

Nieuwe spuitkop voor slagroomsputbussen

**P.E.A. Rots
dr. R.F. Mudde
prof. dr. ir. H.E.A. van den Akker**

Delft, 19 mei 1993

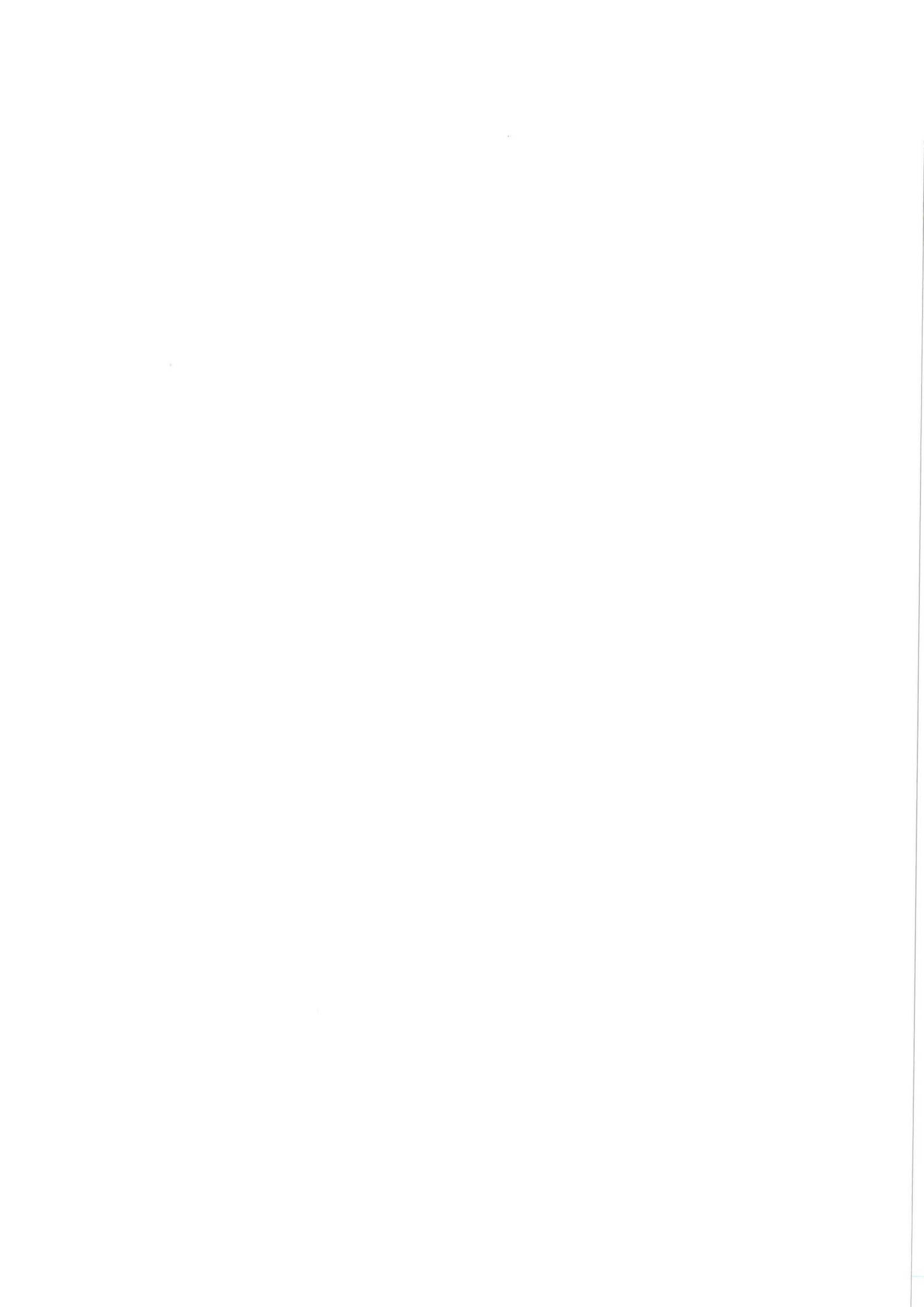
Nieuwe spuitkop voor slagroomsputbussen

onderzoek als afstudeerwerk aan de TU Delft

Technische Universiteit Delft
Kramers Laboratorium voor Fysische Technologie

Pascal E.A. Rots
dr. R.F. Mudde
prof. dr. ir. H.E.A. van den Akker

Delft, 19 mei 1993



Voorwoord

Dit rapport beschrijft het onderzoek naar de ontwikkeling van een nieuwe spuitkop voor slagroomsputbussen, dat ik heb uitgevoerd als afstudeerproject van de studie Scheikundige Technologie van de Technische Universiteit Delft en is geschreven als afstudeerscriptie van die studie.

Voorafgaand aan het onderzoek is mij van diverse kanten afgeraden er aan te beginnen, vanwege de onzekerheden als gevolg van het complexe rheologische gedrag van slagroom en twijfel over de gekozen weg om de kwaliteit van de uitgespoten slagroom te verbeteren. Ook het gestelde doel, ontwikkeling van een nieuwe spuitkop voor slagroomsputbussen, werd als te ambitieus afgedaan.

Het onderzoek, dat negen maanden duurde, bracht de nodige tegenslagen en verrassingen met zich mee. Nadat het project net 7 weken had stil gelegen voor het maken van de benodigde buizen, ging op de eerste dag experimenteren een belangrijk apparaat (gas mass flow meter) kapot, dat drie weken reparatie vergde.

Het werken met slagroom, gedurende het onderzoek, had verschillende kanten. Enerzijds was het vaak nodig een produktconfrontatie met de opgeklopte room aan te gaan, anderzijds bracht een goeie meetserie ook 2 uur afwassen met zich mee en bleek, bij een ongeluk, dat op druk gebrachte room met een straal van 10 meter door de labhal gespoten kon worden.

Het resultaat van het project, een werkende spuitkop voor slagroomsputbussen, is mede en vooral ook tot stand gekomen dankzij de medewerking van:

- Cees Vermeulen, die de experimenten heeft begeleid
- de werkplaats, die veel apparatuur heeft gemaakt en naarmate het project vorderde dat vaak bijna 'instant' klaar had
- ir. Geert Verhoeven, die het onderzoek heeft ondersteund en begeleid vanuit Coberco
- alle huisgenoten, clubgenoten en familie, die in alle gesprekken over het project de nodige adviezen hebben gegeven
- Sanomat en de vele vakgroepen op de TU Delft, die apparatuur voor het project beschikbaar hebben gesteld en veel advies hebben gegeven
- bakker Roodenrijs voor een bezoek achter de schermen in zijn restaurant en banketbakkerij
- dr. Rob F. Mudde, de supervisor van het project op het Kramers Laboratorium, die het project gedurende 9 maanden intensief en direct heeft begeleid en ondersteund

Allen dank !

Pascal Rots

Inhoudsopgave

Voorwoord	ii
Samenvatting	v
Lijst van symbolen	vi
Verklarende woordenlijst	viii
1. Inleiding	1
2. Conventionele spuitbus en processen in gebruik voor het bereiden van slagroom	2
2.1. Conventionele slagroomsputbus	2
2.2. Processen om room te schuimen en stijf te maken	2
2.2.1. Mixer proces	3
2.2.2. Spuitbus proces	3
3. Experimenteel werk	5
3.1. Voorbereidingen	5
3.2. Meetopstellingen	6
3.2.1. Toevoeropstelling voor room/stikstof mengsels	7
3.2.2. Toevoeropstelling voor room/lachgas mengsels	7
3.3. Meetvariabelen -	7
3.3.1. Meetbare input variabelen	8
3.3.2. Niet meetbare input variabele(n) (verstoringen)	9
3.3.3. Meetbare output variabelen	9
3.3.4. Niet meetbare output variabelen	9
3.4. Experimenten	10
3.4.1. Oorspronkelijk meetplan	11
3.4.2. Experimenten met room en stikstof	11
3.4.2.1. Reproduceerbaarheid van de meetmethoden	11
3.4.2.2. Reproduceerbaarheid van de experimenten	13
3.4.2.3. Invloed gas/vloeistofdebiet verhouding	14
3.4.2.4. Ontstaan van boterlaag op de korrels	14
3.4.2.5. Invloed korreldiameter	15
3.4.2.6. Invloed buislengte	16
3.4.2.7. Opslag	16
3.4.3. Experimenten met room en lachgas	16
3.4.3.1. Verschillen tussen room/stikstof en room/lachgas experimenten	17
3.4.3.2. Invloed van de drukval over de kraan voor de korrelbuis	17
3.4.3.3. Invloed van het vooraf schudden van de room	17
3.4.3.4. Invloed van de lachgas druk	18
3.4.3.5. Minimale benodigde drukval over korrelbuis	18
3.4.3.6. Invloed kraan en buisdiameter op het vloeistofdebiet	18
3.4.3.7. Invloed korreldiameter en buislengte	19
3.4.3.8. Onvolledig leegspuiten spuitbus	19
3.4.3.9. Experimenten om laminaire stroming aan te tonen	19
3.4.3.10. Kloppen van spuitroom uit spuitbussen in een korrelbuis	19

3.4.4.	Inzakken van spuitbuslagroom	20
3.4.4.1.	Slagroom kloppen in glove box	20
3.4.4.2.	Daling van de opslag na het uitspuiten	20
3.4.4.3.	Tegengaan van de daling van de opslag	21
3.4.5.	Overige experimenten	21
3.4.5.1.	Testen met conventionele spuitbus	21
3.4.5.2.	Opslag en botergehalte in slagroom geklopt met mixer	21
3.4.5.3.	Room kloppen met puddingpoeder	21
3.4.5.4.	Bezoek aan banketbakker Roodenrijs	22
4.	Resultaten van het experimentele werk	23
4.1.	Kloppen van room in korrelbuis met stikstof	23
4.2.	Kloppen van room in korrelbuis met lachgas	24
4.3.	Inzakken van spuitbuslagroom	25
4.4.	Overige resultaten	25
5.	Theoretische verklaring	26
5.1.	Stromingsverschijnselen bij het kloppen	26
5.1.1.	Belang van schuifkrachten tijdens het uitboteren	26
5.1.2.	Stroming bij het kloppen bepaald door schuifkrachten	26
5.1.3.	Effect van schuifkrachten in het algemeen	28
5.1.4.	Effecten van schuifkrachten op het kloppen van room	29
5.1.5.	Yield stress van uitgeboterde slagroom	30
5.1.6.	Homogeniteit van het stijf worden van slagroom bij het slaan met een mixer	30
5.1.7.	Room kloppen in een spuitkop	33
5.2.	Opslag en theoretisch haalbare opslag in gespoten slagroom	36
5.3.	Het inzakken van de slagroom na het uitspuiten	38
5.3.1.	Vergelijkingen van diffusie tussen gasbellen	38
5.3.2.	Oorzaken van het inzakken van slagroom	39
5.3.3.	Tegengaan van inzakken uitsluitend bij minder grote opslag	40
5.3.4.	Computersimulatie van diffusie in slagroom	40
5.3.5.	Slapper worden van uitgespoten slagroom door de daling van de gasfractie	42
6.	Conclusies	44
7.	Aanbevelingen	46
	Literatuurlijst	47
	Bijlage 1. Simulatieprogramma van gasdiffusie	
	Bijlage 2. Beschrijving meetseries	

Samenvatting

Om de kwaliteit van slagroom uit spuitbussen te verbeteren is een miniatuur statische menger (spuitkop) ontwikkeld. De spuitkop brengt uitbotering in de room tot stand, waardoor de stevigheid van de slagroom verbeterd wordt en de verkregen stevigheid intact blijft, zoals bij de in een mixer geklopte slagroom. Voor de ontwikkeling van deze spuitkop is uitgegaan van een procédé zoals toegepast in grote slagroomklopmachines, te weten een lange buis gevuld met korrels. Dit apparaat is schaalverkleind zodat het ook in een spuitbus te gebruiken is. Daarnaast is het inzakken van deze slagroom onderzocht en zijn de stromingsverschijnselen beschreven, die het kloppen en inzakken van slagroom bepalen.

Bij de ontwikkeling van de spuitkop is niet-gehomogeniseerde room gebruikt, is de buislengte gevarieerd van 1 tot 40 cm, is de korreldiameter gevarieerd van 1 tot 3 mm, is de slagroom uitgespoten met stikstof en met lachgas, is de volumeverhouding van stikstof- en roomdebiet bij het uitspuiten gevarieerd en is de lachgas druk op het voorraadvat room gevarieerd.

Gebleken is dat het stijf worden van slagroom (uitbotering) wordt bevorderd naarmate de gas/vloeistofdebiet verhouding en buislengte toenemen en de korreldiameter afneemt. Het optimum van deze variabelen is begrensd door minimale en maximale waarden. Bij overschrijding van deze uiterste waarden, blijft de slagroom te slap (niet stijf genoeg), wordt de slagroom boterachtig (te stijf) en/of verstopt de buis.

Opslag bij het uitspuiten met lachgas is 170 % met uitschieters naar 240 %, terwijl het uitspuiten met stikstof een opslag gaf van minder dan 100 %.

Het inzakken van met lachgas gespoten room is een gevolg van diffusie van het lachgas van de schuimbellen naar de omgeving. Dit wordt veroorzaakt door enerzijds het grote lachgas concentratieverschil tussen de schuimbellen en de buitenomgeving, en anderzijds de goede oplosbaarheid van lachgas in slagroom.

Het tegengaan van het inzakken zal gepaard gaan met een veel minder grote opslag in de geproduceerde slagroom. Het inzakken wordt tegengegaan door af te stappen van een gas met een grote oplosbaarheid (lachgas). Daardoor is het niet meer mogelijk om room volgens het expansieprincipe te schuimen. Dan moet worden overgeschakeld op het dispergeerprincipe (waarbij als gas lucht kan worden gebruikt) en het is niet gelukt daarmee slagroom te produceren met hoge opslag.

Lijst van symbolen

γ	= oppervlaktespanning	N/m
ϵ	= porositeit gevulde korrelbuis	-
η	= viscositeit	Pa.s
θ	= plaatscoördinaat in tangentiële richting	m
ρ	= dichtheid	kg/m ³
$\rho_{\text{gas, 1 atm}}$	= dichtheid gas bij 1 atmosfeer	kg/m ³
ρ_{gas}	= dichtheid gasstroom	kg/m ³
ρ_{totaal}	= gemiddelde dichtheid van gas- en vloeistofstroom	kg/m ³
ρ_{vl}	= dichtheid vloeistofstroom	kg/m ³
$\rho_{\text{vloeibare room}}$	= dichtheid vloeibare room	kg/m ³
τ_0	= yield stress	N/m ²
$\tau_{r\theta}$	= schuifspanning in tangentiële θ -richting orthogonaal op de radiale richting	N/m ²
τ_{ry}	= schuifspanning in y-richting orthogonaal op de radiale richting	N/m ²
τ_{xy}	= schuifspanning in y-richting orthogonaal op x-richting	N/m ²
ϕ	= volumedebiet	m ³ /s
ϕ_{massa}	= gas massadebiet	kg/s
ϕ_{gas}	= volumedebiet gasstroom	m ³ /s
ϕ_{totaal}	= totale volumedebiet van gas- en vloeistofstroom	m ³ /s
ϕ_{vl}	= volumedebiet vloeistofstroom	m ³ /s
ω	= molaire gasfractie van component	mol/mol
ω	= hoeksnelheid	rad/s
a	= straal kom	m
A	= doorsnede lege korrelbuis,	m ²
A	= oppervlakte waardoor transport plaatsvindt	m ²
A	= oppervlakte waarop schuifspanning aangrijpt	m ²
A_{wr}	= gedissipeerde energie per massa-eenheid	J/kg
b	= straal mixer	m
C_g	= gasconcentratie van component	kg/m ³
C_1	= vloeistofconcentratie van component	kg/m ³
ΔC_g	= gasconcentratieverschil	kg/m ³
ΔC_1	= vloeistofconcentratieverschil	kg/m ³
d	= diameter	m
d_{kanaal}	= gemiddelde kanaaldiameter	m
d_{korrel}	= korreldiameter	m
e	= gedissipeerd vermogen per volume	J/m ³ s
F	= schuifkracht	N
h	= hoogte vloeistofelement	m
H_i	= Henry coëfficiënt voor gas/vloeistof systeem	Pa
ID	= diffusiecoëfficiënt van de gascomponent in vloeistof	m ² /s
k_1	= stofoverdrachtscoëfficiënt in de vloeistoffase	m/s
K_1	= constante	kgm/s ²
K_2	= constante	m/s
L	= lengte stroomkanaal	m

Lijst van symbolen

L	= breedte van vloeistoflaag	m
m	= oplosbaarheid van gascomponent in vloeistoffase	kg/kg
m_{slagroom}	= massa slagroom	kg
$m_{\text{vloeibare room}}$	= massa uitgespoten vloeibare room	kg
Δm_{gas}	= massa geëxpandeerd gas	kg
M	= krachtmoment	Nm
M	= molaire massa	kg/mol
M_i	= molaire massa gas	kg/mol
M_{vl}	= molaire massa vloeistof	kg/mol
n	= aantal mol van component in volume V	mol
p	= druk	Pa
P	= gedissipeerd vermogen in stroomkanaal	J/s
p_0	= druk van omgeving	Pa
p_i	= partiële gasdruk van component	Pa
Δp	= drukval	Pa
$\Delta p_{\text{Laplace}}$	= Laplace overdruk	Pa
q	= verhouding van gas- en vloeistofdebiet	-
r	= lengte arm	m
r	= plaatscoördinaat in radiale richting	m
R	= belstraal	m
R	= straal kanaal	m
R_0	= straal waarbij $\tau = \tau_0$	m
Re	= Reynolds getal	-
v	= snelheid	m/s
v_θ	= snelheid in tangentiële θ -richting	m/s
v_y	= snelheid in y -richting	m/s
V	= volume	m^3
V	= volume stroomkanaal	m^3
V'	= volume per hoogteëenheid	m^2
V_{gas}	= volume gas	m^3
V_{slagroom}	= volume slagroom	m^3
$V_{\text{vloeibare room}}$	= volume vloeibare/vaste room	m^3
x	= plaatscoördinaat	m
$x_{i,\text{massa}}$	= massafractie opgelost gas	kg/kg
$x_{i,\text{mol}}$	= molfractie opgelost gas	mol/mol
y	= plaatscoördinaat	m

Verklarende woordenlijst

botergehalte	: maat voor de uitbotering in slagroom, uitgedrukt in ml vetfase per gram slagroom
coalescentie	: het samengaan van twee gasbellen tot één grotere in een schuim
dispergeerprincipe	: wijze van schuim maken door gasbellen in de vloeistof te dispergeren
disproportionering	: het groeien van grotere gasbellen ten koste van kleinere gasbellen in een schuim
drainage	: het uitzakken van de vloeistof in een schuim
drijfgas	: het gas waarmee room uit de spuitbus wordt geperst
expansieprincipe	: wijze van schuim maken door gas uit de vloeistof te laten expanderen door drukverlaging
gasopslag	: zie opslag
gas/vloeistofdebiet verhouding	: verhouding van het volumedebiet van de gasstroom en het volumedebiet van de vloeistofstroom
gehomogeniseerde room	: room waarin de vetdeeltjes heel goed verdeeld zitten, waardoor er in de room veel minder snel uitbotering optreedt; deze room wordt gebruikt in slagroomsputbussen
geslagen slagroom	: slagroom die geproduceerd is door room te slaan
gespoten slagroom	: slagroom die geproduceerd is door room te spuiten
kloppen	: het slaan of spuiten van room
korrelbuis	: spuitkop die bestaat uit een buisje dat gevuld is met een gepakt bed van kleine glazen korreltjes
lachgas	: N_2O , het drijfgas in conventionele slagroomsputbussen
niet-gehomogeniseerde room	: room die bij het kloppen makkelijk uitbotert, en normaal gebruikt wordt om met een mixer slagroom te slaan
opslag	: volume gas per volume vloeibare/vaste room in slagroom in procenten

Verklarende woordenlijst

room	: melk met een verhoogde hoeveelheid vet; vloeibaar, nog niet geslagen of gespoten
rozet	: de gebruikelijke uiterlijke vorm (stervorm) van de slagroom die uit een spuitbus wordt uitgespoten
slaan van room	: slagroom produceren door het roeren van room, waardoor de room snelheid krijgt en gas erin gebracht wordt.
slagroom	: geslagen of gespoten room
slagroomsputbus	: de spuitbus waarin room "verpakt" is
spuiten van room	: slagroom produceren door room en gas door een spuitkop te persen
spuitroom	: gehomogeniseerde room waar suiker, K-carrageen en emulgator zijn toegevoegd, en die wordt gebruikt in slagroomsputbussen
vloeistofdebiet	: debiet van vloeibare room
uitgeboterde slagroom	: slagroom waarin een vetstructuur voor de stevigheid zorgt
uitbotering	: het samenklonteren van vetdeeltjes in de room waardoor een vetstructuur ontstaat

1. Inleiding

De wens bestaat om de kwaliteit van slagroom uit spuitbussen te verbeteren. De kwaliteitsgebreken ervan worden door van den Boogaard treffend in een Coberco rapport (lit. 2) omschreven: "Na het uitspuiten wordt het droge uiterlijk van de slagroom natter en slapper, de rozet krimpt, de rozetranden vervloeien en de smaakgevoelens verandert in 'een hap lucht'. Na twintig minuten resteert weinig meer dan een plasje room met gasbellen."

Dit rapport beschrijft een onderzoek dat als doel had een miniatuur statische menger te ontwikkelen, zodat de kwaliteit van die slagroom verbetert. De menger (spuitkop) moet uitbotering in de room tot stand brengen, waardoor de stevigheid van de slagroom verbeterd wordt en de verkregen stevigheid intact blijft, zoals bij de in een mixer geklopte slagroom.

In dit onderzoek is nagegaan of een bestaand procédé, zoals toegepast in grote slagroomklopmachines, ook op kleine schaal in een spuitbus te gebruiken is. Deze schaalverkleining is op het Kramers Laboratorium voor Fysische Technologie van de TU Delft onderzocht. Daarnaast is het inzakken van deze slagroom onderzocht en gepoogd de stromingsverschijnselen theoretisch te beschrijven, die het kloppen en inzakken van slagroom bepalen.

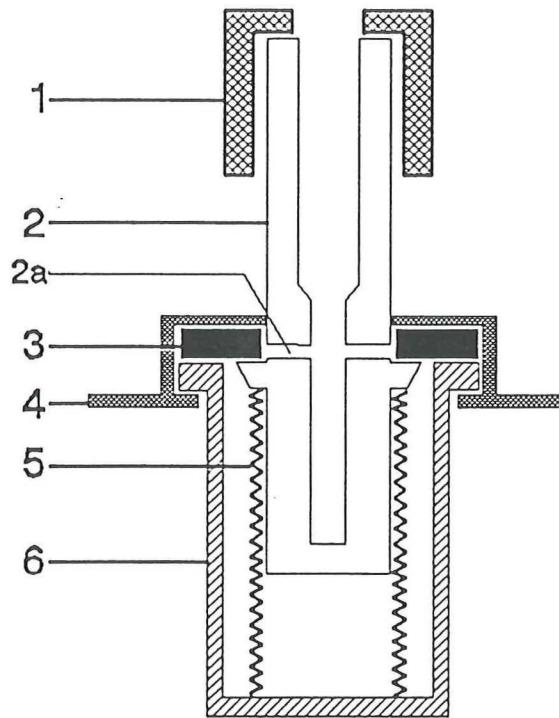
Het procédé betreft een buis gevuld met korrels, van nu af korrelbuis genoemd, waar room en gas onder druk doorheen geperst worden, waardoor de slagroom uitbotert en stijf wordt.

Bij de ontwikkeling van de spuitkop is niet-gehomogeniseerde room gebruikt, is de buislangte gevarieerd van 1 tot 40 cm, is de korreldiameter gevarieerd van 1 tot 3 mm, is de slagroom uitgespoten met stikstof en met lachgas, is de volumeverhouding van stikstof- en roomdebiet bij het uitspuiten gevarieerd en is de lachgasdruk op het voorraadvat room gevarieerd.

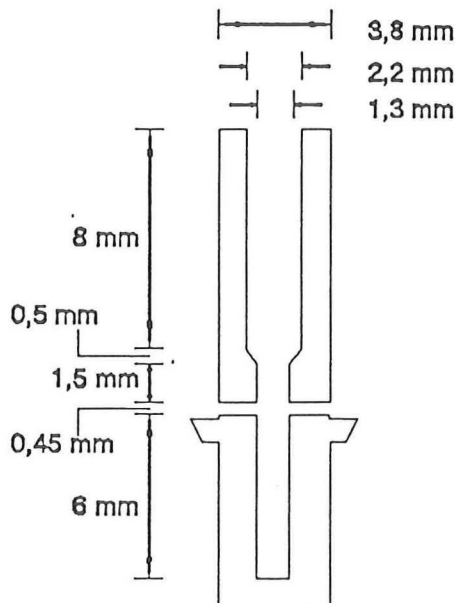
In dit rapport is een verklarende woordenlijst opgenomen, die de gebruikte termen definieert en toelicht, en vormt hoofdstuk 2 een inleidend hoofdstuk dat de conventionele spuitbus en processen beschrijft die in gebruik zijn bij het bereiden van slagroom.

Hoofdstukken 3 en 4 beschrijven respectievelijk het experimentele onderzoek en de resultaten van dat onderzoek. De experimenten zijn onderverdeeld in het kloppen van room in de korrelbuis met stikstof, het kloppen van room in de korrelbuis met lachgas en het inzakken van slagroom geklopt met lachgas. Deze hoofdstukken zijn zo opgezet dat de resultaten in hoofdstuk 4 worden toegelicht in de experimentenbeschrijving in § 3.4 van hoofdstuk 3. Deze experimentenbeschrijving verwijst voor meer gedetailleerde meetgegevens naar de complete beschrijving van de experimenten in bijlage 2.

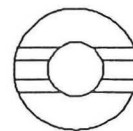
Hoofdstuk 5 geeft een theoretisch achtergrond van het onderzoek en beschrijft de stromingsverschijnselen bij het kloppen, het theoretisch haalbare gasvolume in gespoten slagroom en de stromingsverschijnselen die het inzakken van gespoten slagroom bepalen.



