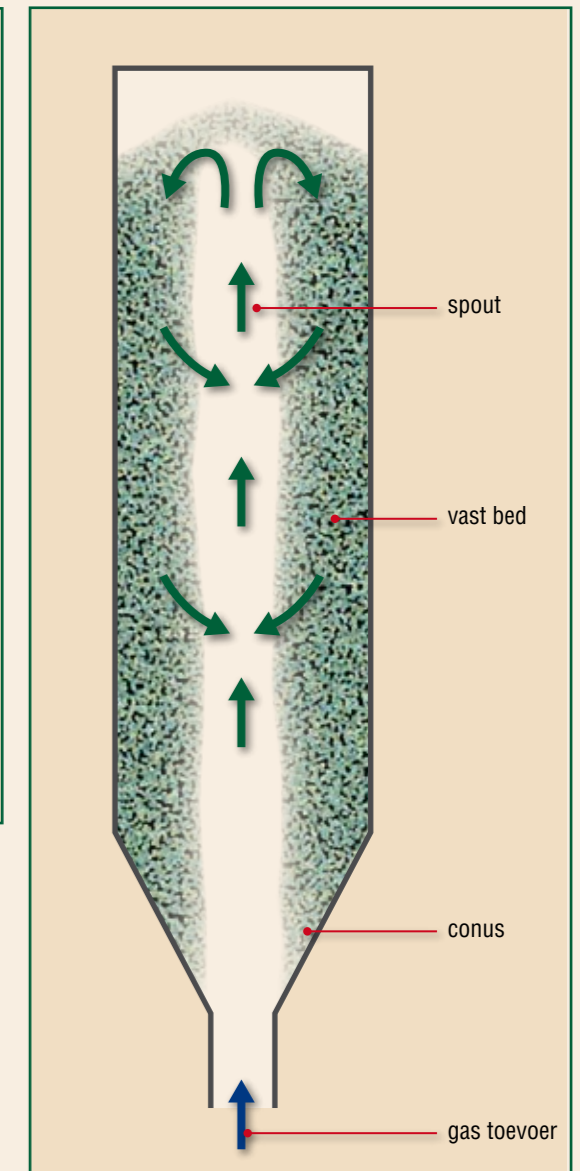
Er worden in figuur 4 groepen deeltjes onderscheiden.

Groep A: kleine deeltjes (gemiddelde diameter  $d_p \approx 30 - 100 \mu m$ ) met niet al te hoge echte dichtheid ( $\rho_s < 1400 \text{ kg/m}^3$ ) en geen of zeer weinig cohesie. De materialen in deze groep zijn goed fluidiseerbaar, geven een rustig bed met een regelmatige bedexpansie over een vrij groot snelheidsgebied tot aan  $u_{mb}$ . Een voorbeeld uit deze groep betreft katalysatoren bij kraakprocessen.

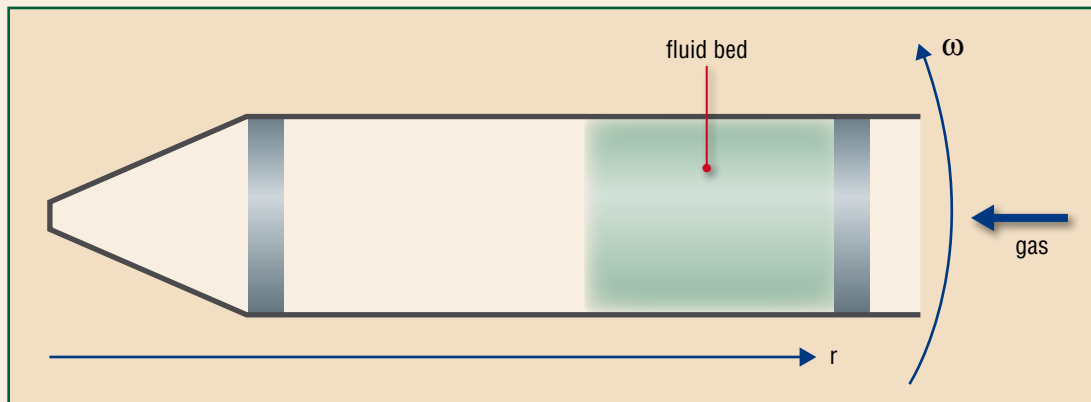
Groep B: dit zijn de wat grotere en zwaardere deeltjes ( $d_p \approx 100 - 800 \mu m$ ,  $\rho_s \approx 1400 - 4000 \text{ kg/m}^3$ ). Deze producten zijn nog redelijk fluidiseerbaar, met weinig bedexpansie en het toch al snel optreden van bellen. Het zijn vaak wat zandachtige producten.