Figuur 2.1. De spuitkop van een slagroomsputbus: (1) drukmechanisme, (2) centrale buisje, (2a) opening in buisje, (3) rubber ringetje, (4) metalen bovenkant spuitbus, (5) veertje, (6) plastic hulsje.



Figuur 2.2. Het (centrale) buisje van een spuitbus.



Figuur 2.3. Bovenaanzicht van de toevoeropeningen van het (centrale) buisje van een spuitkop.

2. Conventionele spuitbus en processen in gebruik voor het bereiden van slagroom

Dit hoofdstuk beschrijft de conventionele slagroomspruitbus en de twee processen om room te schuimen en stijf te maken. In dit hoofdstuk wordt met spuitbus de conventionele slagroomspruitbus bedoeld.

2.1. Conventionele slagroomspruitbus

De slagroomspruitbus bestaat uit een holle aluminium bus met een spuitkop.

De spuitkop, zie figuur 2.1, is een buisje (2), met wat hulpstukken (1,3,4,5,6) om dat buisje te kunnen afsluiten dan wel te openen.

Het buisje (figuur 2.2) is het hart van de spuitkop, waar de schuimvorming optreedt. De room komt het buisje binnen via vier openingen met een diameter van 0,45 mm, waarvan er twee in de figuur zichtbaar zijn. De slagroom verlaat het buisje aan de bovenkant, via de opening met een diameter van 2,2 mm.

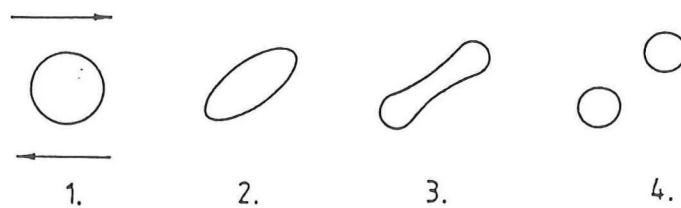
De configuratie van de vier openingen met een diameter van 0,45 mm is weergegeven in figuur 2.3. Dit is een doorsnede van het buisje loodrecht op de lengterichting van het buisje, door het vlak waar de vier openingen in liggen. Te zien is dat de vier openingen op twee parallelle lijnen liggen en dus geen sterconfiguratie ten opzichte van het middelpunt van het buisje hebben.

De spuitkop, zie figuur 2.1, wordt in gesloten stand wordt gehouden doordat een veertje (5) het buisje (2) omhoog drukt, zodat de gaatjes (2a) worden afgesloten door een rubber ringetje (3). Door het buisje naar beneden te drukken, door op de bovenkant van de spuitkop te drukken (1), ontstaat er ruimte tussen de kleine gaatjes en het ringetje, waardoor de room kan worden uitgespoten.

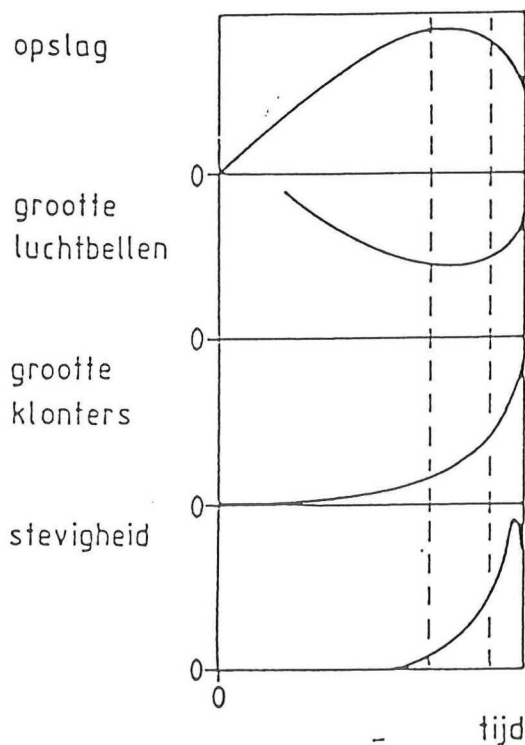
De overige onderdelen uit figuur 2.1 zijn een plastic hulsje (6) en de metalen bovenkant van de spuitbus (4). Het plastic hulsje is voorzien van grote gaten, zodat de room er vrij doorheen kan stromen en dient om het veertje (5) van tegendruk te voorzien. Het plastic hulsje wordt op zijn beurt weer op z'n plaats gehouden doordat het in de stalen bovenkant van de spuitbus is ingeklemd.

2.2. Processen om room te schuimen en stijf te maken

Het schuimen van room gebeurt met een mixer of met een spuitbus volgens twee geheel verschillende processen, die duidelijk verschillende slagroomstructuren geven. Deze paragraaf beschrijft die processen bij een mixer (§ 2.2.1) en bij een spuitbus (§ 2.2.2).



Figuur 2.4. Schematische voorstelling van het breken van een druppel of gasbel in stroming met afschuiving.



Figuur 2.5. Processen die plaatsvinden gedurende het opkloppen van room. Stevigheid is bijv. de tijd nodig om een gewicht in het opgeklopte product te laten zakken. In het gebied tussen de onderbroken lijnen is het product geschikt voor gebruik. Erg globaal.

2. Conventionele spuitbus en processen in gebruik voor het bereiden van slagroom

Deze beschrijving is tot stand gekomen door een literatuurstudie voorafgaand aan dit onderzoek en behoort dus niet tot dit onderzoek. Voor deze beschrijving is gebruik gemaakt van het werk van Prins (lit. 5), Darling (lit.3) en Walstra (lit. 6), en deze is opgenomen in dit rapport om het experimentele werk te verduidelijken.

2.2.1. Mixer proces

Het schuimen van room met een mixer geschiedt door middel van het dispergeren van gas, waarbij de stijve structuur ontstaat door uitbotering.

Het dispergeren van gas is het fijn verdelen van gas in de room. Dit kan door het gas fijn verdeeld in de room te blazen, of door eerst grotere bellen in te brengen die met mechanische krachten in kleinere verdeeld worden.

Voor dit proces is energie nodig, die wordt gedissipeerd door schuifkrachten. Die schuifkrachten vervormen grote bellen, die daarbij stukgetrokken worden, zoals aangegeven in figuur 2.4.

De schuimstructuur wordt stijf doordat vetdeeltjes aan elkaar klonteren (uitboteren). Deze klontering ontstaat doordat de vetdeeltjes, met name op het gas/vloeistofoppervlak, elkaar binden. Dit komt mede tot stand en wordt gestimuleerd door optredende schuifkrachten.

In volledig geklopte slagroom is het oppervlak van elke luchtcel voornamelijk samengesteld uit gedeeltelijk geklonterde vetdeeltjes, maar is er ook nog het oorspronkelijke eiwit netwerk over. De stijfheid van de schuimstructuur wordt verkregen door bruggen tussen geclusterde vetdeeltjes van de verschillende luchtcellen en door absorptie van een vetdeeltje aan meerdere luchtcellen.

In geklopte slagroom moeten de vetklonters en luchtbellens van dezelfde grootte zijn, liefst 10 - 100 μm .

Het stijf kloppen moet tijdig gestopt worden, omdat anders de uitbotering te ver gaat. Het schuim wordt dan wel steviger, maar ook grover, doordat de klonters in grootte toenemen. Dat gaat dan zo ver dat ze uitgroeien tot boterkorrels, waarbij de luchtbellens coalesceren en weer verdwijnen. Deze veranderingen worden geïllustreerd in figuur 2.5.

2.2.2. Spuitbus proces

Het schuimen van room gebeurt bij het gebruik van een spuitbus door middel van expansie van gas, waarbij een eiwit netwerk, samen met andere oppervlakte-actieve stoffen, het schuim stabiliseert.

Voor het schuimen door het expanderen van gas wordt het drijfgas van de spuitbus gebruikt. Dat gas (lachgas) wordt daartoe bij 8 bar in de room opgelost. Bij het uitspuiten van de room uit de spuitbus daalt de druk van 8 atmosfeer in de spuitbus tot atmosferische druk, waardoor de gasoplosbaarheid aanzienlijk daalt. Het lachgas zal dan uit de vloeistof treden en expanderen tot gasbellens. De gasbellens worden gevormd door heterogene kiemvorming.

2. Conventionele spuitbus en processen in gebruik voor het bereiden van slagroom

Bij het uitspuiten van room gaat de emulsie schuimen zonder dat de uitbotering optreedt, die wel bij het mixer proces wordt waargenomen. Het schuim wordt gestabiliseerd door een eiwit netwerk, in combinatie met andere oppervlakte-actieve stoffen. Doordat er geen uitbotering plaatsvindt, is het schuim minder goed bestand tegen mechanische behandeling, waardoor het snel grover wordt (disproportionering). Wel kan men met deze produkten een hoge opslag bereiken, bijv. 200 % i.p.v. bijv. 100 % bij het kloppen met een mixer.

Het ontbreken van een vetstructuur en het hogere opkloppercentage maken gespoten slagroom minder stevig dan geslagen slagroom, wat over het algemeen als "minder lekker" wordt ervaren.

3. Experimenteel werk

Het experimenteel werk vormde het belangrijkste deel van dit afstudeerproject en daar is ook de meeste tijd aan besteed.

Dit hoofdstuk beschrijft in § 3.1 de voorbereidingen voor het experimentele werk, in § 3.2 de gebruikte meetopstellingen, in § 3.3 de relevante meetvariabelen en in § 3.4 de uitgevoerde experimenten.

§ 3.1. Voorbereidingen

Doel was om een miniatuur statische menger voor slagroomsputbussen te ontwikkelen, die werkt volgens het Sanomat opkloppincipe. Deze menger (spuitkop) moest uitbotering in de spuitroom teweeg brengen, zodat de kwaliteit (stevigheid) van het opgeklopte produkt verbeterd zou worden, waarbij

- de menger op de bestaande spuitbus en op bussen volgens het Airspray principe gebruikt moet kunnen worden
- de menger in het schap van de supermarkt moet kunnen passen
- de menger er eventueel los bij verpakt kan worden
- de menger met heet water te reinigen is
- de spuitbus geheel leeg gespoten moet kunnen worden

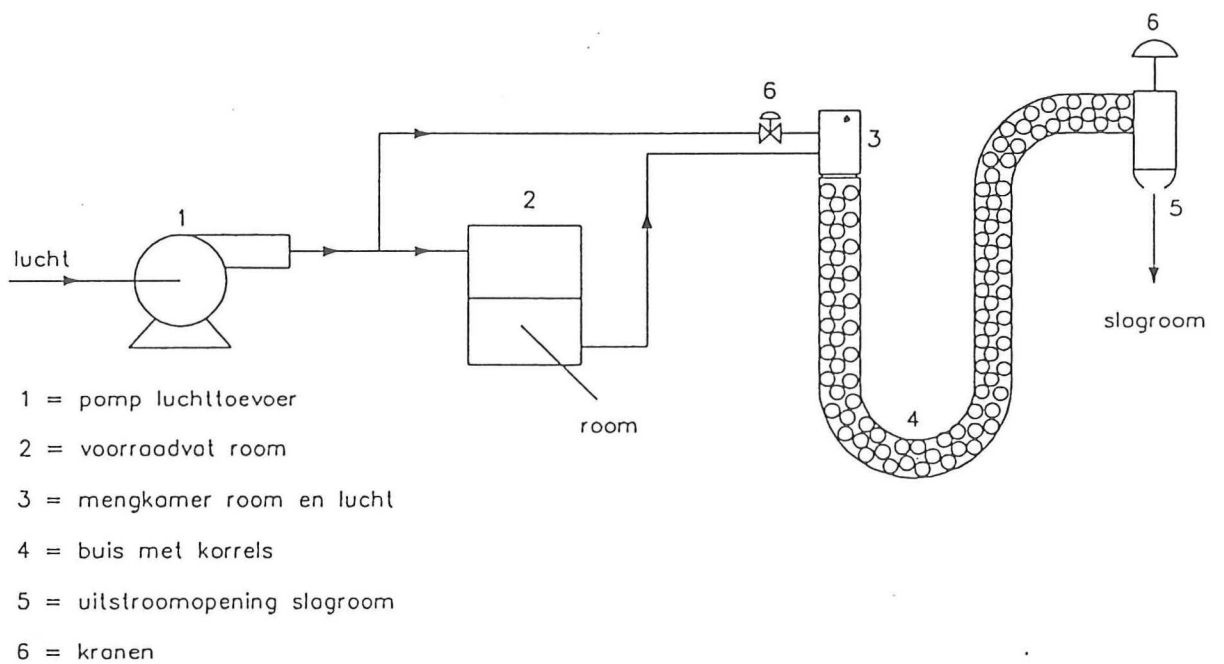
Het Sanomat principe betreft het principe van een slagroomklopparaat dat door de firma Sanomat wordt gemaakt. Het belangrijke deel van het apparaat is een buis, waar room en lucht onder hoge druk (8 bar) in gaan. De buis is gevuld met schijven. Op elke schijf staat een groot aantal plaatjes met een hoogte van 2,2 mm en de afstand tussen de plaatjes bedraagt 1,1 mm. De room beweegt zich door deze doolhofstructuur, die op elke schijf is aangebracht, van schijf naar schijf, en komt na de laatste schijf naar buiten.

Om het onderzoek voor te bereiden, heb ik enerzijds het rapport 'Kwaliteit van slagroom uit spuitbussen' geschreven en anderzijds contact gelegd met diverse instellingen en bedrijven om overleg over het project te voeren.

Het rapport 'Kwaliteit van slagroom uit spuitbussen' beschrijft de room in de spuitbus, tijdens het schuimen en stijf maken en in het schuim, en de specifieke problemen van de uitgespoten slagroom.

De contacten met diverse instellingen en bedrijven betrof, naast andere groepen binnen de TU Delft en Coberco, bezoeken aan de LU Wageningen, Universiteit Twente en Sanomat en correspondentie met het Nederlands Instituut voor Zuivelonderzoek (NIZO) en Dairy Industries Int. (UK)

De verschillende contacten zijn gelegd omdat de LU Wageningen een promotieonderzoek uitvoert naar 'instant food toepassingen' (gefinancierd door Coberco), de Universiteit Twente onderzoek uitvoert naar mixers voor textielschuim, Sanomat de vermelde



Figuur 3.1. Slagroomklopmachine van firma Sanomat.

3. Experimenteel werk

slagroomklopmachines produceert, het NIZO voor Coberco een onderzoek heeft uitgevoerd als voorbereiding op dit afstudeerproject en Dairy Industries Int. heeft gepubliceerd over slagroom.

Uit gesprekken op het onderzoekslaboratorium van Coberco in Deventer bleek dat zowel een langere (Sanomat) buis, met meer schijfjes, als meer luchttoevoer bij de room leidde tot stijvere slagroom (meer uitbotering).

Het bezoek aan Sanomat leverde informatie op over de technieken, die zij toepasten in hun slagroomklopmachines. Gebleken is dat het onderzoek zeer beperkt zou worden als vastgehouden zou worden aan het principe van de buis gevuld met de schijfjes, die een doolhof structuur vormen. Aan dit principe viel weinig te variëren en dus zou er weinig aan gemeten kunnen worden.

Veel bruikbaar bleek een ander principe dat Sanomat toepaste, namelijk een buis die gevuld is met korrels waar de room en lucht eveneens onder druk doorheen geperst werden. Ten eerste kon met dit principe veel meer gevarieerd worden. Ten tweede kon de werkplaats van het laboratorium voor dit principe de apparaten (buizen) maken, die nodig waren voor het onderzoek, wat bij het andere principe niet mogelijk bleek. Ten derde heeft Sanomat een machine uitgeleend die werkt volgens dat principe van een buis met korrels, waarvan delen konden worden ingepast in de meetopstelling.

Daarnaast bleek uit gesprekken bij Sanomat dat zowel meer vet in de room als een buis met kleinere korrels leidde tot stijvere slagroom.

Op grond van dit bezoek is besloten het onderzoek te richten op het ontwikkelen van een spuitkop, die werkt volgens het principe van de buis met korrels, i.p.v. de principe van de buis gevuld met schijfjes.

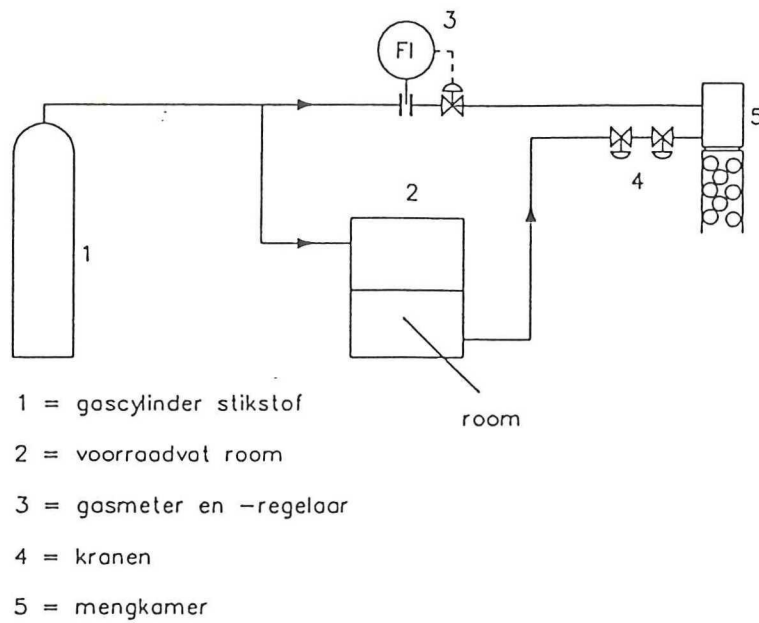
§ 3.2. Meetopstellingen

Er is uitgegaan van een machine van firma Sanomat om room mee te kloppen, die veel gebruikt is door banketbakers en restaurants.

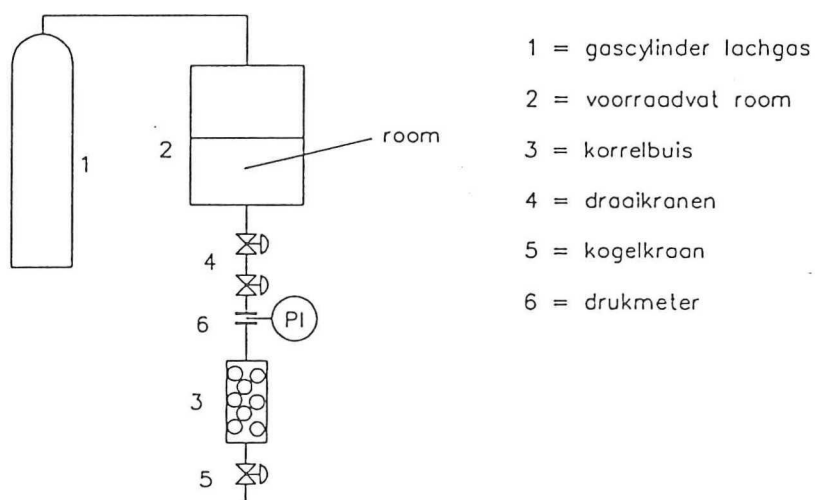
Het essentiële onderdeel van die machine (zie figuur 3.1) is een 90 cm lange buis, die gevuld is met korrels van 5 mm. Room en lucht worden samen onder druk (6 bar) door deze buis geperst, waardoor stijve slagroom als produkt uit deze buis komt. Met een buisdiameter van 2 cm kan er dan circa 100 liter slagroom per uur geproduceerd worden.

Nadeel van deze buis waren z'n afmetingen. Z'n lengte van 90 cm is vele malen te groot om zo'n buis te gebruiken als spuitkop van slagroomsputbussen. Om een met korrels gevulde buis (korrelbuis) als spuitkop toe te passen moesten de afmetingen worden schaalverkleind.

Om de haalbaarheid daarvan te onderzoeken is gewerkt met verschillende buisjes en verschillende korrels. De buisjes hadden allen een diameter van 1,2 cm een lengte van



Figuur 3.2. De toevoeropstelling voor room/stikstof mengsels naar de korrelbuis.



Figuur 3.3. De (toevoer)opstelling voor room/lachgas mengsels naar de korrelbuis.

3. Experimenteel werk

respectievelijk 10 cm, 5 cm, 3 cm en 1 cm. Door de verschillende buisjes met elkaar te verbinden kan worden gemeten met een buis met een lengte variërend van 1 tot 54 cm. De beschikbare korrels (glas) hebben een diameter van respectievelijk 1 mm, 1,8 mm, 2 mm, 2,8 mm en 3 mm. De korrelbuis is voorzien van gaas aan de uiteinden om de korrels in de buis te houden.

De toevoer van room en gas (onder druk) naar de korrelbuis gebeurt met twee verschillende opstellingen respectievelijk voor room/stikstof mengsels en room/lachgas mengsels. Deze worden beschreven in § 3.2.1. en § 3.2.2.

Daarnaast is er ook geëxperimenteerd met een keukenmixer en een glove box om testen te kunnen uitvoeren in lachgas omgeving.

§ 3.2.1. Toevoeropstelling voor room/stikstof mengsels

De toevoeropstelling voor room/stikstof mengsels is afgebeeld in figuur 3.2.

Met de gascylinder stikstof (1) kon hoge druk stikstof worden aangevoerd en de room in het voorraadvat (2) op druk worden gebracht. De toevoer van stikstof naar de korrelbuis werd geregeld met de gasmeter Brooks mass flow meter 5850TR series (3). De meter had een maximum debiet van 20 liter per minuut bij 1 bar en kamertemperatuur, en de gasstroom werd weergegeven in tienden procenten van dit maximum. De toevoer van de room werd ingesteld met 2 draaikranen (4), één voor de instelling en één als open/dicht kraan. De kogelkraan (6) is in een later stadium aangebracht, ter vervanging van de twee draaikranen. De stikstof en room komen samen in een mengkamer vlak voor de korrelbuis (5). Deze mengkamer doet niet veel meer dan het samenvoegen van de twee stromen. Het mengsel wordt vervolgens door de korrelbuis geperst.

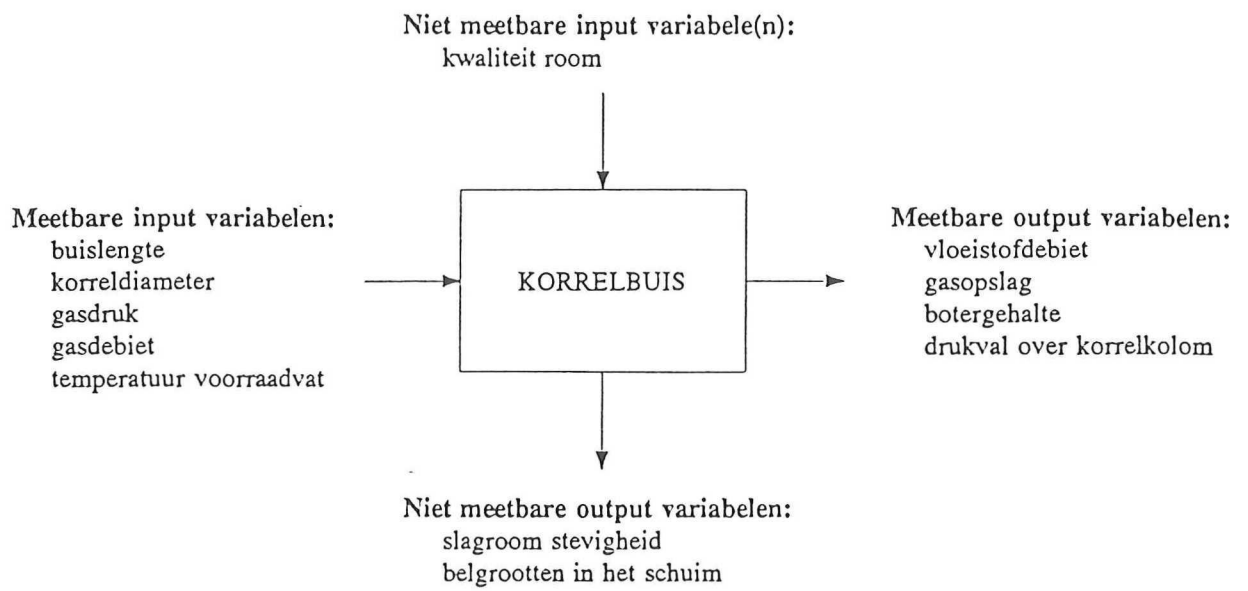
§ 3.2.2. Toevoeropstelling voor room/lachgas mengsels

De toevoeropstelling voor room/lachgas mengsels is afgebeeld in figuur 3.3.

Met de gascylinder lachgas (1) werd de room in het voorraadvat (2) onder druk gebracht en bovendien door de lachgas druk lachgas in room opgelost. Vanuit het voorraadvat stroomt room met opgelost lachgas naar de korrelbuis (3). De lachgas druk wordt geregeld met het reduceerventiel van de gascylinder. De vloeistofstroom kon worden geregeld met 3 kranen, 2 draaikranen (4) en 1 kogelkraan (5). De twee draaikranen worden in combinatie gebruikt, één voor de instelling en één als open/dicht kraan. In een later stadium van de experimenten is een drukmeter (6) aangebracht tussen de tweede kraan en de korrelbuis.

§ 3.3. Meetvariabelen

Bij de experimenten waren veel variabelen van belang, waarvan er maar een beperkt aantal gemeten kon worden.



Figuur 3.4. De variabelen van de experimenten.

3. Experimenteel werk

De variabelen (zie figuur 3.4) kunnen worden verdeeld in input en output variabelen, die onderverdeeld kunnen worden in meetbare en niet meetbare variabelen. Het verschil tussen input en output variabelen is dat deze niet respectievelijk wel beïnvloed worden door de experimenten. De meetbare input variabelen kunnen worden ingesteld op een gewenste waarde. De niet meetbare input variabelen zijn verstoringen en (dus) ook niet instelbaar. De output variabelen zijn afhankelijk van de experimentele omstandigheden, dus in feite van de input variabelen.

Omdat het doel van Coberco was om een nieuwe spuitkop te ontwikkelen, die de stevigheid van de uitgespoten room zou verhogen door botervorming, is er voor gekozen met name ook deze botervorming te meten.

De stevigheid is niet gemeten omdat twijfelachtig was of metingen betrouwbaar zouden zijn en omdat de stevigheid een afhankelijk is van de opslag en botervorming, die als onderliggende factoren bij metingen meer inzicht zouden geven.

Deze paragraaf beschrijft in § 3.3.1. de meetbare input variabelen, in § 3.3.2 enige niet meetbare input variabelen, in § 3.3.3 de meetbare output variabelen en in § 3.3.4 enige niet meetbare output variabelen. Waar nodig zal in deze paragrafen een scheiding worden aangebracht tussen variabelen die uitsluitend bij de room/stikstof respectievelijk room/lachgas experimenten van belang waren.

§ 3.3.1. Meetbare input variabelen

De meetbare input variabelen zijn de buislengte, de korreldiameter, de gasdruk, het gasdebiet (room/stikstof) en de temperatuur voorraadvat (room/stikstof).

De buislengte kon worden gevarieerd van 1 cm tot 54 cm, door het combineren van de verschillende buisjes van 1 cm, 3 cm, 5 cm en 10 cm.

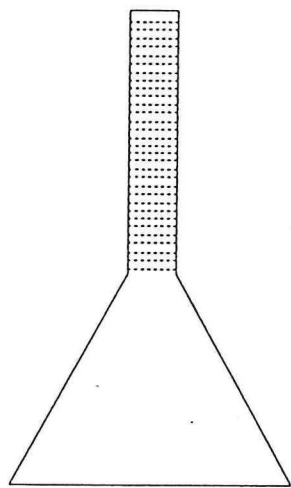
De diameters van de korrels, die voor de meeste metingen zijn gebruikt, zijn respectievelijk 1,0 mm, 1,8 mm en 2,8 mm. De diameterverdeling van elke korreltype is bepaald door van elk type 10 korrels op te meten met een schuifmaat. De afwijking van de gemiddelde diameter is minder 0,2 mm.

Voor de verkennende metingen zijn korrels van 2 en 3 mm gebruikt, maar voor deze korrels was een spreiding gegeven van 0,5 mm.

De gasdruk was uit veiligheidsoogpunt gelimiteerd tot 10 bar. Deze werd gemeten met meerdere drukmeters die in het systeem waren opgenomen.

Het gasdebiet (room/stikstof) kon worden ingesteld met een mass flow meter, variërend van 0,2 tot 20 liter per minuut bij 1 bar en kamer temperatuur.

De temperatuur van het voorraadvat (room/stikstof) werd constant gehouden door het vat in bak met ijswater te plaatsen.



Figuur 3.5. Maatcylinder voor de bepaling van het botergehalte.

3. Experimenteel werk

§ 3.3.2. Niet meetbare input variabele(n) (verstoringen)

De belangrijkste verstoring was de kwaliteit van de room. Room die bij de ene meetserie goed opklopbaar was, bleek bij een volgende meetserie, met zelfde omstandigheden veel minder opklopbaar. De kwaliteit van de room wordt beïnvloed door o.a. de koeltemperatuur bij het bewaren, de versheid van de room, de inhomogeniteit, en de wijze van vervoeren.

§ 3.3.3. Meetbare output variabelen

De meetbare output variabelen zijn het vloeibare roomdebiet, de gasopslag in het opgeklopte produkt, het botergehalte in opgeklopte produkt en de drukval over de korrelbuis (room/lachgas).

Het vloeistofdebiet (roomdebiet) dat door de korrelbuis werd geperst, is gemeten door weging van slagroom die tijdens een gemeten tijdsduur in bekeerglazen werd opgevangen. De tijdopname geschiedde met een stopwatch.

De gasopslag (opslag) in het opgeklopte produkt is het volume gas per volume vloeibare/vaste slagroom. Een opslag van 200 % betekent dat er in het opgeklopte produkt twee keer zoveel gasvolume zit, als dat er vloeibaar/vast roomvolume in zit. De opslag van het opgeklopte produkt werd gemeten door monsters te nemen met een bekend volume en deze te wegen met een weegschaal met een nauwkeurigheid van 0,01 gram. Gecombineerd met de dichtheid van vloeibare slagroom kon daaruit de opslag berekend worden.

Deze metingen werden uitgevoerd met gele PVC elektriciteitsbuisjes met een lengte van 2,5 cm en een diameter van 1,4 cm. Daarmee kon de opslag met acceptabele onnauwkeurigheid van minder dan 5 % worden bepaald.

Het botergehalte is bepaald met een door Coberco gegeven methode. De methode bestaat uit het oplossen van een gewogen hoeveelheid slagroom in water van 65 °C, waardoor het uitgeboterde vet zich uit de water/eiwit fase afscheidt en een gele toplaag vormt. De gemeten waarde is dan aantal ml vetfase / g slagroom.

Deze bepaling werd uitgevoerd met speciaal gemaakte maatcilinder (zie figuur 3.5) met een willekeurig volume waar de water/eiwit fase in zit en een dun buisje met milliliterverdeling waarmee het volume vetfase afgelezen kan worden. Door de maatcilinder een tijd te laten staan scheidde de vetfase zich af.

Als al het vet van een slagroom met 40 % vet uitbotert, dan wordt een botergehalte gemeten van 0,40 ml vetfase per gram slagroom. Overigens dient opgemerkt te worden dat room die in het geheel niet geklopt is volgens deze methode 0 ml vetfase per gram slagroom geeft.

De drukval over de korrelbuis is gemeten bij de room/lachgas experimenten.

§ 3.3.4. Niet meetbare output variabelen

De niet meetbare output variabelen zijn met name de slagroom stevigheid en de belgrootte

in het schuim.

Het meten van deze twee variabelen had geen prioriteit, of de meting ervan leek onbetrouwbaar.

Schuimstevigheid had gemeten kunnen worden door een gewicht de slagroom in te laten zakken. Het probleem was dat er een vetfilmje tussen de slagroom en het voorwerp zou ontstaan, waardoor in feite geen sprake meer was van stevigheidsbepaling.

Belgrootten hadden onder de microscoop bepaald kunnen worden, maar dat werd te omslachtig.

§ 3.4. Experimenten

Bij het voorbereiden van het experimentele werk werd uitgegaan van het plan om een aantal meetbare input variabelen te variëren en op grond daarvan het verband tussen diverse dimensieloze kentallen af te leiden die bepalend zijn voor het produceren van goede stijve slagroom. Al snel bleek dat dit niet reëel was door het ontbreken van voldoende kritische en objectieve criteria om vast te stellen of slagroom al dan niet goed stijf is.

Daarnaast bleek dat de kwaliteit van de room veel invloed had op de metingen. De kwaliteit van het opgeklopt produkt en de kwantitatieve resultaten bleken te veel beïnvloed te worden door oncontroleerbare verstoringen. Daardoor was het vaak niet mogelijk resultaten van verschillende meetseries met elkaar te vergelijken.

Een meetserie bestond uit een reeks van metingen achter elkaar, waarbij steeds één van de instelparameters veranderd werd. Omdat het wel mogelijk was om binnen één meetserie trends aan te geven, is besloten de resultaten daarvan te bekijken. Deze resultaten bleken vaak voldoende aanknopingspunten te geven voor het plannen van volgende meetseries.

De gebruikte room was niet-gehomogeniseerde, wel gepasteuriseerde Delicia slagroom met 12,5 % suiker (art. nr 0249).

De gebruikte gassen bij de experimenten waren stikstof en lachgas. Bij de room/stikstof experimenten was de druk 9 bar, tenzij anders vermeld.

Gezien het ontbreken van een duidelijk meetplan en de beperkte samenhang tussen een aantal experimenten, heeft dit hoofdstuk veel onderverdelingen. Na een toelichting op het oorspronkelijke meetplan (§ 3.4.1), volgt een beschrijving van de experimenten met room en stikstof (§ 3.4.2), experimenten met room en lachgas (§ 3.4.3), een onderzoek naar het inzakken van gespoten slagroom (§ 3.4.4) en een categorie diverse experimenten (§ 3.4.5). Gepoogd is per paragraaf een bepaald type experimenten te behandelen.

Een complete beschrijving van alle experimenten die zijn uitgevoerd is opgenomen in bijlage 2. Vaak wordt naar bepaalde meetseries uit die bijlage verwezen, die vaak ook voorzien zijn

3. Experimenteel werk

van figuren van de in de tekst vermelde resultaten. Bijvoorbeeld in het geval dat naar figuur B2.12.2. ϕ_{v1} wordt verwezen, dan geeft deze figuur de gegevens over het vloeistofdebiet van de tweede serie van meetserie 12, vermeld op pagina 17 van bijlage 2.

3.4.1. Oorspronkelijk meetplan

Deze paragraaf beschrijft kort het oorspronkelijke meetplan dat was opgesteld, maar dat niet uitgevoerd kon worden, omdat de benodigde criteria voor het bepalen van goede kwaliteit slagroom niet voldoende kritisch en niet objectief genoeg waren.

Het oorspronkelijke meetplan was opgesteld op grond van bevindingen van banketbakkers, die het nieuwste model slagroomklopmachine van Sanomat gebruikten. Deze stelden dat als het gasdebiet toeneemt, de kwaliteit van de geproduceerde room van vloeibaar, via goed geklopt, naar boter zou gaan. Alleen in een zeer nauw instelgebied van het gasdebiet zou er goed geklopte slagroom geproduceerd worden. wat bij mijn opstelling veel ruimer uitpakte dan verwacht.

Het meetplan bestond uit het variëren van de buislengte, korreldiameter en het vloeistofdebiet en dan het gasdebiet zodanig te corrigeren, dat er altijd goed stijve, uitgeboterde, slagroom gemaakt werd. Met deze meetgegevens had dan de uitbotering als functie van de verschillende factoren beschreven moeten worden en hadden de onderlinge verbanden (bijv. buislengte vs. korreldiameter) afgeleid moeten worden.

Bij de gebruikte meetopstelling bleek het instelgebied veel ruimer uit te pakken dan verwacht, waardoor dit meetplan niet uitgevoerd kon worden.

3.4.2. Experimenten met room en stikstof

De beschrijving van de experimenten met room en stikstof is onderverdeeld in

- de reproduceerbaarheid van de meetmethoden (3.4.2.1)
- de reproduceerbaarheid van de experimenten (3.4.2.2)
- de invloed van de gas/vloeistofdebiet verhouding (3.4.2.3)
- het ontstaan van een boterlaag op de korrels (3.4.2.4)
- de invloed van de korreldiameter (3.4.2.5)
- de invloed van de buislengte (3.4.2.6)
- de opslag (3.4.2.7).

3.4.2.1. Reproduceerbaarheid van de meetmethoden

De reproduceerbaarheid van de metingen van het gasdebiet, het vloeistofdebiet (vloeibare room), de opslag en het botergehalte is getest en de bevindingen worden in deze paragraaf beschreven.

3. Experimenteel werk

Gasdebiet

Door de elektronische werkplaats is bepaald dat de onnauwkeurigheid van de gasmeter minder 1 % is.

Vloeistofdebiet

Meting van het vloeistofdebiet heeft aanvankelijk grote problemen gegeven. Geprobeerd is om dit te meten met een magnetische bloed flow meter. Op verzoek van de leverancier heb ik deze meter, op hun risico, op 10 bar druk getest en de meter bleek niet tegen deze druk te kunnen.

Ook rotameters bleken niet geschikt, omdat die geen stabiele meetwaarde konden geven. Dit kwam doordat de stroom door de korrelbuis niet stationair was: de stroom kwam er zeer onregelmatig uit, mede veroorzaakt doordat gas en opgeklopte slagroom afwisselend uit de korrelbuis kwamen.

Uiteindelijk is gekozen voor meting van het gemiddelde vloeistofdebiet door de slagroomstroom in bekers op te vangen en te wegen, waarbij de meettijd werd gevarieerd van 15 tot 60 seconden.

De onnauwkeurigheid van de vloeistofdebiet metingen was circa 10 %, zoals waargenomen bij de tweede reeks metingen van meetserie 12. Bij die meetserie was de meettijd meestal slechts 15 seconden.

Opslag

Meting van de opslag is in eerste instantie geprobeerd met kokertjes van filmrolletjes. Dit gaf onvoldoende nauwkeurigheid, omdat met het vullen van de kokertjes het gas onderin het kokertje werd ingesloten door de ingebrachte slagroom en er dus niet meer uit kon.

Meting met stukjes PVC elektriciteitsbuis (diameter 1,4 cm, lengte 2,5 cm) gaf een acceptabele onnauwkeurigheid van minder dan 5 %, zoals bleek uit meetserie 7. Bij deze serie werd van 2 slagroomproducties met 6 buisjes de opslag bepaald: 3 PVC buisje en 3 met grotere buisjes (diameter 2,1 cm, lengte 4,5 cm).

Gebleken is dat de grotere buizen een circa 2 % lagere opslag gaven dan de PVC buisjes en dat de metingen met de 3 PVC buisjes onderling maximaal 3 % afweken.

Botergehalte

Het botergehalte is gemeten aan de hand van een door Coberco gegeven meetmethode. Deze methode bestond uit het oplossen van 20 gram slagroom in 180 ml water van 65 °C en dan na 10 minuten het botergehalte bepalen. Bij dit onderzoek is het principe van deze meting (zie meetvariabelen) overgenomen maar is niet vastgehouden aan de vaste hoeveelheden slagroom en oplossing en de vaste tijdsduur.

Op grond van de vele bepalingen van de botergehalte tijdens het onderzoek wordt de onnauwkeurigheid op 5 % geschat. Uit de metingen van twee series met identieke instelling

3. Experimenteel werk

van de meetbare variabelen (meetserie 9) bleken de gemeten botergehalte redelijk betrouwbaar. De iets lagere waarde van de van het botergehalte van de tweede serie (max. ca. 8 %) kan veroorzaakt zijn doordat bij de eerste serie het gewicht direct bepaald is en bij serie 2 aan de hand van de opslagmetingen en het volume van het meetmonster.

Nadeel van deze methode is dat de gemeten botergehaltes heel vaak òf maximaal òf nul waren. Het maximale botergehalte werd vrij gemakkelijk bereikt, zelfs als er maar een minimum aan afschuiving was geweest. Ondanks dit maximale botergehalte was de slagroom dan nog min of meer vloeibaar.

Waarschijnlijk verloopt de eerste stap tot botervorming vrij gemakkelijk en dat die gevormde klonters zich dan uit de waterfase in een vetfase kunnen afscheiden, maar dat de werkelijke botervorming die de stevigheid geeft veel uitgebreidere netwerken van geklonterde vetdeeltjes bevatten. Op grond van bijvoorbeeld meetseries 14 en 20 is het vermoeden gerezen dat deze beginnende botervorming en vergevorderde botervorming kunnen worden onderscheiden door het gemak waarmee de vetdeeltjes zich kunnen losmaken uit de waterfase en dat de snelheid waarmee de vetfase groeit een betere maat voor botervorming zou zijn.

Overigens heeft Coberco een veel uitgebreidere analyse voor de botervorming, waarbij het gehalte van de verschillende vetcomponenten in de opgeklopte room wordt bepaald. Die methode was te omslachtig voor dit onderzoek.

Drukval over de korrelbuis (room/lachgas)

De meting van de drukval over de korrelbuis gaf problemen. Deze drukval nam toe bij vergroting van het debiet, maar de veranderingen waren beperkt binnen één schaaldeel van de drukmeter. Met alle versturende drukfluctuaties, die optraden, was het niet mogelijk veranderingen van de drukval bij debietveranderingen goed vast te leggen.

3.4.2.2. Reproduceerbaarheid van de experimenten

De reproduceerbaarheid van de experimenten is beperkt. Bij twee series van meetserie 9 met volledig gelijke instelling van de meetbare input variabelen en ook van de kraaninstellingen in de roomtoevoer, traden grote verschillen op in de absolute waarden van het gemeten vloeistofdebiet en de opslag.

De opgeklopte slagroom van de eerste serie was goed stijf, maar de slagroom van de tweede serie veel minder stijf en bij lage gas/vloeistofdebiet verhoudingen zelfs redelijk vloeibaar.

Het vloeistofdebiet van de eerste serie is lager dan van de tweede serie. Dit is logisch omdat de drukval over de toevoerkraan van de vloeistof kleiner is. Dit komt doordat de stijvere slagroom een grotere drukval geeft over de korrelbuis, terwijl de druk op het voorraadvat gelijk gehouden wordt.

Ook blijkt het vloeistofdebiet te dalen bij hogere gasdebieten. Dit komt doordat een hoger gasdebiet ook een grotere drukval over de korrelbuis tot gevolg heeft.

3. Experimenteel werk

De opslag van de slagroom van de tweede serie is hoger dan de opslag van de eerste meting, wat consistent is met de bevindingen in andere meetseries, waar de opslag daalde naarmate de slagroom verder uitboterde.

De botervorming bij de twee series geeft vergelijkbare waarden. De iets lagere waarden bij de tweede serie kunnen worden verklaard door een meetafwijking, zoals beschreven bij de reproduceerbaarheid van de meetmethode, zie § 3.4.2.1. Bij de tweede serie is het botergehalte bij een gasdebiet van 10 ml/s onvoldoende nauwkeurig te bepalen voor opname in de figuur B2.9.boter. Uit de experimenten blijkt dat ook bij dat lage gasdebiet de botervorming rond de 0,4 ml vetfase per gram slagroom lag.

3.4.2.3. Invloed gas/vloeistofdebiet verhouding

De slagroom blijft bij oplopende gas/vloeistofdebiet verhouding vloeibaar tot een kritisch waarde is overschreden, waarna er stijve slagroom uit komt, zoals blijkt uit meetserie 14. Bij meetseries 9 en 14 blijkt deze minimum gas/vloeistofdebiet verhouding 4 te zijn.

Deze waarde is onder andere afhankelijk van de buislengte. Bij meetserie 10 was de buislengte te kort (3,7 cm) waardoor er bij gas/vloeistofdebiet verhoudingen van 25 nog geen stijve slagroom werd geproduceerd.

De slagroom krijgt minder opslag naarmate de gas/vloeistofdebiet verhouding te hoog wordt, zoals blijkt uit meetseries 9 en 11. Bij meetserie 11 blijkt uit figuur B2.11.opslag dat bij een gasdebiet van 8,3 ml/s de beker met slagroom omgekeerd kon worden, zonder dat de slagroom ging vloeien. Bij stijging naar gasdebiet 9,3 ml/s nam de opslag nog licht toe, maar bij verdere stijging van het gasdebiet daalde de opslag. Dit ging samen met te ver gevorderde botervorming. Vergelijkbare resultaten zijn verkregen bij meetserie 9, waar de opslag ook daalde naarmate de botervorming te ver ging door te grote gas/vloeistofdebiet verhouding.

Deze resultaten geven ook aan dat maar een zeer beperkt deel van het gasdebiet in de slagroom terecht komt. Bij het minimaal benodigde gasdebiet om stijve slagroom te produceren, kwam maar 20 % van het gas in de slagroom terecht (meetserie 9, eerste serie), en bij hogere gasdebieten werd dat nog veel slechter. Het bleek dat door het toevoeren van extra gas de gasopslag in de slagroom zelfs daalde.

Te grote overmaat aan gas ging er als "slugs" doorheen, waardoor de slagroomstroom ging sputteren.

3.4.2.4. Ontstaan van boterlaag op de korrels

Bij meetserie 14 is het gasdebiet gevarieerd bij een vaste instelling van de vloeistofkraan. Het gasdebiet is gevarieerd van 0 tot een waarde waarbij de slagroom stijf werd. Dit gebeurde pas nadat het gasdebiet voldoende groot was gemaakt. Bij te lage waarden was de uitstromende slagroom vloeibaar. Daarna is het gasdebiet weer tot een veel lagere waarde teruggebracht, waardoor de uitstromende slagroom wederom vloeibaar werd.

Het vloeistofdebiet was voor het doorpersen van stijve slagroom groter dan er na.

3. Experimenteel werk

Het botergehalte in de vloeibare slagroom was nul respectievelijk maximaal bij eenzelfde gasdebiet, al naar gelang de slagroom door de korrelbuis stroomde voor respectievelijk na het doorpersen van stijve slagroom.

Verondersteld wordt dat door het doorpersen van de stijve slagroom een vetlaag afzet op de korrels waardoor de kanaaltjes tussen de korrels veel kleiner worden, waardoor de afschuiving voldoende groot wordt om botervorming te veroorzaken.

Uit diverse meetseries (9,11,12 en 13) blijkt dat het instellen van de boterlaag enige tijd nodig heeft.

Meest illustratief zijn de duplo metingen van meetserie 13. Bij een vast ingesteld gasdebiet blijkt het vloeistofdebiet de eerste circa 60 seconden te dalen, waarna dit vloeistofdebiet zich stabiliseert. De daling van het vloeistofdebiet wordt toegeschreven aan de toegenomen weerstand over de korrelbuis, veroorzaakt door de ontstane boterlaag.

Bij meetserie 9 en 11 blijkt dat, bij een gasdebiet van 10 ml/s, het vloeistofdebiet in de tijd ook daalt, net als bij meetserie 12 (tweede serie), waar het debiet terugloopt, ondanks dat de slagroom nog niet al te stevig is. Bij meetserie 12 (eerste serie) blijkt dat het vloeistofdebiet zich na verloop van tijd instelt op een stationaire waarde.

3.4.2.5. Invloed korreldiameter

Het is diverse malen gebeurd dat de korrelbuis verstopte doordat de (1 mm) korrels te klein waren en de buislengte te lang. Bij het ontstaan van de boterlaag op de korrels, zullen de nauwe kanaaltjes nog smaller worden, waardoor mogelijk de botervorming verder wordt bevorderd en de slagroom een steeds groter wordende stromingsweerstand ondervindt. Afhankelijk van de buislengte en drukval (lees drukval per lengte) kan de slagroom er dan nog door heen geperst worden of verstopt de korrelbuis.

Een voorbeeld van de omstandigheden waarbij de korrelbuis dichtslipte, kan worden gegeven aan de hand van meetserie 12 (derde serie). Deze serie is uitgevoerd met een 5,4 cm lange buis, gevuld met 1 mm korrels, die dichtslipte bij een gas/vloeistofdebiet verhouding van 17. Opmerkt moet worden dat bij lagere gas/vloeistofdebiet verhoudingen de buis niet verstopte.

Als de korrels te groot zijn, dan is er een langere korrelbuis nodig of een hogere gas/vloeistofdebiet verhouding nodig om boterafzetting op de korrels te krijgen en zo de kanaaltjes smal genoeg te krijgen.

De langere korrelbuis en de hogere gas/vloeistof verhouding, die nodig zijn bij grotere korrels, zijn gebleken uit de verkennende metingen, waarbij het gasdebiet niet getalsmatig gemeten kon worden.

Bij meetserie 2, met korrels van 3 mm en een buis van 10 cm, bleef de slagroom onder alle omstandigheden vloeibaar. Als de korrelbuis tot 25 cm werd verlengd, kon er bij hoge gas/vloeistofdebiet verhouding wel stijve (sputterende) slagroom geproduceerd worden.

Bij meetserie 3, de volgende dag, was er met korrels van 3 mm en een buislengte van 10 cm wel vastere slagroom (maar niet stijf) te produceren, bij 20 cm stijve slagroom met sputteren (hoge gas/vloeistofdebiet verhouding) en bij 30 cm boterachtige slagroom zonder sputteren. Bij 40 cm kon bij lage gas/vloeistofdebiet verhouding vloeibare slagroom worden verkregen

3. Experimenteel werk

en bij een hoge gas/vloeistofdebiet verhouding sputterende boter worden verkregen. Bij meetserie 2, met korrels van 2 mm en een buis van 10 cm, werd wel stijve slagroom verkregen, maar enkel bij een hoge gas/vloeistofdebiet verhouding waardoor de stroom ging sputteren. Bij 2 mm korrels en 40 cm buislengte trad verstopping op.

3.4.2.6. Invloed buislengte

De proeven om de invloed van de buislengte te onderzoeken, zijn reeds beschreven bij de invloed van de korreldiameter, zie § 3.4.2.5.

Bij de eerste experimenten bleek dat het een juiste inschatting was geweest om de korrelbuis op te bouwen uit korte buisjes, die aan elkaar gekoppeld konden worden. Op basis van de gegevens van Sanomat was er van uitgegaan dat met er maximaal 50 cm korrelbuis nodig zou zijn. Tijdens de experimenten bleek dat het heel wel mogelijk was deze lengte terug te brengen door kleinere korrels te gebruiken.

Als de korrelbuis te kort is, kan er geen stijve slagroom geproduceerd worden. Met 1 mm korrels was 3,4 cm de kortste buislengte waarmee stijve slagroom is geproduceerd. Met een buisje van 2,1 cm en korrels van 1 mm was de slagroom niet echt stijf maar ook niet vloeibaar.

Naarmate de buislengte langer wordt zal de slagroom verder uitboteren, te ver uitboteren of de buis zelfs verstoppēn.

Het verstoppēn bij langere buislengte wordt vermoedelijk bepaald door het teruglopen van de drukval per lengte korrelbuis, waardoor de slagroom niet meer door de korrelbuis geperst kan worden.

De minimum benodigde buislengte neemt af naarmate de korrels kleiner worden of de gas/vloeistofdebiet verhouding groter wordt. Dit is al eerder beschreven in de paragrafen over de invloed van deze variabelen.

3.4.2.7. Opslag

De vele metingen met room en stikstof toevoer voor de korrelbuis produceerden geklopte slagroom met een gemiddelde opslag van circa 60 % en maxima en minima van 90 % en 40 %.

3.4.3. Experimenten met room en lachgas

Dit deel, dat de experimenten beschrijft van het kloppen van room met lachgas in de korrelbuis, is onderverdeeld in:

- een vergelijking met de room/stikstof experimenten (3.4.3.1)
- de invloed van de drukval over de kraan voor de korrelbuis (3.4.3.2)
- de invloed van het vooraf schudden van de room (3.4.3.3)

3. Experimenteel werk

- de invloed van de lachgas druk (3.4.3.4)
- de minimaal benodigde drukval over korrelbuis (3.4.3.5)
- de invloed van kraan en buisdiameter op het slagroomdebiet (3.4.3.6)
- de invloed van korreldiameter en de buislengte (3.4.3.7)
- het onvolledig leegspuiten van de spuitbus (3.4.3.8)
- experimenten om laminaire stroming aan te tonen (3.4.3.9)
- het kloppen van spuitroom uit spuitbussen in de korrelbuis (3.4.3.10)

3.4.3.1. Verschillen tussen room/stikstof en room/lachgas experimenten

Bij het gebruik van lachgas i.p.v. stikstof is een kortere buislengte nodig om stijve slagroom te produceren. Was voor het produceren van stijve slagroom met stikstof de minimaal benodigde buislengte minstens 3,4 cm (korrelgrootte 1 mm; slechts één keer gelukt), bij gebruik van lachgas bleek dat het geen probleem was om met dezelfde 1 mm korrels met een 1 cm lang buisje stijve slagroom te produceren (meetserie 20).