Groep C: dit zijn cohesieve, fijne materialen ( $d_p < 50 \mu m$ ,  $\rho_s \approx 800 - 3000 \text{ kg/m}^3$ ) die zeer slecht of niet te fluidiseren zijn door de grote samenhang tussen de deeltjes. Door roeren of trillen van het materiaal treedt soms verbetering op. Voorbeelden uit deze groep zijn meel en sommige vlieggas-soorten.

Groep D: Grote deeltjes in een vrij groot dichtheidsgebied ( $d_p > 1000 \mu m$ ,  $\rho_s \approx 1000 - 4000 \text{ kg/m}^3$ ). Het gedrag van deze groep is nogal divers. Er bestaat veel kans op kanaalvorming en de vorming van grote trage bellen in het bed. De meeste producten in deze groep zijn wel geschikt als zogenaamde spouting beds (zie figuur 3). Hierbij wordt het gas meestal centraal ingeblazen en ontstaat een stroomkanaal waarin veel deeltjes worden meegesleurd. Dit kanaal wordt continu met deeltjes bijgevuld vanuit de omringende deeltjesmassa. Boven het bed, waar de gassnelheid kleiner is (meer ruimte voor de



Figuur 3: Spouted bed, toepasbaar voor deeltjes uit groep D die normaal slecht te fluidiseren zijn



**Figuur 4: Centrifugaal bed.** Door de rotatie wordt de waarde van  $g$  met een factor  $E = \omega^2 r / g$  verhoogd, waardoor ook bij grote gasdebieten nog een homogeen bed kan worden verkregen. Dure oplossing voor speciale toepassingen

stroming), vallen de deeltjes weer terug op het bed. Er vindt zo dus een continue rondstroming van deeltjes plaats. Een klein gedeelte van het gas zal overigens ook via percolatie door het vaste bed ontwijken.

Voor dit type bed is wel een grote hoeveelheid gas nodig en een vrij hoge snelheid. Voorbeelden zijn hier tarwekorrels en zeer grof zand.

Zoals gesteld kan de indeling van Geldart slechts worden gezien als een eerste indicatie voor het fluidisatiegedrag van een bepaald product en zal een fluidisatiekolom dan verdere informatie kunnen geven. Ook hierbij moet er trouwens rekening mee worden gehouden dat de stortgoeddruk (en dus de mate van samendrukken van het materiaal) in een dergelijke kolom vrij laag zal zijn. In een reactievat, en zeker bij wat grotere afmetingen, zal de druk veel hoger liggen en kan het materiaal in de praktijk wel eens minder goed te fluidiseren zijn dan uit de kolomtest was gebleken. Een standaard meetprocedure en de benodigde apparatuur voor het bepalen van het fluidisatiegedrag van Geldart A en B materialen is in de codes van de Astm te vinden.

### Andere typen gefluidiseerde bedden

Naast het normale gefluidiseerde bed en het spouted bed bestaat er nog een aantal speciale bedden voor aparte toepassingen, zoals:

**Fluidisatie onder hoge gasdruk.** De invloed van een hogere gasdruk op de minimum fluidisatiesnelheid  $u_{mf}$  is gering, maar de waarde van  $u_{mb}$  gaat wel duidelijk omhoog met de druk zodat minder snel bellen ontstaan. Dit heeft als voordeel dat dus grotere gashoeveelheden kunnen worden verwerkt zonder dat het bed ernstig wordt verstoord.

**Conische of zogenaamde tapered bedden.** De toename van de gassnelheid door de drukval (dus volumevergroting) in het bed wordt nu gecompenseerd doordat het bed naar boven toe een grotere doorsnede krijgt. Door de lagere snelheid worden minder kleine deeltjes door het gas meegenomen.