De uitbotering kwam erg gemakkelijk tot stand. Als de slagroom werd uitgespoten door de twee kranen zonder door de korrelbuis te gaan (meetserie 18), bleek uit de analyse voor de uitbotering dat de maximale uitbotering bereikt was. Desondanks was de slagroom nog helemaal niet stijf. Nadere toelichting op deze situatie, maximale uitbotering en slappe slagroom is gegeven in § 3.4.2.1.

De opslag die behaald kan worden is veel hoger dan bij gebruik van stikstof. De maximaal behaalde opslag is 240 %, bij een gemiddelde van 170 %. Invloed van verschillende factoren op de opslag wordt toegelicht in de volgende paragrafen.

3.4.3.2. Invloed van de drukval over de kraan voor de korrelbuis

De invloed van de kraan voor de korrelbuis is getest (meetserie 29) door room door de korrelbuis uit te spuiten met en zonder kraan ervoor.

Zonder de twee draaikranen uit figuur 3.3 was de slagroom veel minder (maar wel) stijf dan met deze kranen en ging er een veel groter debiet door de korrelbuis dan met kraan, ook al was de kraan volledig open. Bij de meting zonder draaikranen trad een drukdaling op van 0,2 bar bij de drukmeter voor de korrelbuis door de stromingsweerstand in de aanvoerleiding.

Een poging om de opslag te relateren aan drukval over de kraan is niet gelukt. De maximale variatie van de drukval (1,5 bar) was te klein, gezien de drukschommelingen die optraden bij de dynamische metingen. Wel bleek dat bij grotere drukval over de kraan (expansie) de slagroom meer uitbotert en dat de opslag daardoor daalt.

3.4.3.3. Invloed van het vooraf schudden van de room

Schudden bevordert zeer duidelijk de uitbotering, wat met het oog geconstateerd is. De beter uitgeboterde room is steviger, het uiterlijk is grover en het geëxpandeerde gas wordt niet geheel vastgehouden.

3. Experimenteel werk

Dit is ook gekwantificeerd door meting van de opslag, na het uitspuiten met en zonder schudden vooraf (meetserie 23). Bij het uitspuiten zonder schudden werd een opslag van 220 tot 240 % behaald, met schudden werd opslag van 140 tot 160 % behaald.

Het directe effect van schudden is het creëren van kiemen, vergelijkbaar met het schudden van een spuitwater fles. Als de kraan van spuitkop geopend wordt, treedt er een geringe drukverlaging op, waardoor de kiemen bellen vormen en het twee fase mengsel gecreëerd wordt, nodig voor de uitbotering.

3.4.3.4. Invloed van de lachgas druk

Naarmate de lachgas druk groter is, blijkt de opslag te dalen (meetserie 19). Deze daling van de opslag is vermoedelijk veroorzaakt doordat de grotere hoeveelheid geëxpandeerd gas de slagroom verder (te ver) uitbotert.

Het effect van de verschillende lachgas drukken op de opslag is niet van betekenis in vergelijking met het effect van schudden.

3.4.3.5. Minimaal benodigde drukval over korrelbuis

Een minimale drukval over de korrelbuis is nodig om slagroom uit te spuiten. Bij meetserie 29 werd eerst slagroom door de korrelbuis gespoten, waardoor zich een boterlaag op de korrels afzette. Daardoor was, bij gesloten draaikranen (zie figuur 3.3), de druk voor de korrelbuis circa 1,5 bar, doordat het gas zich niet door de korrelbuis naar buiten kon persen. Na het openen van de kranen, kwam geen of nauwelijks slagroom uit de spuitkop totdat de kraan zover open stond dat de druk voor de korrelbuis tot ca. 4,2 bar was gestegen. Daarna gaf vergroten van de kraanopening met kleine verhoging van de drukval na de kraan (kleinere drukval over kraan) aanzienlijke toename van het debiet. De gemeten druk bij volledig geopende kraan was 5,7 bar, wat betekent dat de minimale drukval over de kraan 0,3 bar is.

Dit experiment geeft aan dat geschuimde slagroom yield stress heeft.

Daarnaast is een gebruikte 3 cm (1 mm korrels) korrelbuis na een half uur niet gebruiken zodanig verstopt dat die met warm water (doorgespoeld) ontstopt moest worden, wat niet nodig was als een 1 cm (1 mm korrels) een half uur bleef liggen.

3.4.3.6. Invloed kraan en buisdiameter op het vloeistofdebiet

Het vloeistofdebiet moet worden geregeld met de voorafgaande kraan en de buisdiameter, maar niet met de buislengte of korreldiameter. Achtergrond van deze stelling is dat buislengte en korreldiameter gebruikt moeten worden om de juiste mate van botervorming in te stellen en dat deze variabelen de drukval per buislengte bepalen.

Uit meetserie 29 blijkt ook dat het vloeistofdebiet geregeld kan worden met de kraan. Het uitstromen van slagroom door de korrelbuis gaat veel gecontroleerder dan bij de conventionele spuitbus.

3. Experimenteel werk

Uit deze experimenten blijkt verder dat de buisdiameter vooral het maximale vloeistofdebiet bepaald. Als de drukval over de korrelbuis net voldoende is zal theoretisch een eerste kanaaltje tussen de korrels doorstroomd worden met slagroom. Bij het laten toenemen van de drukval zullen steeds meer kanaaltjes doorstroomd worden, totdat alle kanaaltjes worden doorstroomd (maximaal debiet). Het maximaal aantal kanaaltjes (maximaal debiet) wordt bepaald door de doorsnede van de korrelbuis en dus door de buisdiameter.

3.4.3.7. Invloed korreldiameter en buislengte

De invloed van de korreldiameter en de buislengte waren vergelijkbaar met de invloed hiervan bij de experimenten met room en stikstof. Zowel een langere buis als een kleinere korreldiameter bevorderen de uitbotering.

3.4.3.8. Onvolledig leegspuiten spuitbus

Er ontstaan problemen bij een te lage lachgas druk in de spuitbus.

Zit er nog geen boterlaag op de korrels (meetserie 19), dan zal bij een te lage gasdruk uitsluitend vloeibare room uit de korrelbuis stromen. Vermoedelijk zal er te weinig gas expanderen aan het begin van de korrelbuis, waardoor het uitboteringsproces niet of te laat in gang gezet wordt.

Zit er wel een boterlaag op de korrels, dan is er een minimale drukval per meter nodig om de yield stress te overwinnen (meetserie 29).

3.4.3.9. Experimenten om laminaire stroming aan te tonen

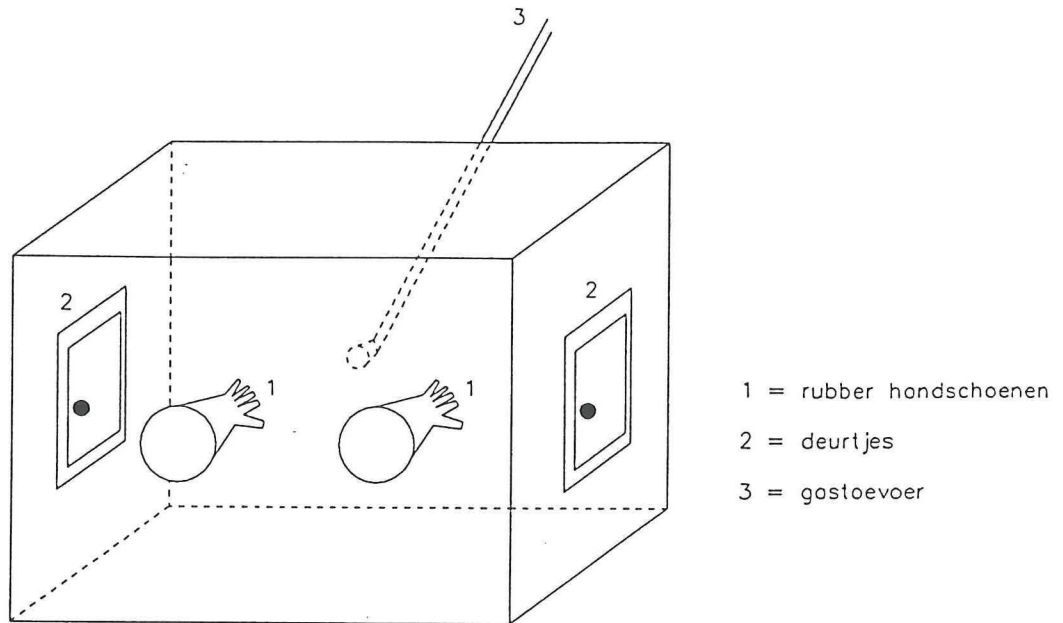
Het is niet gelukt om, door het invullen van experimentele gegevens in de vergelijking van Ergun, vast te stellen of de stroming laminaire of turbulent is (meetserie 21).

3.4.3.10. Kloppen van spuitroom uit spuitbussen in een korrelbuis

De spuitroom van diverse merken spuitbussen is in de korrelbuis met lachgas geklopt. Alle geteste merken gaven slappe slagroom. Alleen bij de Almhof spuitbus van Uniekaas trad uitbotering op.

De gebruikte spuitbussen zijn Erlenhof Fix & Fertig en Babette van Malebic (Coberco), Almhof van Uniekaas (meetserie 25) en de Belgische spuitbussen Butterfly en Gervais. (meetserie 27)

Behalve de Almhof spuitbus gaven alle spuitbussen geen of zeer minimale uitbotering en de geproduceerde slagroom was bijzonder vloeibaar. De Almhof slagroom gaf een uitbotering van 0,28 ml vetfase per gram slagroom, terwijl er 35 % vet in zit en bij het gewoon uitspuiten de uitbotering niet verder komt dan 0,15 ml/g. Gepoogd is om met Almhof slagroom stijve slagroom te produceren door de slagroom door een korrelbuis van 10 cm te persen in plaats van de buis van 5 cm. Met 1 mm korrels is dat niet gelukt.



Figuur 3.6. Glove box. Een kast van perspex, voorzien van handschoenen, waarin experimenten in een gecontroleerde gasatmosfeer uitgevoerd kunnen worden.

3.4.4. Inzakken van spuitbuslagroom

Uit diverse experimenten is gebleken dat spuitbuslagroom inzakkt door het verdwijnen van lachgas uit de slagroom. Dit deel, dat het onderzoek naar het inzakken beschrijft, is onderverdeeld in:

- room kloppen in glove box (3.4.4.1)
- daling van de opslag na het uitspuiten (3.4.4.2)
- tegengaan van de daling van de opslag (3.4.4.3).

3.4.4.1. Room kloppen in glove box

De glove box (zie figuur 3.6) was een opstelling, waarmee de slagroomstabiliteit in een lachgas omgeving gemeten kon worden. Daartoe werd de glove box gevuld met lachgas.

Met deze experimenten is aangetoond dat de diffusie van lachgas uit de slagroom de kwaliteit direct na het uitspuiten aantast en dat de diffusie dan belangrijker is dan de ontbrekende uitbotering van spuitbuslagroom.

De experimenten bestonden uit het vier keer bereiden van slagroom in een lachgas omgeving:

1. bereiden met mixer, bewaren in een lachgas omgeving
2. bereiden met mixer, bewaren in buitenlucht
3. bereiden met spuitbus, bewaren in een lachgas omgeving
4. bereiden met spuitbus, bewaren in buitenlucht

Bij experimenten 1 en 2 was de slagroom, die in de lachgas omgeving bleef (1) lange tijd goed (> 45 min), terwijl bij de slagroom in de buitenlucht werd bewaard (2) na 4 minuten de eerste bellen al openbraken aan het oppervlak, dat bovendien glanzend werd.

Bij experimenten 3 en 4 was de slagroom die in de lachgas omgeving bleef (3) na 5 minuten nog goed, terwijl de slagroom in de buitenlucht (4) al na één minuut glanzend werd en de scherpe randen van de spuitvorm afvlakten.

3.4.4.2. Daling van de opslag na het uitspuiten

Daling van de opslag na het uitspuiten van slagroom met lachgas bellen is vastgesteld met zowel bij slagroom uit de conventionele spuitbus als bij (gewone) slagroom die met de korrelbuis geklopt is. (meetseries 17, 19, 20 en 23)

Vijf minuten na het uitspuiten blijkt meer dan de helft van het gas uit de slagroom verdwenen te zijn. Bij de Almhof spuitbus (Uniekaas) gaat de opslag, die direct na het uitspuiten 270 % is, naar 120 % na 5 minuten (meetserie 17). Bij de experimenten met de eigen korrelbuis liep de opslag terug van 170 % naar 100 %. De opslag blijkt zich na verloop van tijd (circa 10 minuten) te stabiliseren op een waarde onder de 100 %.

3.4.4.3. Tegengaan van de daling van de opslag

De daling van de opslag blijkt minder te zijn als de buitenoppervlak/volume verhouding kleiner is. Dit is vastgesteld bij meetserie 19 (eerste serie 5 bar), 22, 23 en bij gemixte slagroom in lachgas omgeving (meetserie 16).

Als de slagroom op één grote hoop wordt uitgespoten dan verloopt de daling van de opslag veel langzamer. Vaak treedt het uitspuiten op één grote hoop op als de slagroom vloeibaarder en minder stijf is.

Uit de experimenten is gebleken dat met name de kleine oppervlakte per volume verhouding het inzakken tegengaat en dat het verminderde inzakken niet een gevolg is van de vloeibaardere slagroom. Bij meer vloeibare slagroom met veel oppervlak per volume trad namelijk wel een forse daling van de opslag op, zoals bleek bij het uitspuiten uit een gewone spuitbus en bij meetserie 23 met een korrelbuis van 5 cm en korrels van 1,8 mm.

3.4.5. Overige experimenten

De overige experimenten zijn

- testen met de conventionele spuitbussen (3.4.5.1)
- opslag en botergehalte in slagroom geklopt met mixer (3.4.5.2)
- room kloppen met puddingpoeder (3.4.5.3)
- bezoek aan een banketbakker (3.4.5.4)

3.4.5.1. Testen met conventionele spuitbus

Testen met conventionele spuitbussen hebben de volgende resultaten opgeleverd:

- De opslag direct na het uitspuiten van de room was bij de Malebic spuitbus 457 % en bij de Almhof Uniekaas spuitbus 270 %.
- De smaak van de Almhof slagroom was veel romiger en lekkerder dan o.a. de Erlenhof (Malebic) slagroom.

3.4.5.2. Opslag en botergehalte in slagroom geklopt met mixer

Naast de proeven met de korrelbuis is er ook slagroom geklopt met een mixer in zowel lucht omgeving als lachgas omgeving. Het experiment van het kloppen van slagroom in lachgas omgeving is uitgevoerd in een glove box. Slagroom geklopt met een mixer geeft een uitbotering van 0,41 ml vetfase per gram slagroom. De opslag van de geklopte slagroom was in lucht omgeving 94 % en in lachgas omgeving 72 %.

3.4.5.3. Room kloppen met puddingpoeder

Room kloppen met een mixer na toevoeging van puddingpoeder is onderzocht om het effect van de viscositeit te onderzoeken (meetserie 24).

3. Experimenteel werk

Driemaal is 190 ml slagroom geklopt in eenzelfde bekerglas met de mixer in eenzelfde mixerstand.

De eerste keer is slagroom geslagen zonder toevoeging van bindmiddel en duurde het 450 seconden totdat de slagroom inzakte als gevolg van te veel botervorming.

De tweede keer is ca. 10 gram bindmiddel toegevoegd en volgens de aanwijzing op het pak bindmiddel is de room met bindmiddel 10 minuten in de ijskast gezet om visceuze vloeistof te maken. Het kostte vervolgens 270 seconden voordat de slagroom inzakte door te veel botervorming.

De derde keer is veel meer bindmiddel (circa 40 g) toegevoegd, in de ijskast gekoeld en vervolgens duurde het 160 seconden voordat de slagroom inzakte.

De bepaling van het botergehalte gaf aan dat er botervorming had plaatsgevonden. Duidelijke fasenscheiding trad niet op omdat het bindmiddel zich concentreerde tussen vet en waterfase in.

3.4.5.4. Bezoek aan banketbakker Roodenrijs

De uitnodiging van bakker Roodenrijs om op zaterdagmorgen vanaf 5 uur in z'n banketbakkerij mee te draaien was een nuttig bezoek en heeft het nodige opgeleverd.

Volgens bakker Roodenrijs schijnt supermarkt Konmar een goede methode toe te passen om met een "mixer" zeer luchtige slagroom te produceren. Ze laten de room eerst geruime tijd doorstromen met lucht, die van onder via een soort zeefplaat wordt toegevoerd. Daardoor komt er zeer veel lucht in de room, waarna met een roerder de slagroom stijf geklopt wordt.

Bakker Roodenrijs gebruikt ook een apparaat met een luchttoevoer via een zeefplaat onderin en was er meer tevreden over dan de Sanomat machines, die werken volgens meer moderne versies van het korrelbuis principe. Voordeel van zijn machine t.o.v. de Sanomat is dat de slagroom luchtiger is en dat daardoor z'n room gebruik lager is.

Ondanks dat er voldoende lucht in de room gedispergeerd werd, duurde het toch enige tijd voor de slagroom stijf werd.

4. Resultaten van het experimentele werk

De experimenten bestonden voor het grootste deel uit het spuiten van niet-gehomogeniseerde room door deze onder hoge druk (circa 9 bar) te stuwen door een korrelbuis (buislengte minimaal 1 cm, korreldiameter minimaal 1 mm).

Er is voornamelijk onderzoek gedaan naar het kloppen van room met de korrelbuis met stikstof respectievelijk lachgas en naar het inzakken van met lachgas gespoten room.

4.1. Kloppen van room in korrelbuis met stikstof

De resultaten van dit deel van het onderzoek worden beschreven in dezelfde categorieën als waarin de experimenten zijn gegroepeerd in de experimentenbeschrijving in § 3.4. Aansluitend zullen verbanden worden gelegd tussen de verschillende resultaten.

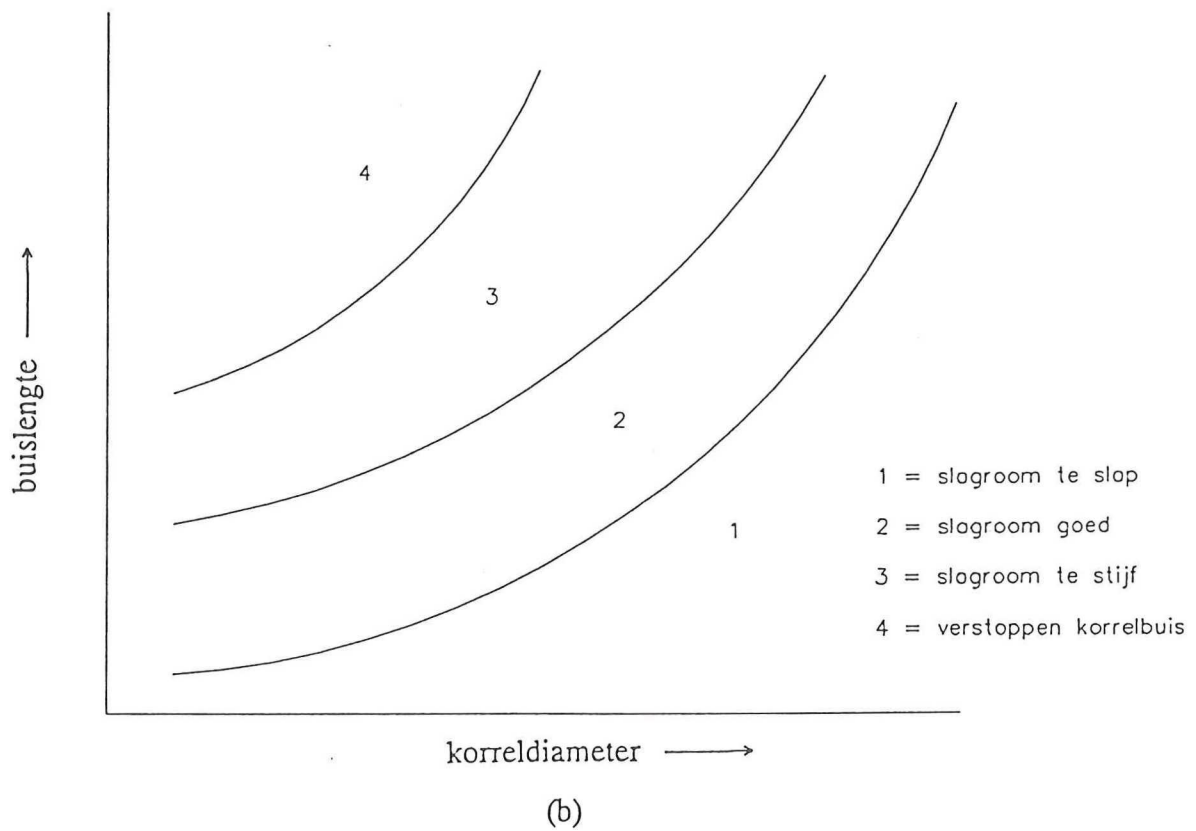
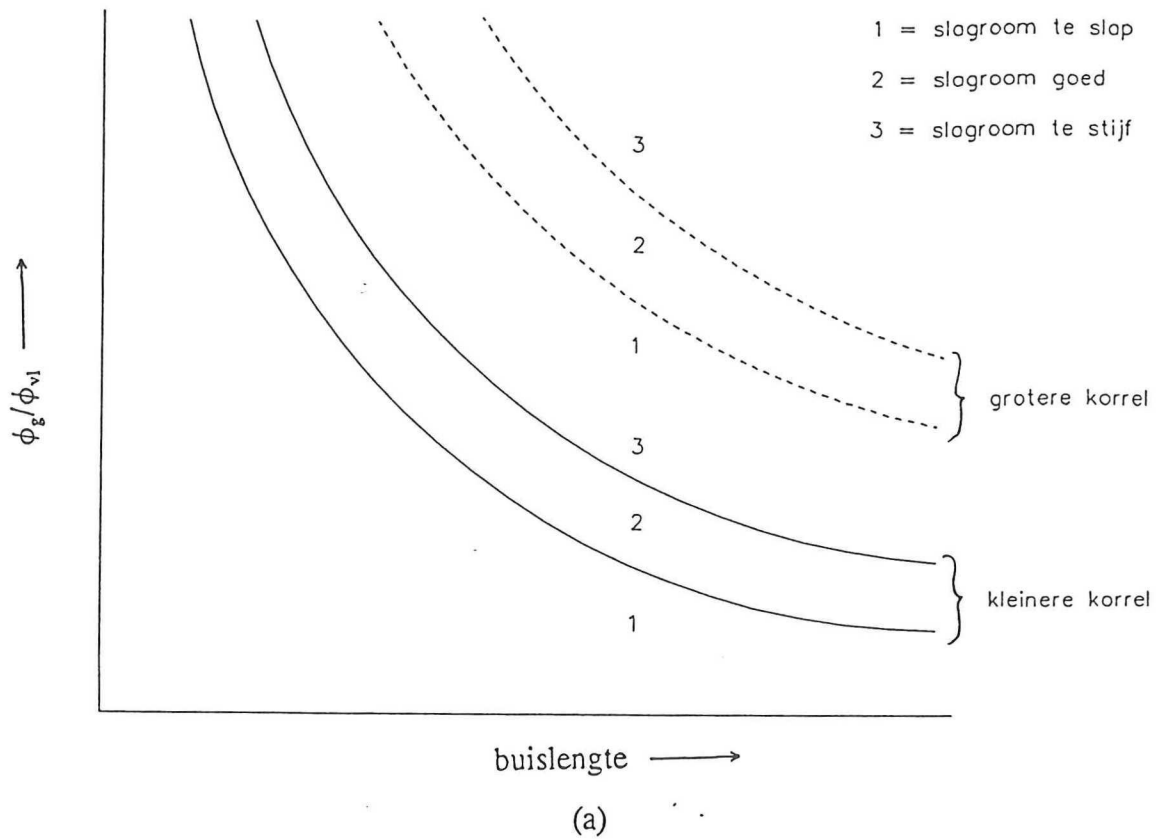
Reproduceerbaarheid van de meetmethoden. Van de meting van het gas- en vloeistofdebiet, de opslag en het botergehalte van de slagroom is goede reproduceerbaarheid vastgesteld. De meting van de drukval over de korrelbuis (room/lachgas) gaf problemen, omdat drukveranderingen moesten worden gemeten binnen één schaaldeel van de drukmeter.

Reproduceerbaarheid van de experimenten. Verstoringen in de samenstelling en eigenschappen van ongeklopte room hebben grote invloed op de kwaliteit van de slagroom. Achtereenvolgende meetseries, met identieke instellingen, geven grote verschillen in de absolute waarden van het gemeten vloeistofdebiet en de opslag. Deze verschillen zijn groter dan de verschillen als gevolg van veranderingen van de instelparameters. Het vloeistofdebiet en de opslag van verschillende meetseries kunnen dus niet met elkaar vergeleken worden. Wel kan binnen eenzelfde meetserie de invloed van veranderingen bekeken worden.

Invloed van de gas/vloeistofdebiet verhouding. Er zijn minimum en maximum grenzen aan de optimale gas/vloeistofdebiet verhouding. Er is een minimum verhouding gas/vloeistofdebiet nodig om stijve slagroom te produceren, die onacceptabel hoog ligt (circa 4). Naarmate de gas/vloeistofdebiet verhouding verder stijgt zal de uitbotering te ver gaan en de opslag afnemen. In dat geval wordt het maximum van de optimale gas/vloeistofdebiet verhouding overschreden.

Ontstaan van boterlaag op de korrels. Bij het stijf worden van de slagroom ontstaat er een boterlaag op korrels in de korrelbuis. Daardoor worden de kanaaltjes tussen de korrels zodanig nauwer, dat in de doorstromende room uitbotering optreedt. Voor het ontstaan van deze boterlaag is een aanlooptijd nodig.

Invloed van de korreldiameter. Er zijn minimum en maximum grenzen aan de optimale korreldiameter. Is de korrel te klein, dan kan er verstopping van de korrelbuis optreden. Is de korrel te groot, dan zijn de kanaaltjes tussen de korrels te groot en moeten extra inspanningen worden gedaan om de slagroom voldoende stijf te krijgen, zijnde toename van de minimaal benodigde buislengte en een hogere gas/vloeistofdebiet verhouding. Deze extra inspanningen zijn dan nodig om de boterlaag zich op de korrels te laten afzetten zodat de



Figuur 4.1. (a en b) Schematische schets van de verbanden tussen de optimale minimum en maximum waarden van buislengte, korreldiameter en gas/vloeistof-debiet verhouding.

4. Resultaten van het experimentele werk

doorstroomkanaaltjes nauw genoeg worden.

Invloed van de buislengte. Er zijn minimum en maximum grenzen aan de optimale buislengte. Er is een minimum buislengte nodig om stijve slagroom te produceren. Naarmate de buislengte langer wordt, zal de slagroom verder uitboteren, te ver uitboteren en vervolgens de buis verstoppen. Dit verstoppen wordt veroorzaakt door een te lage drukval per lengte korrelbuis. De minimum benodigde buislengte neemt af naarmate de korrels kleiner worden of de gas/vloeistofdebiet verhouding groter wordt.

Verbanden tussen verschillende resultaten. De uitgespoten slagroom wordt stijver naarmate de korrels kleiner worden en de buislengte en gas/vloeistofdebiet verhouding groter worden. Het verband tussen de optimale minimum en maximum waarden van deze variabelen is geschetst in figuur 4.1.

4.2. Kloppen van room in korrelbuis met lachgas

De resultaten van dit deel van het onderzoek worden beschreven in dezelfde categorieën als waarin de experimenten zijn gegroepeerd in de experimentenbeschrijving in § 3.4. Een aantal van de categorieën uit de experimentenbeschrijving zijn in deze paragraaf samengevoegd tot één categorie.

Verschillen tussen room/stikstof en room/lachgas experimenten.

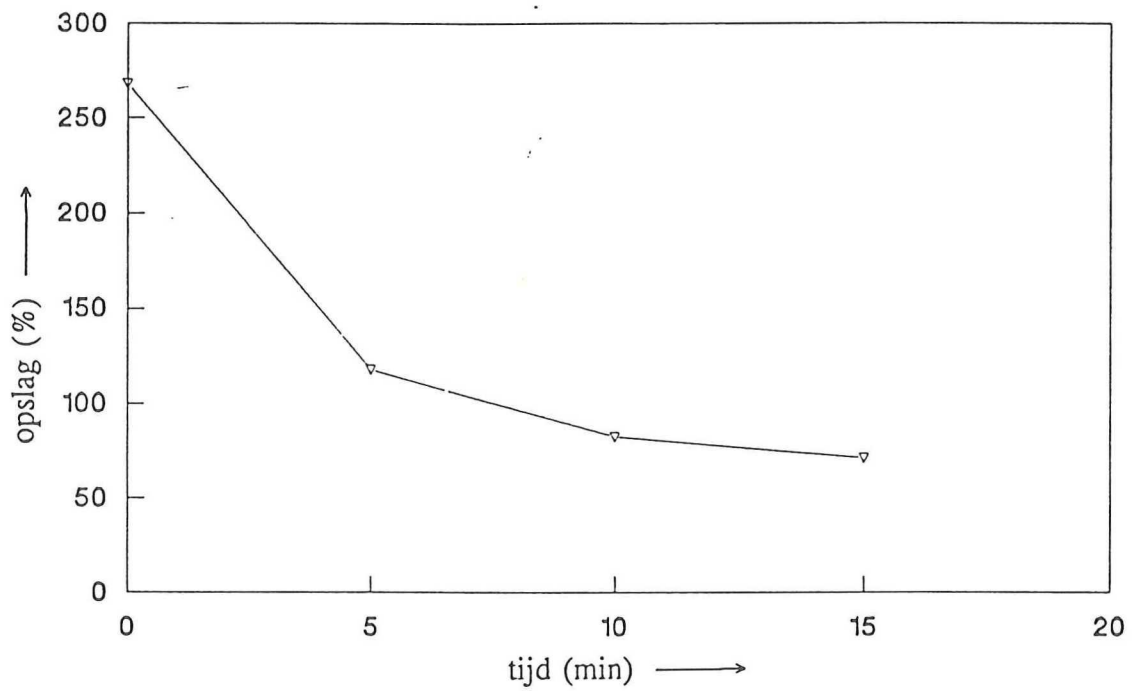
De experimenten met room en lachgas geven op een aantal vlakken duidelijk afwijkende resultaten ten opzichte van de experimenten met room en stikstof. Het grote verschil tussen de twee soorten experimenten is dat het lachgas veel beter in de room verdeeld is bij het binnenkomen van de korrelbuis is dan stikstof. Room met lachgas schuimt door expansie van het gas, terwijl room met stikstof gaat schuimen door de stikstof in de room te dispergeren.

De uitbotering komt veel gemakkelijker tot stand en daardoor kan bij veel kortere lengten stijve slagroom geproduceerd worden. Bij stikstof experimenten was de buislengte van minimaal circa 3 cm nodig, terwijl bij lachgas met een buislengte van 1 cm zonder probleem stijve slagroom werd geproduceerd. Kortere lengten zijn niet uitgetest.

De gemiddeld gemeten opslag is 170 %, met uitschieters naar 240 %. Dit is veel hoger dan bij de experimenten met stikstof, die meestal een opslag gaven die lager was dan 100 %.

Invloed van (1) de drukval over de kraan voor de korrelbuis, (2) het vooraf schudden van de room en (3) de lachgas druk.

Uitbotering blijkt veel sneller te verlopen als bij het binnenkomen van de korrelbuis al expansie van het lachgas heeft plaatsgevonden. Deze expansie in de beginfase wordt vooral gestimuleerd door een drukval over een kraan voor de korrelbuis en door kort vooraf te schudden (kiemvorming). De lachgas druk in het voorraadvat blijkt veel minder invloed te hebben.



Figuur 4.2. Inzakken van slagroom na het uitspuiten uit een spuitbus, zoals gemeten tijdens één van de meetseries.

Minimaal benodigde drukval over de korrelbuis.

De lachgas druk in het voorraadvat speelt wel een rol als deze te laag wordt. Ten eerste zal geen uitbotering meer optreden omdat de gas/vloeistofdebiet verhouding te laag is in de korrelbuis. Ten tweede zal, als eenmaal uitgeboterde slagroom in de korrelbuis zit, de drukval per meter over de korrelbuis te laag worden om de yield stress van uitgeboterd schuim in de korrelbuis te overwinnen.

Invloed van buislengte en korreldiameter (1), en van kraan en buisdiameter op het slagroomdebiet (2).

De buislengte en korreldiameter zijn van belang om de juiste mate van uitbotering te krijgen; de kranen voor de korrelbuis en de buisdiameter bepalen het debiet.

Kloppen van spuitroom uit spuitbussen in de korrelbuis.

Een poging om room uit spuitbussen in de korrelbuis met lachgas stijf te kloppen is niet gelukt. Van alle gebruikte merken, trad alleen bij Almhof van Uniekaas een zekere mate van uitbotering op. De uitbotering van die slagroom was in de korrelbuis ook aanzienlijk groter dan bij het uitspuiten uit de conventionele spuitbus.

4.3. Inzakken van spuitbuslagroom

Het inzakken van slagroom uit spuitbussen wordt veroorzaakt door diffusie van lachgas de slagroom uit. Na 5 minuten is meer dan de helft van de oorspronkelijke hoeveelheid gas uit de slagroom verdwenen als de slagroom in een mooie rozet met veel oppervlak wordt uitgespoten, zie figuur 4.2. Wordt de slagroom uitgespoten en vormt het een grote massa zonder veel oppervlak dan is de daling van de opslag veel minder.

Gebleken is dat de diffusie van lachgas uit spuitroom snelheidsbepalend is bij de achteruitgang van de kwaliteit van het opgespoten produkt. Het oppervlak wordt glanzend doordat de drainage het kleiner worden van de bellen niet kan bijhouden.

4.4. Overige resultaten

Bij het uitspuiten van de conventionele spuitbussen bleek slagroom uit een Malebic spuitbus een opslag te hebben van circa 450 %, en slagroom uit een Almhof Uniekaas spuitbus 270 %. De Almhof spuitbus had als enige uitbotering en smaakte romiger.

De opslag van slagroom geklopt met een mixer bleek in lucht omgeving circa 90 % te zijn en in lachgas omgeving circa 70 %.

Door aan vloeibare slagroom bindmiddel toe te voegen, bleek dat de kloptijd aanzienlijk afnam als de beginviscositeit hoger was.

5. Theoretische verklaring

Dit hoofdstuk geeft een theoretische verklaring van de verschijnselen die zijn waargenomen bij de experimenten.

In § 5.1. zal ingegaan worden op de stromingsverschijnselen bij het kloppen en stromen van room, in § 5.2 op de opslag en de theoretisch haalbare opslag in gespoten room en in § 5.3 op het inzakken van gespoten slagroom na het uitspuiten door de diffusie van het gas uit de slagroom.

§ 5.1. Stromingsverschijnselen bij het kloppen

Deze beschouwing behandelt de schuifkrachten die optreden en noodzakelijk zijn tijdens het uitboteren van room door het slaan en spuiten ervan.

Eerst wordt in § 5.1.1 aangetoond dat schuifkrachten van belang zijn om slagroom te laten uitboteren, waarna in § 5.1.2 wordt aangetoond dat schuifkrachten de stromingsverschijnselen bij de gedane experimenten bepalen. In § 5.1.3 en § 5.1.4 wordt ingegaan op het effect van schuifkrachten in het algemeen respectievelijk tijdens het kloppen van de room.

De daaropvolgende paragrafen gaan meer gedetailleerd in op de effecten van schuifkrachten bij het kloppen van room. In § 5.1.5 wordt ingegaan op de yield stress van uitgeboteerde slagroom, in § 5.1.6 op de homogeniteit van het stijf worden van slagroom bij het slaan met een mixer en in § 5.1.7 op het kloppen van room in een spuitkop.

§ 5.1.1. Belang van schuifkrachten tijdens het uitboteren

Schuifkrachten zijn van belang bij het uitboteren van slagroom. Het directe verband is gelegd door room te kloppen met verhoogde beginviscositeit, die veel sneller tot boter geklopt werd dan room met normale beginviscositeit.

§ 5.1.2. Stroming bij het kloppen bepaald door schuifkrachten

Bij het kloppen van room wordt de stroming in hoge mate bepaald door de schuifkrachten. Deze conclusie volgt uit het optredende Reynolds getal.

Het Reynolds getal geeft de verhouding weer tussen impuls transport door convectieve stroming en impulstransport door afschuiving. Naarmate het Reynolds getal kleiner wordt, zal de invloed van impulstransport door afschuiving toenemen. Dit betekent niets anders dan dat schuifkrachten belangrijker worden.

Het Reynolds getal bij het kloppen van room is geschat aan de hand van de meetomstandigheden bij de experimenten met de gebruikte korrelbuis, waar de room doorheen stroomde en in geklopt werd. De buis had een doorsnede van $1,13 \text{ cm}^2$ en was gevuld met korrels van 1 mm. Het vloeistofdebiet was in de orde van 10 ml/s.

5. Theoretische verklaring

Uit schattingen blijkt dat het Reynolds getal circa 20 bedraagt en dat de werkelijke waarde waarschijnlijk nog orden lager is. Bij de berekening van deze waarde is niet de viscositeit van slagroom gebruikt, omdat deze niet geschat kon worden. Daarom is voorzichtigheidshalve uitgegaan van de viscositeit van water.

Berekening Reynolds getal

Voor het Reynolds getal geldt:

$$Re = \frac{\rho * v * d}{\eta} \quad (1)$$

waarin ρ = dichtheid
 η = viscositeit
 d = diameter
 Re = Reynolds getal
 v = snelheid

Bij de berekeningen blijkt dat het produkt van ρ en v onafhankelijk is van de verhouding van het gas- en vloeistofdebiet. Neemt het gasdebiet relatief toe, dan daalt de dichtheid evenredig met de toename van de snelheid, want

$$\rho_{totaal} = \frac{\rho_{vl} + q * \rho_{gas}}{q+1} \approx \frac{\rho_{vl}}{q+1} \quad (2)$$

$$v \sim \phi_{totaal} = \phi_{vl} + q * \phi_{gas} = (q+1) * \phi_{vl} \quad (3)$$

waarin q = verhouding van gas- en vloeistofdebiet
 ρ_{gas} = dichtheid gasstroom
 ρ_{totaal} = gemiddelde dichtheid van de stroom
 ρ_{vl} = dichtheid vloeistofstroom
 ϕ_{gas} = volumedebiet gasstroom
 ϕ_{totaal} = totale volumedebiet
 ϕ_{vl} = volumedebiet vloeistofstroom

Daarom is bij de berekening van de dichtheid en de snelheid uitsluitend rekening gehouden met het vloeistofdebiet.

Dichtheid: Als dichtheid is de dichtheid van room gekozen, 1060 kg/m³.

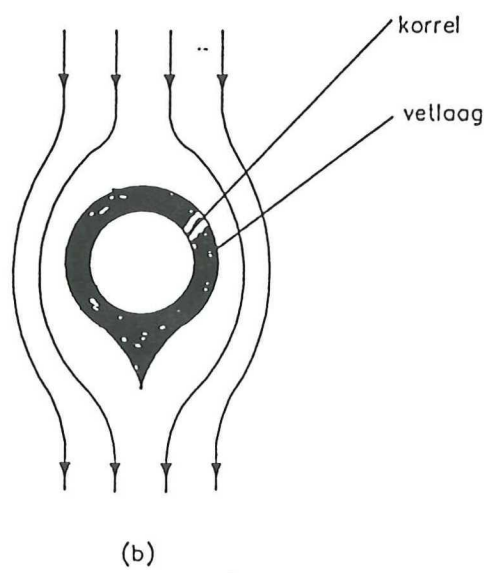
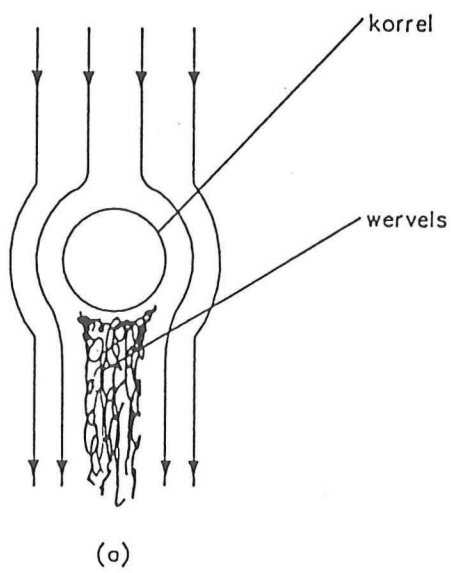
Snelheid: Voor de snelheid van de vloeistof (room) geldt:

$$v = \frac{\phi_{vl}}{A * \epsilon} \quad (4)$$

waarin ϵ = porositeit gevulde korrelbuis
 A = doorsnede lege korrelbuis

Met een vloeistofdebiet van 10 ml/s, een doorsnede van 1,13 cm² en een porositeit van 0,39 (random gepakt bed) volgt dat de vloeistofsnelheid gelijk is aan 0,23 m/s.

Bij het berekenen van de snelheid is met twee invloeden geen rekening gehouden:



Figuur 5.1. Strooming om een korrel, (a) vòòr en (b) nà het ontstaan van een boterlaag op de korrel.

5. Theoretische verklaring

- Het ontstaan van de vetlaag op de korreltjes, waardoor de porositeit afneemt.
- De slipsnelheid tussen gasfase en vloeistoffase. (De snelheid van het gas en de vloeistof in de korrelbuis verschillen, waardoor de verhouding van gas en vloeistof in de korrelbuis afwijkt van de verhouding van gas- en vloeistofdebiet.)

Diameter: Als diameter is de gemiddelde diameter van de kanaaltjes tussen de korreltjes gekozen. Daarvoor geldt:

$$\frac{\pi * d_{kanaal}^3}{6} = \frac{\epsilon}{1-\epsilon} * \frac{\pi * d_{korrel}^3}{6} \quad (5)$$

waarin d_{kanaal} = gemiddelde kanaaldiameter
 d_{korrel} = korreldiameter

Bij een korreldiameter van 1 mm volgt dat de kanaaltjes een diameter van 0,8 mm hebben.

Ook hierbij is weer geen rekening gehouden met de vetlaag op de korreltjes, waardoor de kanaaltjes smaller worden.

Viscositeit: Voor de viscositeit is de viscositeit van water gekozen, 0,001 Pa.s. Die viscositeit is veel kleiner dan de viscositeit van geslagen room, die overigens niet bepaald kon worden.

Met deze waarden volgt dat Reynolds circa 20 is.

Het Reynolds getal geeft ook aan of een stroming laminair of turbulent is. Deze twee typen van stroming zijn geheel verschillend, en gaan in elkaar over bij een bepaalde waarde van het Reynolds getal. Bij Reynolds getallen kleiner dan die kritische waarde is de stroming laminair, waarbij het stroomprofiel wordt bepaald door schuifkrachten. Bij Reynolds getallen groter dan die kritische waarden is de stroming turbulent, waarbij wervels optreden en het snelheidsprofiel vlakker is.

Voor korrelstapelning geldt in principe dat de stroming niet meer laminair is bij een Reynolds getal groter dan één, door de aanwezige wervels in het zog van de korrels. Door het ontstaan van een boterlaag op de korrels zal het oppervlak van de korrels zodanig gestroomlijnd worden dat van het loslaten van de stroomlijnen aan de achterzijde van de bolletjes geen sprake meer zal zijn, zie figuur 5.1, en zal de stroming in korrelbuis dus laminair zijn..

Door het invullen van experimentele gegevens in de vergelijking van Ergun, kon echter niet worden aangetoond of de stroming laminair of turbulent is.

§ 5.1.3. Effect van schuifkrachten in het algemeen

Naarmate de schuifkrachten groter zijn, wordt meer vermogen gedissipeerd per volume.

Voor de schuifkracht en schuifspanning in een Newtonse vloeistof geldt:

$$F = \tau_{xy} A \quad (6)$$

$$\tau_{xy} = -\eta * \frac{dv_y}{dx} \quad (7)$$

waarin τ_{xy} = schuifspanning in y-richting orthogonaal op x-richting
A = oppervlakte waarop schuifspanning aangrijpt
F = schuifkracht
 v_y = snelheid in y-richting
x = plaatscoördinaat
y = plaatscoördinaat

Schuifkracht en schuifspanning zijn dus direct aan elkaar gecorreleerd.

Voor het gedissipeerde vermogen per volume geldt dan:

$$e = \tau_{xy} * \frac{dv_y}{dx} = -\eta * \left(\frac{dv_y}{dx} \right)^2 \quad (8)$$

waarin e = gedissipeerd vermogen per volume

Hieruit volgt dat het gedissipeerde vermogen per volume groter worden naarmate de snelheidsgradiënt groter wordt (bij constante viscositeit).

§ 5.1.4. Effecten van schuifkrachten op het kloppen van room

Grotere schuifkrachten versnellen het stijf kloppen (uitboteren).

De grotere energiedissipatie door de schuifkrachten heeft twee effecten: (1) het ontstaan van kleinere gasbelletjes, wat leidt tot meer gas/vloeistof oppervlak en fijnere gasverdeling, en (2) de grotere vervorming en beschadiging van de vetdeeltjes.

Het positieve effect van de kleinere gasbelletjes is uit de experimenten gebleken door de snellere productie van stijve slagroom bij room/lachgas stromen i.p.v. room/stikstof stromen.

De grotere vervorming en beschadiging van vetdeeltjes leidt ook tot stijvere slagroom, zoals eerder beschreven in § 2.2.1.

Het verband tussen het sneller stijf kloppen en de grotere schuifkracht kan ook fenomenologisch beschreven worden. Als vloeibare room wordt geslagen, dan duurt het vrij lang voordat de room een klein beetje stijver is. Is er verhoogde stijfheid bereikt, dan wordt de slagroom heel snel stijver.

Deze twee situaties verschillen in de energiedissipatie per volume:

- Bij de vloeibare room wordt alle room in beweging gezet en de energie min of meer gelijkelijk over het geheel verdeeld.

5. Theoretische verklaring

- Bij de stijvere slagroom staat, overdreven gesteld, de slagroom die het verst van de mixer vandaan is stil, maar de slagroom direct om de mixer beweegt als een klomp mee. Daar wordt de energie zeer plaatselijk gedissipeerd op het "grensvlak" van de bewegende en stilstaande slagroom, doordat daar de snelheidsgradiënt wordt geconcentreerd.

Dit sluit weer aan bij formule die stelt dat het gedissipeerde vermogen per volume evenredig is met het produkt van schuifspanning en afschuifsnelheid en dus evenredig met het produkt van de viscositeit en het kwadraat van de snelheidsgradiënt.

Doordat slagroom yield stress heeft, wordt de concentratie van de snelheidsgradiënt nog extra versterkt, zie § 5.1.6.

§ 5.1.5. Yield stress van uitgeboterde slagroom

Slagroomschuim heeft yield stress en die yield stress neemt toe naarmate de slagroom verder uitbotert. Voor het rheologische gedrag van een vloeistof met yield stress geldt:

$$|\tau_{xy}| - \tau_0 = \eta \left| \frac{dv_y}{dx} \right| \quad \text{als } |\tau_{xy}| > \tau_0 \quad (9)$$

$$\left| \frac{dv_y}{dx} \right| = 0 \quad \text{als } |\tau_{xy}| \leq \tau_0 \quad (10)$$

waarin τ_0 = yield stress

Dit betekent dat er geen snelheidsgradiënt optreedt als de schuifspanning kleiner is dan de yield stress van een vloeistof en zo'n vloeistof dus pas gaat stromen als de schuifspanning groter is dan de yield stress. De optredende snelheidsgradiënten zullen in zo'n vloeistof kleiner zijn dan in een vloeistof zonder yield stress (bij gelijke schuifkracht).

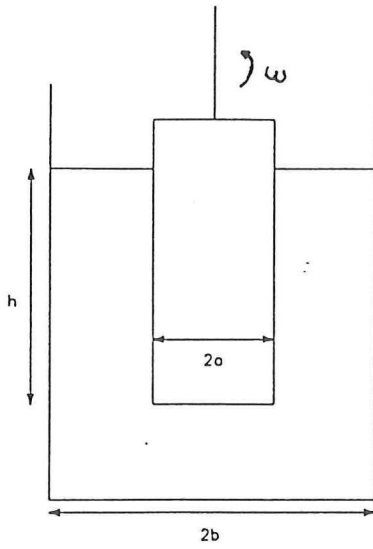
§ 5.1.6. Homogeniteit van het stijf worden van slagroom bij het slaan met een mixer

Er van uitgaande dat het stijf worden van slagroom evenredig is met de energiedissipatie per volume, zal worden aangetoond dat een bepaald volume slagroom homogener stijf wordt bij het kloppen met een mixer, naarmate de diameter van de mixer toeneemt. Dit zal gedaan worden door eerst de stromingsvergelijkingen af te leiden van vloeistof (zonder yield stress) tussen een draaiende mixer en een stilstaande 'kom'. Daarna zal het homogeniserende effect van verschillen in de viscositeit en in de yield stress er bij worden betrokken.

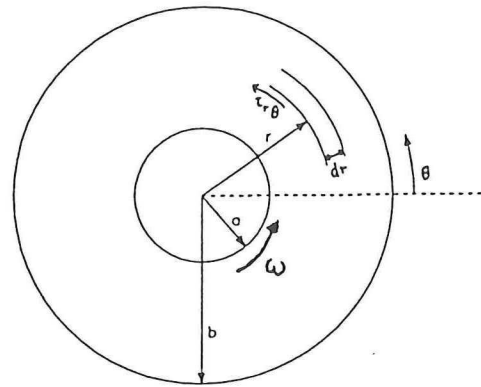
Stromingsvergelijkingen

Een model van een draaiende mixer in een kom is geschetst in figuur 5.2 (z.o.z.).

Voor een krachtmoment geldt:



(a)



(b)

Figuur 5.2. Model van een draaiende mixer in een kom, (a) verticale doorsnede en (b) horizontale doorsnede.

5. Theoretische verklaring

$$M = \text{kracht} * \text{arm} = \tau_{r\theta} * A * r \quad (11)$$

waarin $\tau_{r\theta}$ = schuifspanning in tangentiële θ -richting orthogonaal op de radiale richting
 θ = plaatscoördinaat in tangentiële richting
 M = krachtmoment
 r = lengte arm, plaatscoördinaat in radiale richting

Het krachtmoment op het cilindervormig volumeëlement in figuur 5.2 is nul:

$$(h2\pi r \tau_{r\theta} r)_{r=r} - (h2\pi r \tau_{r\theta} r)_{r=r+dr} = 0 \quad (12)$$

waarin h = hoogte vloeistofelement

Daaruit volgt:

$$\frac{d(r^2 \tau_{r\theta})}{dr} = 0 \Rightarrow r^2 \tau_{r\theta} = K_1 \quad (13)$$

waarin K_1 = constante

Voor de schuifspanning in een cilindrisch coördinatenstelsel geldt:

$$\tau_{r\theta} = -\eta r \frac{d}{dr} \left(\frac{v_\theta}{r} \right)$$

waarin v_θ = snelheid in tangentiële θ -richting

Uit vergelijkingen 13 en 14 volgt

$$v_\theta = -\frac{1}{2\eta} \frac{1}{r} K_1 + \frac{r}{\eta} K_2$$

waarin K_2 = constante

Met de randvoorwaarden dat $v_\theta = \omega a$ op $r = a$ en $v_\theta = 0$ op $r = b$ volgt

$$\tau_{r\theta} = 2\eta \omega \frac{a^2 b^2}{b^2 - a^2} \frac{1}{r^2} \quad (16)$$

5. Theoretische verklaring

$$v_{\theta} = \omega \frac{a^2}{b^2 - a^2} \left(\frac{b^2}{r} - r \right) \quad (17)$$

waarin ω = hoeksnelheid (rad/s)
 a = straal mixer
 b = straal kom

Bij een gelijk blijvend volume te kloppen room, zal bij het groter worden van de mixerstraal a het verschil tussen de straal van de kom en van de mixer kleiner worden. Voor het relatieve verschil tussen de straal van de kom en de mixer $((b-a)/b)$ geldt:

$$V' = \pi b^2 - \pi a^2 = \text{constant} \Rightarrow b = a + \sqrt{\frac{V'}{\pi}} \Rightarrow \frac{b-a}{b} = \frac{\sqrt{\frac{V'}{\pi}}}{b} \quad (18)$$

waarin V' = volume per hoogteëenheid

Daardoor zal het relatieve verschil in de uiterste waarden van de schuifspanning afnemen.