**Centrifugale gefluidiseerde bedden.** Hierbij roteert het gehele bed met een zekere omtreksnelheid in het horizontale vlak (zie figuur.4), waardoor de zwaartekracht  $g$  als het ware wordt opgeschaald met  $E = \omega^2 r / g$ . Hierdoor neemt ook de waarde van  $u_{mf}$  afhankelijk van de deeltjesgrootte toe met een factor tussen  $E$  en  $\sqrt{E}$ . De waarde van  $u_{mb}$  en de drukval over het bed nemen ook met een factor  $E$  toe. Het resultaat voor niet te diepe bedden (zodat  $\omega^2 r$  ongeveer constant is over de hoogte) is dat nu een redelijk homogeen bed kan worden gekregen bij hoge  $u_{mf}$  en een grote range van toelaatbare gasdebieten. Het is echter wel een zeer dure oplossing.

**Circulerende bedden.** Hierbij is de gassnelheid juist hoog gekozen om veel deeltjes uit het bed met de gasstroom mee te laten bewegen. De deeltjes worden dan via een afscheider weer uit het gas gehaald en na eventuele regeneratie weer naar het bed teruggevoerd.

### Voorbeelden

Vooral in de chemische en petrochemische industrie wordt vaak gebruik gemaakt van gefluidiseerde bedden. Zeker als procesreactor is een dergelijk bed aantrekkelijk vanwege de hoge warmte- en stofoverdracht. Daarnaast zijn er vele toepassingen als mixers of drogers bekend.

Als voorbeeld kan hier een tweetal toepassingen wat nader worden belicht.

**Gefluidiseerde verbranding van steenkool voor energie opwekking**

Het bed is hier meestal in eerste instantie

opgebouwd uit kleine zandfracties, later ten dele vervangen door de as uit de steenkool. Het bed wordt opgewarmd en er wordt een à twee procent steenkool toegevoegd. De bedtemperatuur is meestal niet hoger dan ca 850 °C. Zowel in als boven het bed zijn waterpijpen aangebracht om de warmte over te dragen. De fluidisatiesnelheid is meestal zodanig dat er wat belvorming optreedt zodat er veel beweging in het bed plaatsvindt. Voordelen van een dergelijk verbrandingssysteem zijn de lage bedtemperatuur, zodat met toevoeging van kalk eventuele zwavel al in het bed kan worden gebonden. Maar ook een zeer goede warmteoverdracht naar de pijpen in het bed, zowel door het innige contact als de bewegingen in het bed. Bovendien hoeft ook de kool niet zo fijn te worden gemalen als bij normale poederkoolverbranding. De deeltjesgrootte is niet kritisch. Als laatste kan het bed zowel atmosferisch als onder druk worden uitgevoerd.

### Het kraken van zware olieresiduen

In een zogenoemd FCC (Fluidized Catalytic Cracking)-proces wordt de op hoge temperatuur gebrachte olie vergast en samen met de katalysatordeeltjes naar het reactievat gevoerd. De opstijgende hete gassen zorgen hier voor een gefluidiseerd katalysatorbed, op een temperatuur van ca 780 °C. De door het gas meegesleurde deeltjes worden via een afscheider en valpijp weer in het bed teruggevoerd, de gekraakte producten worden via de afscheider afgevoerd en verder gefractioneerd en gezuiverd. Uit het bed wordt continu een stroom katalysator afgetapt en in een (ook als fluidbed uitgevoerde) regenerator van de opgenomen koolstof ontdaan. Deze deeltjes worden weer met de te kraken hete gassen naar de reactor gevoerd. Dit op grote schaal toegepaste systeem is een typisch voorbeeld van een op hoge temperatuur bedreven proces met circulerende bedden.

### Het scheiden van lucht en stof

Bijna altijd wanneer gas of lucht een rol speelt in systemen die kleine deeltjes bewerken, transporteren of opslaan, zal er een moment komen dat gas en stof weer moeten worden gescheiden. Dit komt aan bod in het volgende artikel, dat dan tevens de afsluiting vormt van deze reeks over de rol van lucht in solids processing. ■