Daardoor zal ook het verschil in de uiterste waarden van het gedissipeerd vermogen per volume afnemen, want volgens Bird geldt (lit. 1):

$$e = \tau_{r\theta} * r \frac{d}{dr} \left(\frac{v_{\theta}}{r} \right) \quad (19)$$

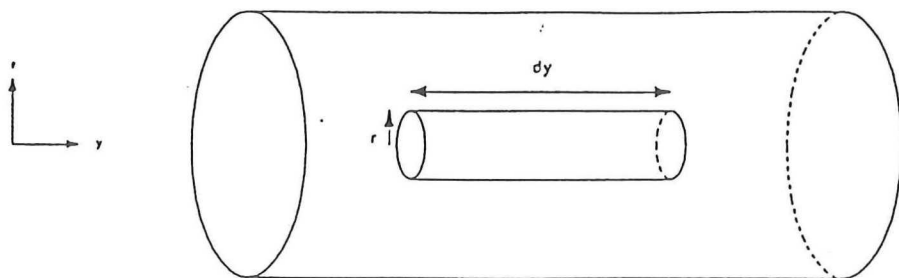
Als het stijf worden van slagroom evenredig is met de mate van energiedissipatie, dan zullen verschillen in stijfheid afnemen naarmate een bepaald volume room met een mixer met een grotere straal wordt geslagen.

Effect van verschillen in de viscositeit

Stel de situatie dat overal de schuifspanning en viscositeit gelijk zijn, dan zal ook het gedissipeerd vermogen per volume overal gelijk zijn. Heeft de vloeistof op een bepaalde plaats een hogere viscositeit, dan zal de snelheidsgradiënt daar lager zijn en zal daar dus minder energie gedissipeerd worden. Dit betekent dus dat als slagroom niet homogeen stijf is, dat op plaats met minder stijve (minder visceuze) slagroom meer energiedissipatie plaatsvindt dan op een plaats met stijvere slagroom.

Effect van verschillen in yield stress

Omdat slagroom een grotere yield stress heeft, naarmate die verder uitgeboterd is, zal de inhomogeniteit bij het kloppen met een mixer worden tegengaan.



Figuur 5.3. Volumeëlement in een ronde buis.

5. Theoretische verklaring

Stel dat in een kom met slagroom één deel van de room meer is uitgeboterd dan een ander deel en dat de optredende schuifspanning ligt tussen de yield stress van de meer en minder stijve slagroom, dan zal de gehele snelheidsgradiënt en dus alle energiedissipatie plaatsvinden in de minder stijve slagroom.

Als een mixer is gemaakt om een constant vermogen te leveren, dan betekent dit dan de energie die niet gedissipeerd wordt in de stijvere slagroom gebruikt wordt om "extra" gedissipeerd te worden in de minder stijve slagroom. Daarmee wordt de inhomogeniteit teruggedrongen.

§ 5.1.7. Room kloppen in een spuitkop

Het kloppen van room in een spuitkop gebeurt doordat de slagroom als gevolg van een drukval door de spuitkop geperst wordt.

Het blijkt dat de eerste boterafzetting bij het kloppen in een spuitkop op de wand plaatsvindt, en dat naarmate de kanaaltjes in de spuitkop nauwer worden een grotere minimum drukval per meter nodig is, waarbij de gemiddelde energiedissipatie per uitstromend volume gelijk is aan de drukval over de spuitkop.

In deze paragraaf volgt, na een afleiding van de stromingsvergelijkingen in een spuitkop, een beschrijving van die verschijnselen.

Stromingsvergelijkingen in een spuitkop

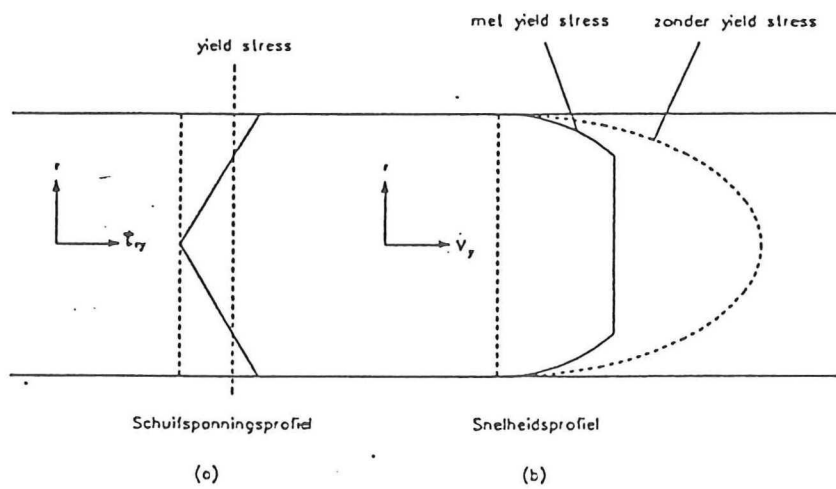
Bij een ronde buis, waar vloeistof door heen stroomt, is de krachtenbalans op een volumeëlement (zie figuur 5.3):

$$p\pi r^2|_y - p\pi r^2|_{y+dy} - \tau_{ry} 2\pi r dy = 0 \quad (20)$$

waarin τ_{ry} = schuifspanning in y-richting orthogonaal op de radiale richting
 p = druk

Uit deze krachtenbalans volgt voor de schuifspanning:

$$\tau_{ry} = -\frac{dp}{dy} \frac{r}{2} \quad (21)$$



Figuur 5.4. Schuifspanningsprofiel (a) en snelheidsprofiel (b) van een stromende vloeistof in een ronde buis.

5. Theoretische verklaring

Hieruit volgt, gecombineerd met vgl. 9, voor de snelheidsgradiënt dv_y/dr op straal r van het middelpunt:

$$\frac{dv_y}{dr} = \frac{-\left(-\frac{dp}{dy}\right) \frac{r}{2} + \tau_0}{\eta} \quad \text{voor } r \text{ met } |\tau_{xy}| > \tau_0 \quad (22)$$

$$\frac{dv_y}{dr} = 0 \quad \text{voor } r \text{ met } |\tau_{xy}| \leq \tau_0 \quad (23)$$

Voor een stroomkanaal volgt voor de snelheid v_y op straal r van het middelpunt:

$$v_y = \left(-\frac{dp}{dy}\right) \frac{(R^2 - r^2)}{4\eta} - \tau_0 \frac{(R-r)}{\eta} \quad \text{voor } r \text{ met } |\tau_{xy}| > \tau_0 \quad (24)$$

$$v_y = \left(-\frac{dp}{dy}\right) \frac{(R^2 - R_0^2)}{4\eta} - \tau_0 \frac{(R-R_0)}{\eta} \quad \text{voor } r \text{ met } |\tau_{xy}| \leq \tau_0 \quad (25)$$

waarin R = straal kanaal
 R_0 = straal waarbij $\tau = \tau_0$

In figuur 5.4 is het schuifspanningsprofiel en het snelheidsprofiel geschetst.

Eerste botervorming aan de wand van het stroomkanaal

Uit de schuifspanning en de snelheidsgradiënt volgt voor het plaatselijke gedissipeerd vermogen per volumeëenheid:

$$e = \tau \frac{dv}{dr} = \left(-\frac{dp}{dy}\right)^2 \frac{r^2}{4\eta} - \tau_0 \left(-\frac{dp}{dy}\right) \frac{r}{2\eta} \quad \text{voor } r \text{ met } |\tau| > \tau_0 \quad (26)$$

Als de slagroom nog zo slap is dat de yield stress te verwaarlozen is, dan betekent dit dat aan de wand van het kanaal het meeste per volume wordt gedissipeerd. Daarnaast volgt uit het snelheidsprofiel dat de vloeistof daar het langzaamste stroomt. Aan de wand wordt dan dus de meeste energie per debiet gedissipeerd. Daardoor zal de uitbotering starten aan de wand.

In tegenstelling tot het kloppen met een mixer, zal het kloppen in een spuitkop niet geheel homogeen verlopen. Aan de wand zal, bij gelijke stijfheid (viscositeit, yield stress) altijd de

5. Theoretische verklaring

meeste energie per debiet worden gedissipeerd. Daardoor zal in die situatie aan de wand de slagroom sneller stijf worden. Wel zal, net als bij het kloppen met een mixer, het verschil in stijfheid beperkt worden door de verschillen in viscositeit en yield stress tussen stijve en minder stijve slagroom.

Grotere minimum drukval per meter bij nauwere kanaaltjes

Stijve slagroom gaat pas stromen als de schuifkracht τ_{ry} groter is dan de yield stress. Daarvoor moet de drukval per meter ($-dp/dy$) een minimum waarde hebben. Uit vergelijking 21 volgt dat deze minimum drukval per meter groter wordt naarmate de straal van de kanaaltjes kleiner wordt:

$$\left| \frac{dp}{dy} \right| = \left| \frac{2\tau_{ry}}{r} \right| \Rightarrow \left| \frac{dp}{dy} \right| \geq \left| \frac{2\tau_0}{R} \right| \quad (27)$$

Hieruit volgt dus ook dat bij nauwe kanaaltjes de korrelbuis niet te lang mag zijn, omdat dat de drukval per meter verlaagt.

Als de slagroom gaat stromen, dan heeft de snelheid een profiel zoals getekend in figuur 5.4.

Gemiddelde energiedissipatie per uitstromend volume

Stel de limietsituatie dat voor nagenoeg elke straal (tot bij het middelpunt) de schuifspanning groter is dan de yield stress, wat het geval is als de drukval per meter relatief groot of de yield stress klein is (slappe slagroom). Dan geldt voor het gemiddeld gedissipeerd vermogen per volumeëenheid:

$$e = \frac{1}{\pi R^2} \int_0^R \left[\left(-\frac{dp}{dy} \right)^2 \frac{r^2}{4\eta} - \tau_0 \left(-\frac{dp}{dy} \right) \frac{r}{2\eta} \right] 2\pi r dr = \left(-\frac{dp}{dy} \right)^2 \frac{R^2}{8\eta} - \tau_0 \left(-\frac{dp}{dy} \right) \frac{R}{3\eta} \quad (28)$$

In deze situatie geldt voor het debiet:

$$\phi = \int_0^R (v 2\pi r) dr = \frac{\pi}{\eta} \left\{ \left(-\frac{dp}{dy} \right) \frac{R^4}{8} - \tau_0 \frac{R^3}{3} \right\} \quad (29)$$

waarin ϕ = volumedebiet

5. Theoretische verklaring

Uit het gedissipeerd vermogen per volumeëenheid en het debiet volgt voor de gedissipeerde energie per uitgestroomd volume (P/ϕ):

$$\frac{P}{\phi} = \frac{P/V}{\phi} * V = \frac{e}{\phi} * V = \frac{\left(-\frac{dp}{dy}\right)^2 \frac{R^2}{8\eta} - \tau_0 \left(-\frac{dp}{dy}\right) \frac{R}{3\eta}}{\frac{\pi}{\eta} \left\{ \left(-\frac{dp}{dy}\right) \frac{R^4}{8} - \tau_0 \frac{R^3}{3} \right\}} * \pi R^2 L = L \left(-\frac{dp}{dy}\right) = L \frac{\Delta p}{L} = \Delta p$$

waarin P = gedissipeerd vermogen in stroomkanaal (30)
 V = volume stroomkanaal
 L = lengte stroomkanaal
 Δp = drukval

De gedissipeerde energie per uitgestroomd volume is dus gelijk aan de drukval over de korrelbuis.

Dit had ook direct afgeleid kunnen worden uit de Bernouilli vergelijking:

$$\frac{\Delta P}{\rho} = \frac{1}{2} \Delta (v^2) + A_{wr} \quad (31)$$

waarin A_{wr} = gedissipeerde energie per massaëenheid

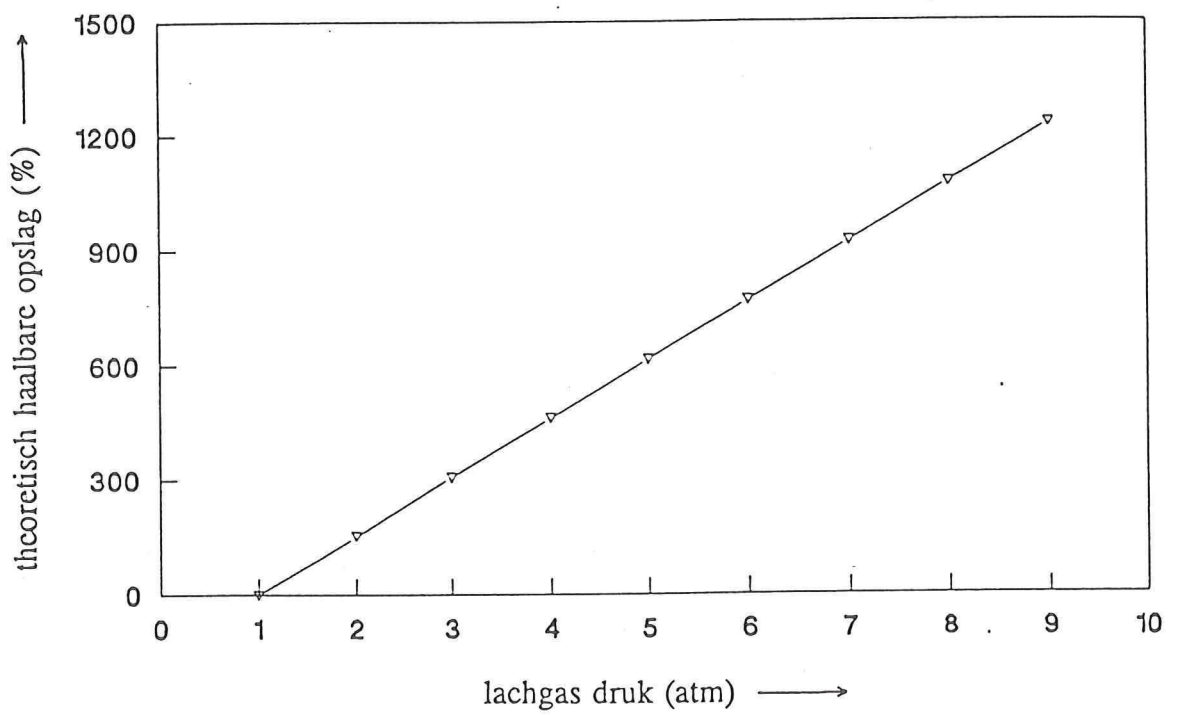
Uit de experimenten bleek dat er bij een drukval van 8 bar over het stroomkanaal de snelheid van de vloeistof toenam van 0 m/s in het voorraadvat naar 0,2 m/s bij het uitstromen van het kanaal. Ingevuld in de Bernouilli vergelijking betekent dit dat bij benadering alle beschikbare energie uit de drukval wordt gedissipeerd.

§ 5.2 Opslag en theoretisch haalbare opslag in gespoten slagroom

De opslag van slagroom is het volume gas in het opgeklopte produkt als percentage van het volume vloeibare/vaste room:

$$opslag = \frac{V_{gas}}{V_{vloeibare\ room}} * 100 \% \quad (32)$$

waarin V_{gas} = volume gas
 $V_{vloeibare\ room}$ = volume vloeibare/vaste room



Figuur 5.5. De theoretisch haalbare opslag bij het uitspuiten van een slagroomspuitbus als functie van de lachgasdruk.

5. Theoretische verklaring

De theoretisch haalbare opslag is de opslag die bereikt wordt als al het gas, dat bij het uitspuiten expandeert, in het opgespoten produkt terecht komt. Daarvoor geldt:

$$\text{maximale opslag} = \frac{\Delta m_{\text{gas}}}{m_{\text{vloeibare room}}} \frac{\rho_{\text{vloeibare room}}}{\rho_{\text{gas, 1 atm}}} * 100 \% \quad (33)$$

waarin Δm_{gas} = massa geëxpandeerd gas
 $m_{\text{vloeibare room}}$ = massa uitgespoten vloeibare room
 $\rho_{\text{gas, 1 atm}}$ = dichtheid gas bij 1 atmosfeer
 $\rho_{\text{vloeibare room}}$ = dichtheid vloeibare room

Het gas expandeert omdat de oplosbaarheid van het gas daalt door de drukverlaging bij het uitspuiten van de spuitbus naar de buitenlucht. De hoeveelheid geëxpandeerd gas hangt direct samen met de daling van oplosbaarheid tijdens deze drukval.

Bij kleine hoeveelheden opgelost gas, zoals in een slagroomsputbus, is die hoeveelheid opgelost gas evenredig met de partiële druk van dat gas volgens de wet van Henry:

$$x_{i, \text{mol}} = \frac{P_i}{H_i} \quad (34)$$

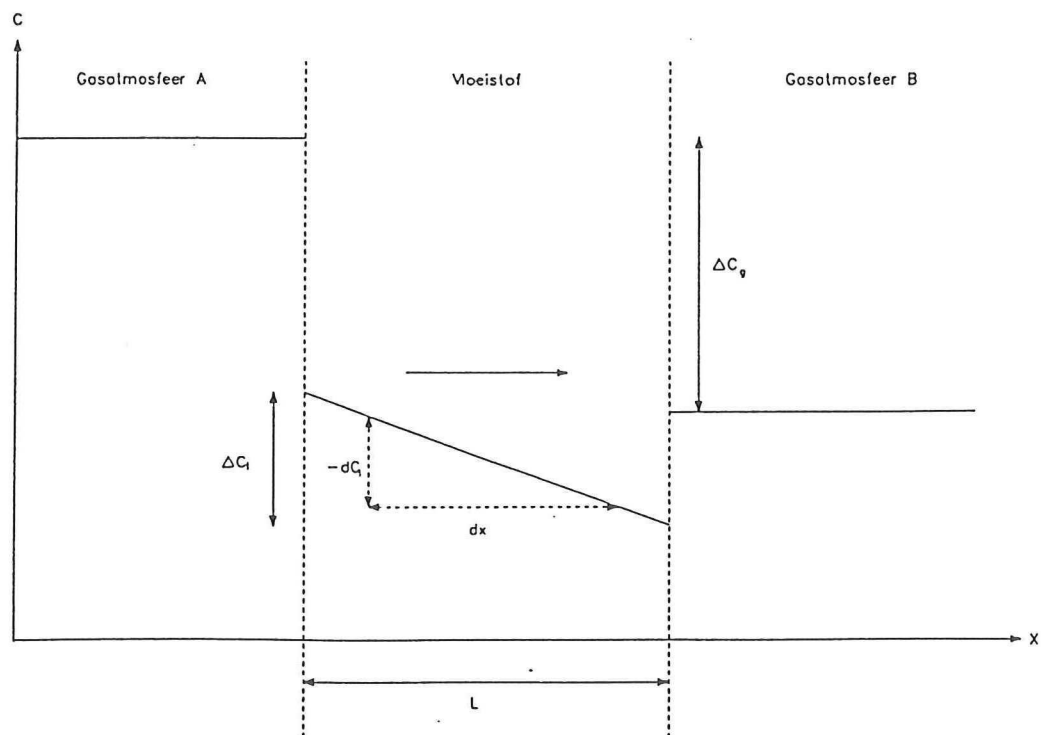
waarin $x_{i, \text{mol}}$ = molfractie opgelost gas
 P_i = partiële gasdruk van component
 H_i = Henry coëfficiënt voor het gas/vloeistof systeem

Uit deze molfractie volgt de massafractie volgens:

$$x_{i, \text{massa}} = \left(\frac{x_{i, \text{mol}}}{1 - x_{i, \text{mol}}} \right) \left(\frac{M_i}{M_{\text{vl}}} \right) \quad (35)$$

waarin $x_{i, \text{massa}}$ = massafractie opgelost gas
 M_i = molaire massa gas
 M_{vl} = molaire massa vloeistof

Het verloop van de theoretisch haalbare opslag bij het uitspuiten van een slagroomsputbus met lachgas is tegen de lachgas druk uitgezet in figuur 5.5. Bij de berekening van dat resultaat is er van uitgegaan dat 2,9 mg lachgas per g room per atmosfeer oplost (lit. 4) en is voor de partiële lachgas druk na het uitspuiten is 1 atmosfeer gekozen. De gebruikte dichtheid van room is 1060 kg/m³ en de dichtheid van lachgas bij 1 atmosfeer en kamertemperatuur is 2,0 kg/m³.



Figuur 5.6. Vereenvoudigd model van de gasdiffusie tussen twee gasbellen door een vloeistof.

§ 5.3. Het inzakken van de slagroom na het uitspuiten

Slagroom die uit een spuitbus wordt uitgespoten zakt snel in en wordt daarbij slapper. Na 5 minuten uitgespoten te zijn blijkt meer dan de helft van het gas uit de slagroom verdwenen te zijn. Dit wordt veroorzaakt door diffusie van het gas in de schuimbellen naar de omgevende atmosfeer.

In § 5.3.1 wordt dit diffusieproces met vergelijkingen beschreven, in § 5.3.2. wordt een verklaring gegeven voor het inzakken en in § 5.3.3. wordt aangetoond dat het tegengaan van het inzakken van spuitroom gepaard gaat met een drastische vermindering van de gasfractie (opslag) in het opgespoten produkt. Paragraaf § 5.3.4 beschrijft een computersimulatie van de diffusie van het gas uit de slagroom en de resultaten daarvan. Paragraaf § 5.3.5 beschrijft het slapper worden van de slagroom door de daling van de gasfractie in het opgespoten produkt.

§ 5.3.1. Vergelijkingen van diffusie tussen gasbellen

Voor deze beschrijving van gasdiffusie tussen twee gasbellen door vloeistof is uitgegaan van een vereenvoudigd model, zoals getekend in figuur 5.6.

Voor het gastransport van gasatmosfeer A naar B geldt:

$$\phi_{\text{massa}} = -ID \cdot A \cdot \frac{dC_1}{dx} = \frac{ID}{L} \cdot A \cdot \Delta C_1 = k_1 \cdot A \cdot \Delta C_1 = k_1 \cdot A \cdot m \cdot \Delta C_g \quad (36)$$

waarin ϕ_{massa} = massatransport van gas tussen A en B
 ID = diffusiecoëfficiënt van de gascomponent in de vloeistof
 A = oppervlakte waardoor transport plaatsvindt
 C_1 = concentratie van de component in de vloeistof
 ΔC_1 = concentratieverschil van component in de vloeistof over de breedte van de vloeistoflaag
 ΔC_g = gasconcentratieverschil van component tussen atmosfeer A en B
 x = plaatscoördinaat
 L = breedte van de vloeistoflaag
 k_1 = stofoverdrachtscoëfficiënt in de vloeistoffase
 m = oplosbaarheid van gascomponent in vloeistoffase

Voor de gasconcentratie geldt:

$$C_g = \frac{n \cdot M}{V} = \frac{M}{R \cdot T} \cdot P_i \quad (37)$$

waarin C_g = gasconcentratie van component
 V = volume

5. Theoretische verklaring

- n = aantal mol van component in volume V
M = molaire massa
p_i = partiële gasdruk van component

Voor een gasbel geldt voor de partiële druk p_i van een component

$$p_i = \omega * (p_0 + \Delta p_{Laplace}) \quad (38)$$

- waarin ω = molaire gasfractie van component
p₀ = druk van omgeving
 $\Delta p_{Laplace}$ = Laplace overdruk

De gasconcentratie van een component is rechtevenredig met de partiële druk van die component in de gasbel. Deze druk is afhankelijk van de molaire gasfractie van de component en de absolute druk in de bel. De absolute druk in de bel is de som van de druk van de omgeving (1 atmosfeer) en de Laplace druk als gevolg van het gekromde beloppervlak.

Voor de Laplace druk geldt (voor bolvormige bellen):

$$\Delta p_{Laplace} = \frac{2 * \gamma}{R} \quad (39)$$

- waarin γ = oppervlaktespanning
R = belstraal

§ 5.3.2. Oorzaken van het inzakken van slagroom

Het snelle inzakken van slagroom met lachgas bellen is het gevolg van het grote lachgas transport van de schuimbellen naar de buitenomgeving. Dit wordt veroorzaakt door enerzijds de grote lachgas concentratieverschil tussen de schuimbellen en buitenomgeving en anderzijds de goede oplosbaarheid van lachgas in slagroom.

Het grote lachgas concentratieverschil tussen schuimbellen en buitenomgeving is in feite een groot verschil in de partiële druk van lachgas. De schuimbellen zijn volledig gevuld met lachgas en hebben dus een partiële lachgas druk die gelijk is aan de som van de omgevingsdruk en de Laplace druk. De partiële lachgas druk in de buitenomgeving is 0, omdat er geen lachgas in de buitenomgeving voorkomt.

Meer gedetailleerd blijkt dat een verschil in partiële druk van een component tussen schuimbel en buitenomgeving wordt veroorzaakt door enerzijds verschillende molaire fracties van die component in de bel en in de buitenomgeving en door anderzijds de optredende Laplace druk. De Laplace druk heerst wel in de gasbellen, maar niet in de buitenomgeving. Hierbij kan de buitenomgeving worden beschouwd als een gasbel met een oneindig grote straal.



Figuur 5.7. Twee dimensionaal model van schuim, ingesloten door drie vaste wanden en een gasomgeving.

Bij slagroomschuim met lachgas bellen blijkt dat verschil in partiële druk voornamelijk veroorzaakt te worden door verschil in molaire fracties. De bijdrage door het verschil in molaire fracties blijkt namelijk veel groter te zijn dan de bijdrage van de Laplace druk. Zonder Laplace druk zou het verschil in molaire fracties al een partieel drukverschil van lachgas geven van één atmosfeer en de Laplace druk blijkt bij reële belldiameters ($50 \mu\text{m}$) veel kleiner te zijn dan één atmosfeer.

De oplosbaarheid van lachgas blijkt uitermate goed te zijn. In water is die oplosbaarheid 80 keer groter dan de oplosbaarheid van stikstof.

§ 5.3.3. Tegengaan van inzakken uitsluitend bij minder grote opslag

Het inzakken van slagroom wordt vertraagd als het gas in de bellen minder oplosbaar is in slagroom en wordt tegengegaan als dat gas aanwezig is in de buitenomgeving.

Wat dat betreft zou stikstof een zeer geschikt gas zijn: kleine oplosbaarheid (80 keer kleiner dan lachgas) en in grote mate aanwezig in de buitenomgeving.

De kleine oplosbaarheid in room brengt met zich mee dat het schuimen van room volgens het expansie principe (§ 2.2.2) niet mogelijk is bij acceptabele drukken. Bij deze methode van schuimen moet een bepaalde hoeveelheid opgelost gas expanderen bij het uitspuiten uit een spuitbus. Daarvoor moet dan ook voldoende gas worden opgelost. Om dat te bereiken zou de 80 keer lagere oplosbaarheid van een stikstof t.o.v. lachgas gecompenseerd moeten worden met een evenredige stijging van de druk in de spuitbus. Daardoor zou de druk in de spuitbus onacceptabel hoog worden.

Omdat geen enkel gas met een hoge oplosbaarheid in grote mate in de atmosfeer voorkomt, betekent dit dat het tegengaan van het inzakken uitsluitend mogelijk is als wordt afgestapt van het expansie principe.

Dan moet worden overgestapt op het schuimen volgens het dispergeerprincipe (§ 2.2.1) en daarbij is het nooit gelukt een slagroom te produceren die een grote opslag heeft.

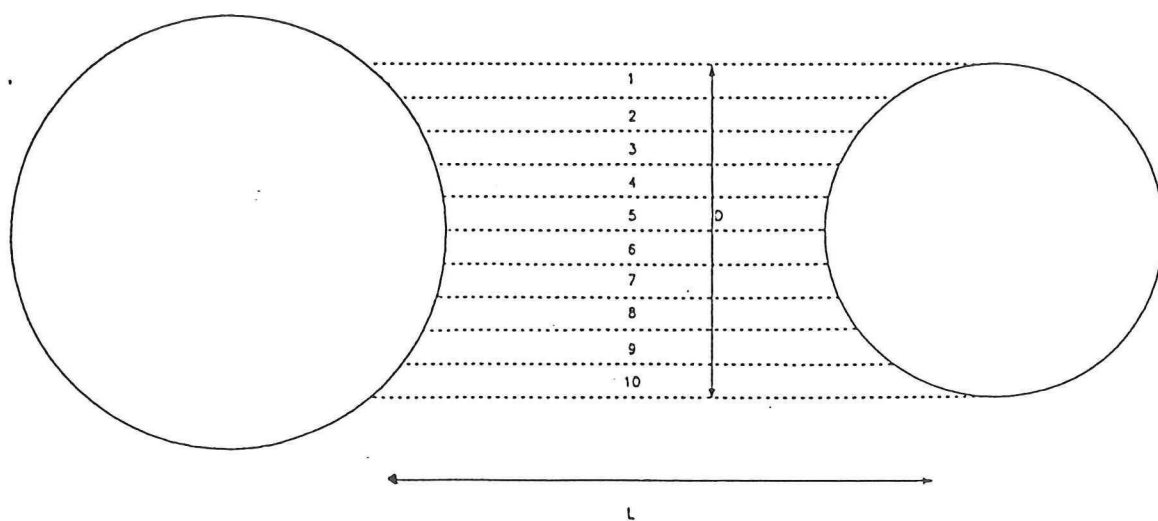
Dit betekent dus dat het tegengaan van het inzakken gepaard moet gaan met een veel minder grote opslag (minder dan 100 %) in de geproduceerde slagroom.

§ 5.3.4. Computersimulatie van diffusie in slagroom

In Turbo Pascal is een simulatie geschreven om het leeglopen van gasbellen in andere gasbellen of de buitenlucht te simuleren.

Uitgegaan is van een schuim in twee dimensionale matrix vorm, bestaande uit een aantal rijen schuimbellen. De matrix werd aan drie zijden begrensd door vaste wanden en aan één zijde door een gas omgeving. Zie figuur 5.7.

Het modelschuim had als vloeistof water, had een begin gasopslag van 80 %, gasbellen met een straal van $50 \mu\text{m}$, de middelpunten van alle bellen lagen op gelijke afstanden en het



Figuur 5.8. Vereenvoudigd model van diffusie tussen twee bellen, dat is toegepast in de computersimulatie, zie tekst.

5. Theoretische verklaring

afnemen van de gasopslag werd opgevangen door het verschuiven van het vrije schuimoppervlak aan de gasatmosfeer.

Het model berekende elke tijdstap het groter en kleiner worden van de bellen. Daarvoor werd het gastransport berekend tussen orthogonale en diagonale buurbellen en tussen de gasomgeving en de bellen die aan deze gasomgeving grenzen. Voor de berekening van het gastransport zijn een aantal vereenvoudigingen toegepast (zie figuur 5.8):

- Het oppervlak per diepteëenheid A' (2-D model) is de diameter van de kleinste bel.
- Het transport is de som van het transport door 10 evenwijdige corridors. De lengte L is voor elke corridor afzonderlijk berekend.
- Aangenomen is dat binnen elke corridor de concentratiegradiënt constant is, onafhankelijk van de plaats. Vanwege deze aanname is dc/dx gelijk aan $\Delta c/L$.

In bijlage 1 is een kopie van het Turbo Pascal programma opgenomen.

Drie situaties zijn onderzocht, schuim met:

1. lachgas bellen en stikstof omgeving;
2. lachgas bellen en lachgas omgeving;
3. stikstof bellen en stikstof omgeving.

Leeglopen van bellen aan oppervlak

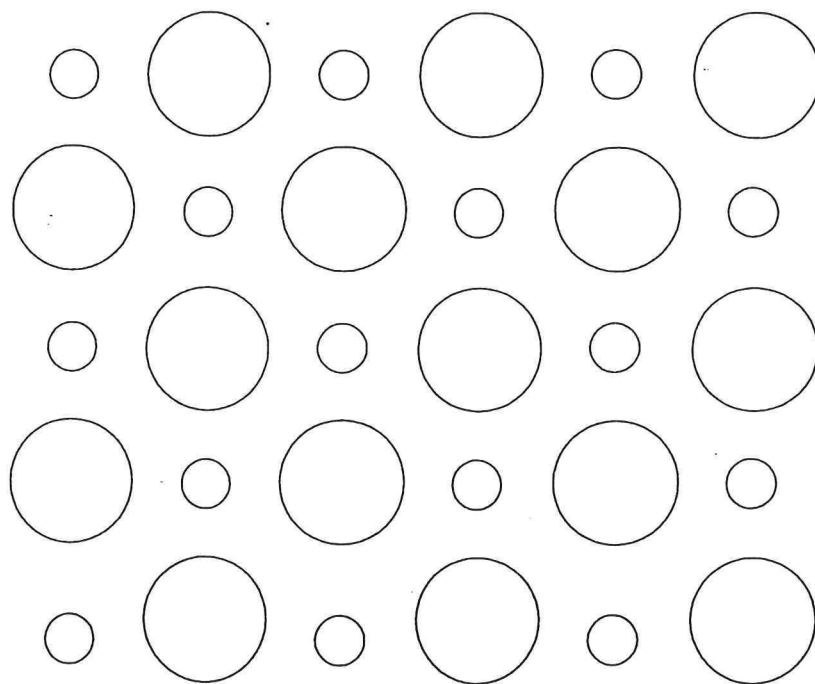
De tijd die het duurt voordat de rij bellen grenzend aan de gasomgeving is leeggelopen, is bij lachgas bellen in een lachgas omgeving 70 tot 80 keer groter dan bij lachgas bellen in stikstof omgeving. Het verschil tussen deze situaties is dat bij lachgas bellen in stikstof omgeving de drijvende kracht veel groter is: het lachgas concentratieverschil tussen lachgas bellen en stikstof omgeving is veel groter dan bij lachgas bellen in lachgas omgeving. Bij situatie 1 wordt het concentratie verschil bepaald door het ontbreken van lachgas in de omgeving. Bij situatie 2 wordt het concentratieverschil bepaald door de Laplace overdruk in de bellen.

De tijd die het duurt voordat de rij bellen grenzend aan de gasomgeving is leeggelopen, is bij stikstof bellen in een stikstof omgeving circa 50 keer korter dan bij lachgas bellen in een lachgas omgeving. Het verschil tussen deze situaties is dat de oplosbaarheid van lachgas in water 80 keer groter is dan de oplosbaarheid van stikstof in water. Daardoor zal het transport van lachgas veel sneller gaan dan het transport van stikstof.

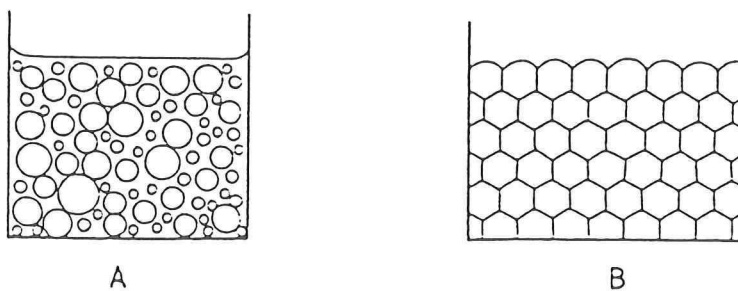
Het tijdsverschil tussen het leeglopen van de eerste rij bellen bij lachgas bellen in een stikstof omgeving gaat 3500 maal sneller dan stikstof bellen in stikstof omgeving.

Verdwijnen van gas uit slagroom versus disproportioneren

Het verdwijnen van gas uit de slagroom door diffusie naar de omgeving is belangrijker dan diffusie tussen de bellen onderling waardoor disproportionering optreedt. Hoewel



Figuur 5.9. Effect van langdurige disproportieering op bellen van vergelijkbare grootte.



Figuur 5.10. Schematische voorstelling van een sferisch (A) en polyedrisch (B) schuim.

modelaannamen in het nadeel van disproportioneerende werken (beperkte verschillen in belgrootte), zal deze conclusie bij schuim met lachgas bellen in een stikstof omgeving (lees slagroom uit een spuitbus) waar zijn.

Er is gesimuleerd met een schuim waarvan alle bellen de vaste straal van $50 \mu\text{m}$ hadden, behalve één bel die 30 % groter was, $65 \mu\text{m}$. Gevolg was dat de Laplace druk in de grotere bel kleiner was dan in de omringende bellen die zich vervolgens in de grotere bel gingen legen.

Bij deze model situatie bleek het leeglopen van de grensvlak bellen veel sneller te verlopen dan de disproportioneerende in het schuim. Bij het schuim met lachgas bellen in een stikstof omgeving was de grote bel tot $65,12 \mu\text{m}$ gegroeid op het moment dat de grensvlak bellen verdwenen waren. Bij schuim met lachgas bellen in een lachgas omgeving was dat $77,18 \mu\text{m}$ en bij schuim met stikstof bellen in een stikstof omgeving was dat $75,56 \mu\text{m}$. De straal van de orthogonale buren was in deze drie situatie gedaald tot respectievelijk $49,99 \mu\text{m}$, $45,98 \mu\text{m}$ en $46,57 \mu\text{m}$.

Na verloop van tijd zal het patroon van de bellen er uit gaan zien als in figuur 5.9. Deze situatie is vanwege beperkingen aan het model niet bereikt.

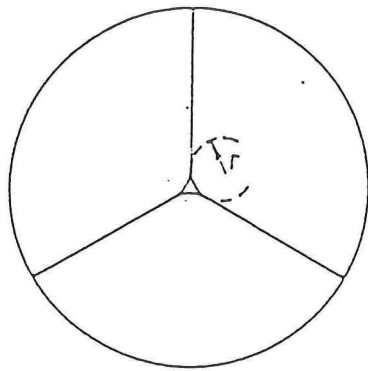
Bij één-dimensionale experimenten met schuim met stikstof bellen in een stikstof omgeving, werd disproportioneerende belangrijker dan diffusie naar de omgeving, nadat de buitenste (grensvlak) bellen verdwenen waren. Bellen binnen in het schuim gingen verdwijnen en bellen die het dichtst bij het grensvlak lagen werden zelfs groter.

§ 5.3.5. Slapper worden van uitgespoten slagroom door de daling van de gasfractie

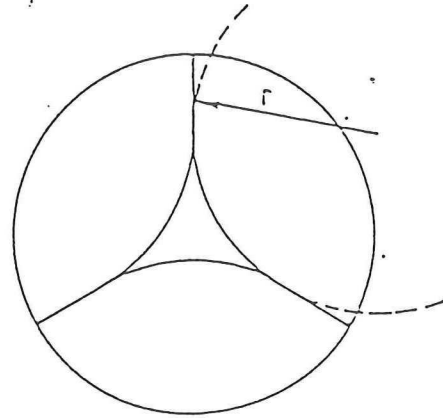
Net uitgespoten slagroom bevat relatief veel gas en weinig vloeistof. De gas/vloeistof verhouding is zo groot dat de gasbellen niet bolvormig (sferisch) maar polyëdrisch zijn, zie figuur 5.10. Ten gevolge van de kromming van de meniscus van de plateauzoom, zie figuur 5.11 (z.o.z.), is de druk van de vloeistof in de plateauzoom lager dan de druk die in de dunne vloeistoffilm en in de schuimbellen heerst. Volgens Laplace is dit drukverschil $P = \gamma/r$, waarin r de kromtestraal van de plateauzoom is. Het resultaat van dit drukverschil is dat de vloeistof vanuit de vloeistoffilmpjes tussen de schuimbellen naar de plateauzoom wordt gezogen, terwijl de deeltjes die door het gasoppervlak zijn aangetrokken achterblijven en elkaar aantrekken en daardoor het schuim een stevige structuur geven.

Naarmate de slagroom inzakt en de gasfractie afneemt, zullen de gasbellen meer en meer bolvormig worden. Daardoor zal het drukverschil tussen vloeistoffilmpje en plateauzoom afnemen en vloeistof uit de plateauzoom terugstromen naar de vloeistoffilmpjes. Als de deeltjes aan het oppervlak geen vast netwerk hebben gevormd, dan zullen de deeltjes weer verder van elkaar komen en zal het schuim z'n stevigheid verliezen.

In het schuim dat uit de huidige spuitbus komt, ontstaat de stevigheid door een netwerk van eiwitten, dat niet vast is, waardoor de stevigheid dus afneemt bij het inzakken van de slagroom.



droog



nat

Figuur 5.11. De plateauzoom in een polyedrisch schuim.

5. Theoretische verklaring

Heeft in het schuim voldoende uitbotering plaatsgevonden, dan is er een vast netwerk ontstaan van vetdeeltjes (in de oppervlakken van eenzelfde of aangrenzende bellen), die aan elkaar geklonterd zijn en het schuim een blijvende stevigheid geven.

6. Conclusies

Het procédé om room te kloppen door de room met gas door een buis met korrels te persen is schaalverkleind van een buis van 90 cm met korrels van 3 mm tot een buis van 1 cm en korrels van 1 mm. Bij die afmetingen kon niet-gehomogeniseerde room met lachgas tot stijve slagroom worden geklopt, maar het inzakken van de slagroom kon niet worden tegengegaan.

Gebleken is dat het stijf worden van slagroom (uitbotering) wordt bevorderd naarmate de gas/vloeistofdebiet verhouding en buislengte toenemen en de korreldiameter afneemt. Het optimum van deze variabelen is begrensd door minimale en maximale waarden. Bij overschrijding van deze uiterste waarde, blijft de slagroom te slap (niet stijf genoeg), wordt de slagroom boterachtig (te stijf) en/of verstopt de buis.

Uitbotering neemt toe naarmate er meer energie gedissipeerd wordt en naarmate het gas/vloeistofoppervlak toeneemt.

Sneller uitboteren bij grotere energiedissipatie hangt samen met grotere schuifkrachten en meer specifiek met grotere snelheidsgradiënten.

Bij het uitspuiten van slagroom door een korrelbuis zullen aan de wand de grootste schuifkrachten optreden. Als de slagroom een homogene stijfheid heeft, dan zal daar de meeste energie per doorstroomd volume gedissipeerd worden. Daardoor botert de slagroom daar ook het snelste uit, wat bij de experimenten blijkt uit de boterlaag die zich op de korrels afzet.

Bij het kloppen van room met een mixer zal een bepaald volume slagroom meer homogeen stijf worden, naarmate de diameter van de mixer groter is.

Daarnaast begrenst de inhomogeniteit zichzelf: naarmate de inhomogeniteit toeneemt, zal de energiedissipatie in stijvere en minder stijve slagroom respectievelijk dalen en stijgen. Dit wordt veroorzaakt door de grotere viscositeit en yield stress van stijvere slagroom t.o.v. minder stijve slagroom.

Sneller uitboteren naarmate er meer gas/vloeistofoppervlak is, dat samenhangt met grotere energiedissipatie, is vooral uit de experimenten gebleken. Bij het gebruik van lachgas, dat veel fijner verdeeld is in de room bij het binnen komen van de spuitkop dan stikstof, is een veel kortere spuitkop (1 cm) nodig dan bij stikstof (minimaal 3 cm). Bij het uitspuiten met stikstof is bovendien een onacceptabel hoge gas/vloeistof verhouding nodig. Bij het uitspuiten met lachgas neemt de uitbotering drastisch toe als bij het binnenkomen van de spuitkop al gas is geëxpandeerd. Dit wordt bevorderd door een drukval voor het intreden van de spuitkop en het schudden voor het uitspuiten, wat de kiemvorming bevordert. Deze drukval en het schudden hebben veel meer invloed dan een grotere druk in de spuitbus, die overigens maatgevend is voor de energiedissipatie over de spuitkop.

Doordat stijve slagroom yield stress heeft, moet er een minimum drukgradiënt (drukval per meter spuitkop) over de spuitkop staan, die toeneemt naarmate de korreldiameter afneemt. Om een spuitbus dus volledig leeg te spuiten, mag de gasdruk bij het uitspuiten niet te ver dalen.

De opslag bij het uitspuiten met lachgas is 170 % met uitschieters naar 240 %, terwijl het uitspuiten met stikstof een opslag gaf van minder dan 100 %. Mogelijk kan verdere

6. Conclusies

optimalisatie van spuitkop de opslag bij uitspuiten met lachgas nog vergroten.

Nadeel van het uitspuiten met lachgas is dat de slagroom inzakt en dit is snelheidsbepalend is bij de achteruitgang van de kwaliteit van het opgeklopte produkt. Na 5 minuten is meer dan de helft van de oorspronkelijke hoeveelheid gas uit de slagroom verdwenen als de slagroom wordt uitgespoten in een mooie rozet met veel oppervlak. Het oppervlak wordt glanzend doordat de drainage het kleiner worden van de bellen niet kan bijhouden.

Het inzakken van met lachgas gespoten slagroom is een gevolg van diffusie van het lachgas van de schuimbellen naar de omgeving. Dit wordt veroorzaakt door enerzijds het grote lachgas concentratieverschil tussen de schuimbellen en de buitenomgeving en anderzijds de goede oplosbaarheid van lachgas in slagroom.

Het tegengaan van het inzakken zal gepaard met een veel minder grote opslag in de geproduceerde slagroom. Het inzakken wordt tegengegaan door af te stappen van een gas met een grote oplosbaarheid in room (lachgas). Daardoor is het niet meer mogelijk om room volgens het expansieprincipe te schuimen. Dan moet worden overgeschakeld op het dispergeerprincipe (waarbij als gas lucht kan worden gebruikt) en het is niet gelukt daarmee slagroom te produceren met hoge opslag.

Tot slot is bij experimenten met room uit Almhof spuitbussen vastgesteld dat daarin uitbotering plaatsvindt, in tegenstelling tot de Coberco Malebic spuitbussen. Daarnaast is de smaak van Almhof slagroom romiger en lekkerder.

7. Aanbevelingen

Om de ontwikkelde spuitkop toe te passen op echte slagroomsputbussen, zal de te gebruiken spuitroom moeten worden aangepast. De stijve slagroom, die met de spuitkop werd geklopt, ging uit van niet-gehomogeniseerde room. De room in slagroomsputbussen is gehomogeniseerde room en daarmee is het niet gelukt om met de ontwikkelde spuitkop stijve slagroom te produceren.

Voor de dimensionering van de spuitkop voor toepassing op echte slagroomsputbussen zullen aanvullende experimenten moeten worden uitgevoerd, waarbij getest moet worden met dezelfde room die in die spuitbussen gebruikt zal worden. Reden is dat de kwaliteit van de uitgespoten slagroom sterk afhankelijk is van de room die gebruikt wordt.

Bovendien zal voor toepassing van de spuitkop de druk in de slagroomsputbus niet te ver mogen dalen, omdat bij te lage druk de resterende room niet meer als stijve slagroom - of in het geheel niet meer - uitgespoten kan worden.

Het is raadzaam de minimum benodigde druk nader te onderzoeken bij de verschillende korrelgrootten.

Om de druk boven het benodigde minimum te houden, zijn er een aantal opties. Een eerste optie is om de initiële druk in de spuitbus voldoende hoog te maken. Een tweede optie is om de drukdaling op te vangen door met een pompje lucht toe te voegen. Daarbij mag de room niet bederven en moet de partiële lachgas druk voldoende groot blijven, zodat voldoende gas expandeert in de spuitkop. Een derde optie is om het lachgas en de room in een folie zak (waar geen gas doorheen kan diffunderen) in de spuitbus te verpakken en de ruimte tussen de folie en de spuitbus te vullen met een vloeistof die een kookpunt heeft van bijv. 6 bar.

Voor verder onderzoek valt te denken aan het controleren van de veronderstelde stromingsmodellen door room in een kom te mixen en op diverse plaatsen tussen de mixer en de kom de schuifspanning te meten op meetstaafjes die in de room worden gestoken. Er kan dan mogelijk een probleem optreden doordat er een vetfilmpje zou ontstaan tussen de staafjes en de room.

Ook valt te denken aan het meten van het drukprofiel in de spuitkop, zodat nagegaan kan worden hoe het schuimings- en uitboteringsproces verloopt.

Een idee dat mogelijk kan worden toegepast in slagroomsputmachines voor bakkers is aangedragen door professor Frens. De aanbeveling is om room en lachgas uit te spuiten in een korrelbuis met hele kleine korrels, waarbij de druk daalt van bijvoorbeeld 8 naar 2 bar. Daarbij zal schuim met een hoge opslag ontstaan en zal uitbotering optreden. Daarna moet de slagroom door een korrelbuis geleid worden met grote korrels, waarbij lucht wordt ingeblazen. Doel hiervan is dat de room z'n hoge opslag zal behouden en dat door het inbrengen van lucht het lachgas wordt vervangen, zodat deze luchtige slagroom niet zal inzakken.

Literatuurlijst

- [1] Bird, R., Stewart, W., Lightfoot, E., *Transport Phenomena*, Madison, 1960.
- [2] van den Boogaard, C., *Slagroom in spuitbussen*. Deventer, 1986. Coberco Research Deventer.
- [3] Dickinson E., Stainsby E., *Advances in food emulsions and foams*, Londen, 1988, 232-251.
- [4] Peter, P., 'Neue Entwicklungen auf dem gebiet der Lebensmittelaerosole'. *Riechstoffe, Aromen, Koerper-pflegemittel* 21 (12) (1971), 454-457.
- [5] Prins, A., Vliet, T. van, Walstra, P., *Inleiding in de levensmiddelen natuurkunde*. Wageningen, 1990.
- [6] Walstra, P., Yellema, *Zuiveltechnologie I*, Wageningen.

the 1990s, the number of people in the UK who are employed in the public sector has increased from 10.5 million to 12.5 million (12% of the population) and the number of people in the private sector has increased from 18.5 million to 20.5 million (20% of the population).

There are a number of reasons why the public sector has grown so rapidly. One reason is that the public sector has become a major employer of people with disabilities. In 1990, there were 1.5 million people with disabilities in the UK, and in 1995, there were 2.5 million people with disabilities in the UK. This increase is due to a number of factors, including the fact that the public sector has become a major employer of people with disabilities.

Another reason why the public sector has grown so rapidly is that the public sector has become a major employer of people with disabilities. In 1990, there were 1.5 million people with disabilities in the UK, and in 1995, there were 2.5 million people with disabilities in the UK. This increase is due to a number of factors, including the fact that the public sector has become a major employer of people with disabilities.

A third reason why the public sector has grown so rapidly is that the public sector has become a major employer of people with disabilities. In 1990, there were 1.5 million people with disabilities in the UK, and in 1995, there were 2.5 million people with disabilities in the UK. This increase is due to a number of factors, including the fact that the public sector has become a major employer of people with disabilities.

A fourth reason why the public sector has grown so rapidly is that the public sector has become a major employer of people with disabilities. In 1990, there were 1.5 million people with disabilities in the UK, and in 1995, there were 2.5 million people with disabilities in the UK. This increase is due to a number of factors, including the fact that the public sector has become a major employer of people with disabilities.

A fifth reason why the public sector has grown so rapidly is that the public sector has become a major employer of people with disabilities. In 1990, there were 1.5 million people with disabilities in the UK, and in 1995, there were 2.5 million people with disabilities in the UK. This increase is due to a number of factors, including the fact that the public sector has become a major employer of people with disabilities.

A sixth reason why the public sector has grown so rapidly is that the public sector has become a major employer of people with disabilities. In 1990, there were 1.5 million people with disabilities in the UK, and in 1995, there were 2.5 million people with disabilities in the UK. This increase is due to a number of factors, including the fact that the public sector has become a major employer of people with disabilities.

A seventh reason why the public sector has grown so rapidly is that the public sector has become a major employer of people with disabilities. In 1990, there were 1.5 million people with disabilities in the UK, and in 1995, there were 2.5 million people with disabilities in the UK. This increase is due to a number of factors, including the fact that the public sector has become a major employer of people with disabilities.

A eighth reason why the public sector has grown so rapidly is that the public sector has become a major employer of people with disabilities. In 1990, there were 1.5 million people with disabilities in the UK, and in 1995, there were 2.5 million people with disabilities in the UK. This increase is due to a number of factors, including the fact that the public sector has become a major employer of people with disabilities.

Bijlage 1: Simulatieprogramma van gasdiffusie

Het simulatieprogramma is geschreven in Turbo Pascal.

```
program diff2d (input,output);
const n=8;m=8;integr=10;deltatijd=1;pi=3.1415;rg=8.314;
      t=298;p=1e5;sigma=40e-3;r0=50e-6;opslag0=100;
      z0=1;z1=0;w=0.16;z=z0+w*z1;      {bij gegeven t en p}
      opl=1.759;diff=2.11e-9;psat=49e5;vmol=z*rg*t/p;
      pbuiten=0;cbuiten=opl*(pbuiten/(z*rg*t));
type rij1=array[1..n,1..m] of real;
      rij2=array[1..n,1..m] of real;
      rij3=array[1..n,1..m] of real;
      rij4=array[1..m] of integer;
      rij10=array[1..n+1] of real;
      rij11=array[1..m] of real;
      rij12=array[1..n,1..m] of real;
      rij13=array[1..n] of real;
var c:rij1;r:rij2;rnieuw:rij3;
      a:rij4;x:rij10;y:rij11;
      volgasperelement:rij12;volgasperkolom:rij13;
      vgas0,totaalvolgas,opslag,vvloei,tijd,kA,phi:real;
      totaalhoog,breedkolom,totaalbreed,dortho,ddia:real;
      algemeen:integer;

procedure beginwaarden (var r:rij2; var a:rij4;var totaalhoog,breedkolom,dortho,ddia:real;
                        var x:rij10; var y:rij11;var algemeen:integer);
var i,j:integer;
begin
  vgas0:=0;aalgemeen:=0;
  for j:=1 to m do
  begin
    writeln;
    a[j]:=0;
    for i:=1 to n do
    begin
      r[i,j]:=r0;r[4,4]:=1.3*r0;
      write ((r[i,j]*1e6):6:2,' ');
      vgas0:=vgas0+pi*exp(2*ln(r[i,j]));
    end;
  end;
  vvloei:=vgas0*100/opslag0;
  totaalhoog:=exp(0.5*ln(vgas0+vvloei));
  breedkolom:=(vvloei+vgas0)/(totaalhoog*n);

  for j:=1 to m do
  begin
    y[j]:=(totaalhoog/m)*(j-0.5);
  end;

  for i:=1 to n+1 do
  begin
    x[i]:=breedkolom*(i-0.5);
  end;

  dortho:=breedkolom;
  ddia:=breedkolom*exp(0.5*ln(2));
```

Bijlage 1. Simulatieprogramma van gasdiffusie

```
end;

procedure volgas (var volgasperelement:rij12;var totaalvolgas,opslag:real;var a:rij4);
var i,j:integer;
begin
  totaalvolgas:=0;
  for j:=1 to m do
  begin
    for i:=1 to n-a[j] do
      begin
        if r[i,j]>0 then volgasperelement[i,j]:=pi*exp(2*ln(r[i,j])) else
          else volgasperelement[i,j]:=0;
          totaalvolgas:=totaalvolgas+volgasperelement[i,j];
        end;
        if volgasperelement[n-a[j],j]=0 then a[j]:=a[j]+1;
      end;
    opslag:=100*totaalvolgas/vvloei;
  end;
end;

procedure rekenaalgemeen(var aalgemeen:integer);
var j,ahelp:integer;
begin
  ahelp:=n;
  for j:=1 to m do
  begin
    if a[j]<ahelp then ahelp:=a[j];
  end;
  aalgemeen:=ahelp;
end;

procedure breed(var totaalbreed:real);
begin
  totaalbreed:=(vvloei+totaalvolgas)/totaalhoog;
end;

procedure verandering (var rnieuw:rij3);
var i,j,s,v,w:integer;dmin,d,d1,d2,k0,k1,k2,k3,ka,phi,deltavol,vol:real;
begin
  for j:=2 to m-1 do
  begin
    for i:=2 to n do
    begin
      deltavol:=0;
      for s:=1 to 9 do
      begin
        if s=1 then begin v:=i-1;w:=j-1;end;
        if s=2 then begin v:=i-1;w:=j;end;
        if s=3 then begin v:=i-1;w:=j+1;end;
        if s=4 then begin v:=i;w:=j-1;end;
        if s=5 then begin v:=i;w:=j+1;end;
        if s=6 then begin v:=i+1;w:=j-1;end;
        if s=7 then begin v:=i+1;w:=j;end;
        if s=8 then begin v:=i+1;w:=j+1;end;
        if ((i=n) and (s>5)) then v:=0;
        d1:=ddia-r[i,j];d2:=dortho-r[i,j];
        if ((s=1) or (s=3) or (s=6) or (s=8)) and (v>0) then
          dmin:=d1-r[v,w] else if (v>0) then dmin:=d2-r[v,w];
      end;
    end;
  end;
end;
```

Bijlage 1. Simulatieprogramma van gasdiffusie

```

if ((dmin<0) and (i<(n-a[j]))) then write(i,j,' ');
if ((s=9) and (i=n-a[j])) then dmin:=totaalbreed-x[n-a[j]]-r[n-a[j]]
kA:=0;
if (v>0) then if ((r[i,j]>0) and (r[v,w]>0) and (s<9)) then
begin
  if r[i,j]<r[v,w] then k0:=r[i,j] else k0:=r[v,w];
  k1:=k0/(2*integr);
  while k1<k0 do
  begin
    k2:=exp(0.5*ln(exp(2*ln(r[v,w]))-exp(2*ln(k1))));
    k3:=exp(0.5*ln(exp(2*ln(r[i,j]))-exp(2*ln(k1))));
    d:=dmin+(r[v,w]-k2)+(r[i,j]-k3);
    kA:=kA+(diff/d)*k0/integr;
    k1:=k1+k0/integr;
  end;
  kA:=kA*2;
  phi:=kA*(c[i,j]-c[v,w]);
end else phi:=0 else phi:=0;

if ((s=9) and (i=n-a[j]) and (r[i,j]>0)) then
begin
  k1:=r[i,j]/(2*integr);kA:=0;
  while k1<r[i,j] do
  begin
    k2:=exp(0.5*ln(exp(2*ln(r[i,j]))-exp(2*ln(k1))));
    d:=dmin+(r[i,j]-k2);
    kA:=kA+(diff/d)*r[i,j]/integr;
    k1:=k1+r[i,j]/integr;
  end;
  kA:=kA*2;
  phi:=kA*(c[i,j]-cbuiten);
end;

deltavol:=deltavol-vmol*phi*deltatijd;
end;
if r[i,j]>0 then vol:=(pi*exp(2*ln(r[i,j])))deltavol else vol:=0;
if vol>0 then rnieuw[i,j]:=exp(0.5*ln(vol/pi)) else rnieuw[i,j]:=0;
end;
end;
end;

procedure concentratie (var c:rij1);
var i,j:integer;
begin
  for j:=1 to m do
  begin
    for i:=1 to n do
    begin
      if r[i,j]>0 then c[i,j]:=opl*((p+sigma/r[i,j])/(z*rg*t)) else c[i,j]
      end;
    end;
  end;
end;

procedure straal (var r:rij2);
var i,j:integer;
begin
  for j:=2 to m-1 do

```

Bijlage 1. Simulatieprogramma van gasdiffusie

```
begin
  writeln;
  for i:=2 to n do
    begin
      r[i,j]:=rnieuw[i,j];
      write((r[i,j]*1e6):6:2,' ');
    end;
  end;
  writeln;

  for j:=1 to m do
    begin
      r[1,j]:=r[2,j];
    end;

    for i:=1 to n do
      begin
        r[i,1]:=r[i,2];
        r[i,m]:=r[i,m-1];
      end;
    end;

begin {hoofdprogramma}
  tijd:=0;writeln;writeln('tijd=',tijd:5:2,' ');
  beginwaarden (r,a,totaalhoog,breedkolom,dortho,ddia,x,y,aalgemeen);
  writeln;
  while n>(aalgemeen+2) do
    begin
      volgas (volgasperelement,totaalvolgas,opslag,a);
      tijd:=tijd+deltatijd;writeln;writeln;writeln('tijd=',tijd:5:2,' ');
      rekenaalgemeen(aalgemeen);
      breed(totaalbreed);
      concentratie(c);
      verandering(rnieuw);
      straal (r);
    end;
  writeln('druk getal en enter');read(vgas0);
end.
```

Bijlage 2. Beschrijving meetseries

Deze bijlage geeft een gedetailleerde beschrijving van de 29 uitgevoerde meetseries, waarvan er verscheidene ook weer onderverdeeld zijn.

Meetserie 1 - Verkennende metingen met korrelbuis en room/stikstof stroom 1

Korrelbuis: lengte : 10 cm - 25 cm - 40 cm
korreldiameter : ± 2 mm

Gas : stikstof
Druk voorraadvat : circa 9 bar

Waarnemingen: Het bleek mogelijk om met zowel de 10 cm buis als de 40 cm buis stijve slagroom te produceren.

Bij 10 cm buis was een grote gas/vloeistofdebiet verhouding nodig om stijve slagroom te produceren, waardoor de stroom gaat sputteren.

De stroom is niet stationair, vermoedelijk door het relatief grote gasdebiet. Een prop lucht wordt afgewisseld met een prop slagroom. Het lijkt er op dat een soort verstopping optreedt, waardoor de gasdruk stijgt, tot de druk groot genoeg is om de slagroom er uit te persen.

Door een stuk korrelbuis met kijkglas is channelvorming van het gas waargenomen.

Bij de 40 cm buis was de uitkomende stroom meer boter dan slagroom.

Meetserie 2 - Verkennende metingen met korrelbuis en room/stikstof stroom 2

Korrelbuis: lengte : 10 cm - 25 cm
korreldiameter : ± 3 mm

Gas : stikstof
Druk voorraadvat : circa 9 bar

Waarnemingen: Het kloppen van room ging minder goed, vermoedelijk ook omdat de gebruikte room over was gebleven van meting 1 en in de ijskast 's nachts voor een deel bevroren was. Daardoor treedt rebodding van de room op waardoor die niet of minder stijf te kloppen is.

Bij de 10 cm buis was het niet mogelijk stijve slagroom te produceren. Bij hoger gasdebiet ging de stroom sputteren.

Meetserie 3 - Verkennende metingen met korrelbuis en room/stikstof stroom 3

Korrelbuis: lengte : 10 cm - 20 cm - 25 cm - 30 cm - 40 cm
korreldiameter : ± 2 mm en ± 3 mm

Gas : stikstof
Druk voorraadvat : circa 9 bar, circa 9,5 bar

Waarnemingen: Meting 1: (25 cm buis, 2 mm korrels, 8,5 bar drukval) Er wordt stijve slagroom met weinig opslag geproduceerd. De stroom sputtert niet, komt er als een continue stroom uit, maar wel onregelmatig.

Poging om een rotameter te gebruiken om het gasdebiet te meten is niet succesvol, want de aanwijzing zit in de onderste 5 % van het meetbereik en fluctueert.

Meting 2: (10 cm buis, 3 mm korrels, 8 bar drukval) De slagroom is wel iets stijver dan bij meetserie 2 met dezelfde korrelbuis, maar niet echt stijf. De stroom sputtert in alle gevallen.

Meting 3: (20 cm buis, 3 mm korrels, 8 bar drukval) Mooie stijve slagroom met sputterende stroom.

Meting 4: (30 cm buis, 3 mm korrels, 8 bar drukval) Het is mogelijk een continue schoksgewijze stroom te krijgen. Bij verhoging van het gasdebiet gaat de stroom sputteren en ontstaat batchgewijs slagroom, die te ver is uitgeboterd.

Meting 5: (40 cm buis, 3 mm korrels, 8 bar drukval) Uitstromende slagroom kan worden gevarieerd van vloeibare room tot boter, met respectievelijk een lager en een hoger gasdebiet.

Meetserie 4 - Verkennende metingen met korrelbuis en room/stikstof stroom 4

Korrelbuis: lengte : 10 cm - 15 cm - 25 cm
korreldiameter : 1 mm

Gas : stikstof
Druk voorraadvat : circa 9,5 bar, circa 10 bar

Waarnemingen: Bij een korrelbuislengte van 10 cm en een drukval van 9 bar kon de uitkomende stroom gevarieerd worden van vloeibare tot goede stijve slagroom.

Bij een korrelbuislengte van 15 cm en een drukval van 8,5 bar treedt verstopping van de korrelbuis op. Waarschijnlijk omdat door de lagere

drukval per meter te klein is om de yield stress te overwinnen.

Bij een buislengte van 25 cm en een drukval van 9 bar verstopt de buis eveneens.

Meetserie 5 - Verkennende metingen met korrelbuis en room/stikstof stroom 5

Korrelbuis: lengte : 3,4 cm en 2,1 cm
korreldiameter : 1 mm

Gas : stikstof
Druk voorraadvat : 9 - 10 bar

Bij deze metingen is in een 10 cm buis de lengte van het korrelbed kleiner gemaakt door een deel van de buis op te vullen met een veer. In plaats van gaas op de twee uiteinden, zat nu het ene gaas op een uiteinde en het andere gaas op het uiteinde van de veer.

Waarnemingen: Bij een korrelbedlengte van 3,4 cm was het mogelijk goede stijve slagroom te produceren. Bij een korrelbedlengte van 2,1 cm was de slagroom niet echt goed stijf.

Meetserie 6 - Testen meetmethoden 1

Methode om het botergehalte te bepalen

Coberco heeft de methode aangegeven om een maat voor het botergehalte in geklopte slagroom te bepalen: 20 gram geklopte slagroom oplossen in 180 gram water van 65 °C en na 10 minuten het volume van de vetfase bepalen die op de waterfase drijft.

Deze methode is uitgetest door bij één kraaninstelling van het vloeistofdebiet bij twee verschillende gasdebieten met de korrelbuis room te kloppen. Bij beide gasdebieten is tweemaal een monster genomen.

Helaas bleek bij alle 4 de metingen de gele vetlaag 8 ml groot te zijn, ofwel 0,4 ml vet per gram slagroom. Dit komt over een met het vetgehalte van slagroom, 40 %.

Om dit goed te kunnen bepalen is speciaal glaswerk gemaakt: een erlenmeyer met daarop het buisje gesmolten van een maatcilinder met milliliter verdeling. Het volume van de erlenmeyer werd gebruikt om het grote volume water op te vangen en met de milliliterverdeling kon de bovenliggende vetlaag gemeten worden.

Als blanco werd van ongeklopte room het botergehalte bepaald. Er bleek geen vetfase gevormd te worden.

Omdat de precieze uitvoering van deze meetmethode veel tijd kost (bijv. precieze weging

20 gram slagroom en 180 gram water), is steeds een min of meer willekeurige hoeveelheid slagroom gewogen en opgelost in een willekeurige hoeveelheid water van 65 °C. De oplossing werd op 65 °C gehouden in een thermostaatbad en na 10 à 20 minuten het botergehalte werd bepaald.

Wel bleek dat als de oplossing uit het thermostaat bad werd gehaald de bepaling meteen moest worden uitgevoerd, omdat door afkoeling na 2 minuten al een volumedaling optrad van 5 %.

Verdere onnauwkeurigheid trad op doordat zich kristalletjes vormden in de vetlaag.

Meetserie 7 - Testen meetmethoden 2

Methode om opslag te bepalen

Coberco heeft de methode aangegeven om de opslag te bepalen: een bekend volume vullen met slagroom, de gewichtstoename meten en daaruit de opslag bepalen:

$$\begin{aligned} \text{opslag} &= \frac{V_{\text{gas}}}{V_{\text{vloeibare room}}} * 100\% = \frac{V_{\text{slagroom}} - V_{\text{vloeibare room}}}{V_{\text{vloeibare room}}} * 100\% = \\ &= \frac{V_{\text{slagroom}} - \frac{m_{\text{slagroom}}}{\rho_{\text{vloeibare room}}}}{\frac{m_{\text{slagroom}}}{\rho_{\text{vloeibare room}}}} * 100\% \end{aligned}$$

waarin $\rho_{\text{vloeibare room}}$ = dichtheid room
 m_{slagroom} = massa opgeklopte slagroom
 V_{gas} = volume gas in opgeklopte slagroom
 V_{slagroom} = volume opgeklopte slagroom
 $V_{\text{vloeibare room}}$ = volume vloeibare/vaste room in opgeklopte slagroom

De opslag bleek wel betrouwbaar gemeten te kunnen worden door 2,5 cm lange buisjes (gele PVC elektriciteitsbuis) in de slagroom te steken, af te strijken, de gewichtstoename te meten en bovenstaande formule te gebruiken.

Dit is getest door van 12 monsters de opslag te meten: van twee slagroom produkties werden van elk 3 monsters met de PVC buisjes en 3 monsters met grotere buisjes.

De afmetingen van de buisjes zijn:

- PVC buisjes: diameter: 1,4 cm
 lengte: 2,5 cm

- Grotere buisjes: diameter: 2,1 cm
 lengte: 4,5 cm

De gemeten opslagen zijn bij de eerste slagroom productie:

PVC buisjes:	60,5 %	61,5 %	63,0 %
Grotere buisjes:	58,7 %	60,7 %	61,7 %

De gemeten opslagen zijn bij de tweede slagroom productie:

PVC buisjes:	62,9 %	64,7 %	66,6 %
Grotere buisjes:	61,9 %	63,4 %	65,2 %

Deze meting geeft aan dat de opslag metingen relatief nauwkeurig zijn. De grootste en kleinste meetwaarde schelen 6 % en het gemiddelde van de PVC buisjes wijkt maar 2 % af van het gemiddelde van de grotere buisjes.

Meting met twee soorten buisjes is gedaan om de metingen op structurele afwijkingen te controleren.

Vergeleken met de variatie van de opslag die in de werkelijke opslag kan optreden, als gevolg van procesomstandigheden, is de variatie in de metingen met de PVC buisjes relatief klein.

Voor de opslag meting is de dichtheid van room bepaald op 1,06 kg/l. Dit is gemeten door een kwart liter koude room te wegen.

Meetserie 8 - Testen meetmethoden 3

Methode om het vloeistofdebiet te bepalen

Gepoogd is het vloeistofdebiet te bepalen met een magnetische vloeistofdebiet meter, wat niet is gelukt. De meter was nog nooit onder druk gebruikt en de drukbestendigheid van de meter is op risico en verzoek van de fabrikant getest. Het apparaat bleek daar niet tegen te kunnen: er is vocht via de elektroden de meetapparatuur ingelekt, waardoor de nullijn verliep.

Ook is geprobeerd met een rotameter het debiet te meten, wat eveneens niet gelukt is.

De beste methode bleek het vullen van een bekersglas met de uitgaande slagroom stroom tijdens een gemeten tijdsduur en de massatoename van het bekersglas te wegen. De benodigde tijdsduur varieerde tussen de 15 en 60 seconden, afhankelijk van de grootte van het vloeistofdebiet en de meetomstandigheden.

Meetserie 9 - Metingen met korrelbuis en room/stikstof stroom 1

Korrelbuis: lengte : 10 cm
korreldiameter : 1,8 mm

Gas : stikstof
Druk voorraadvat : 9 bar

Vloeistofdebiet (ml/s) : 1,5 tot 3,5 (vaste kraanstand)
Gasdebiet (ml/s bij 1 bar) : 10 - 20 - 30 - 40 (ingesteld)

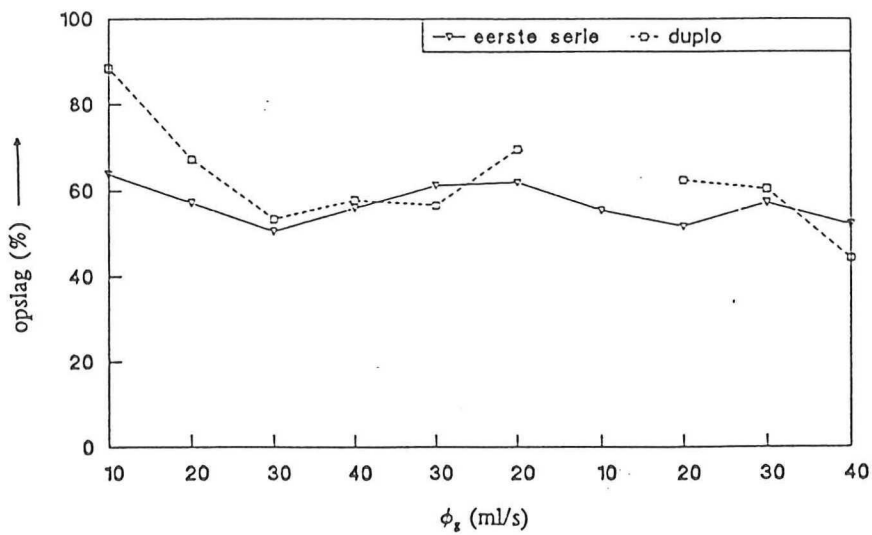
Deze serie, waarbij voor het eerst gasmetingen konden worden gedaan, is in duplo uitgevoerd en het gasdebiet is gevarieerd bij een ingestelde kraanstand van het vloeistofdebiet.

Het gasdebiet is telkens in stappen van 10 ml/s gevarieerd van 10 ml/s naar 40 ml/s, weer terug naar 10 ml/s en weer terug naar 40 ml/s. De meetserie was een continu proces, waarbij het gasdebiet werd veranderd terwijl de room bleef doorstromen.

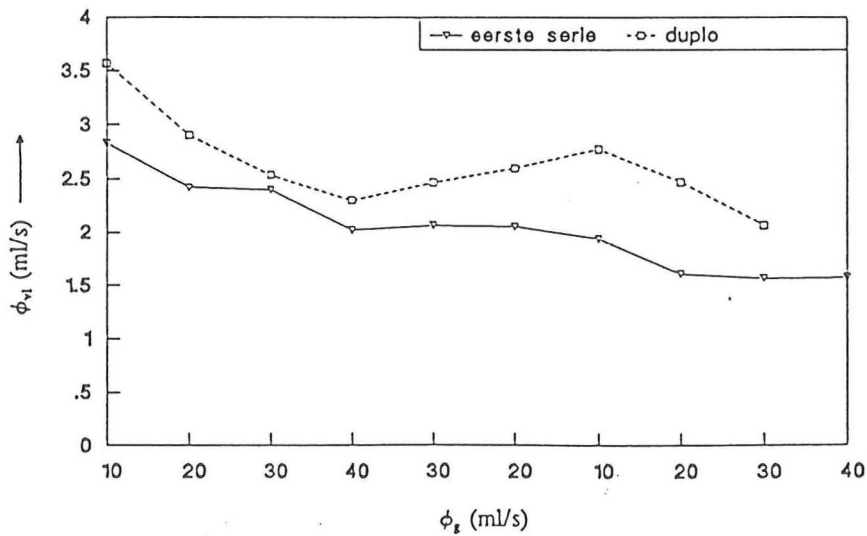
Bij identieke instellingen werd bij de eerste meetserie stijvere slagroom geproduceerd dan bij de tweede meetserie. Bij de tweede meetserie moest meer gas worden toegevoerd om even stijve slagroom te produceren.

Verdere meetgegevens staan in de figuren B2.9.opslag, B2.9. ϕ_{vl} , B2.9.boter, B2.9. ϕ_{gas}/ϕ_{vl} en B2.9.overmaat gas.

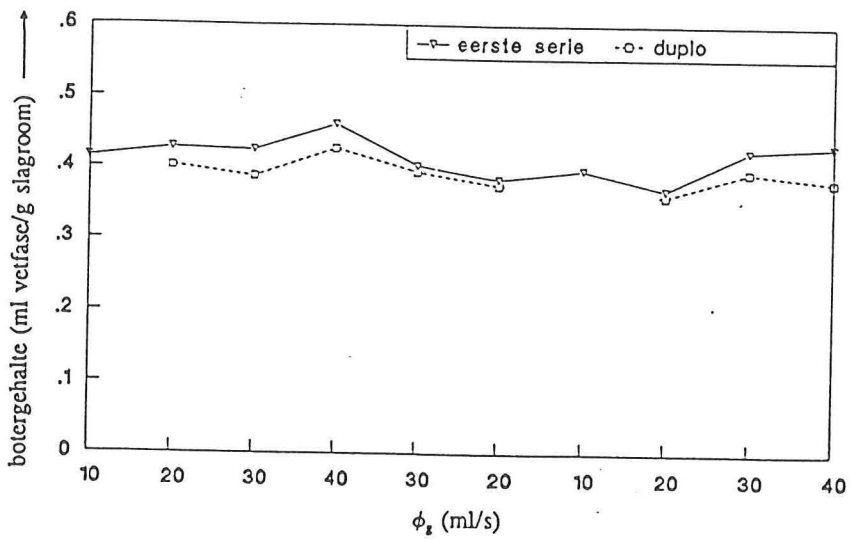
- Conclusies:
- Verstoringen hebben grote invloed op de kwaliteit van het opgeklopt produkt. Bij het vloeistofdebiet en de opslag zijn de afwijkingen tussen verschillende series zijn groter dan de gevolgen van veranderingen van de instelparameters. Binnen eenzelfde meetserie kan de invloed van veranderingen wel bekeken worden.
 - Het botergehalte bereikte bij alle metingen de maximale 0,4 ml vet/g slagroom, ondanks dat de slagroom niet elke keer stijf was.
 - De minimum gas/vloeistofdebiet verhouding om stijve slagroom te maken is erg groot, circa 4, en afhankelijk van de roomkwaliteit.
 - De opslag blijkt te dalen als er al stijve slagroom wordt geproduceerd en het gasdebiet verder wordt verhoogd. Bij de minimum gas/vloeistofdebiet verhouding komt relatief het meeste gas in de slagroom terecht, 30 % van de toevoer.
 - Het vloeistofdebiet daalt als het gasdebiet toeneemt en daalt ook door verstopping. De daling van het vloeistofdebiet is een gevolg van de hogere drukval over het korrelbed.



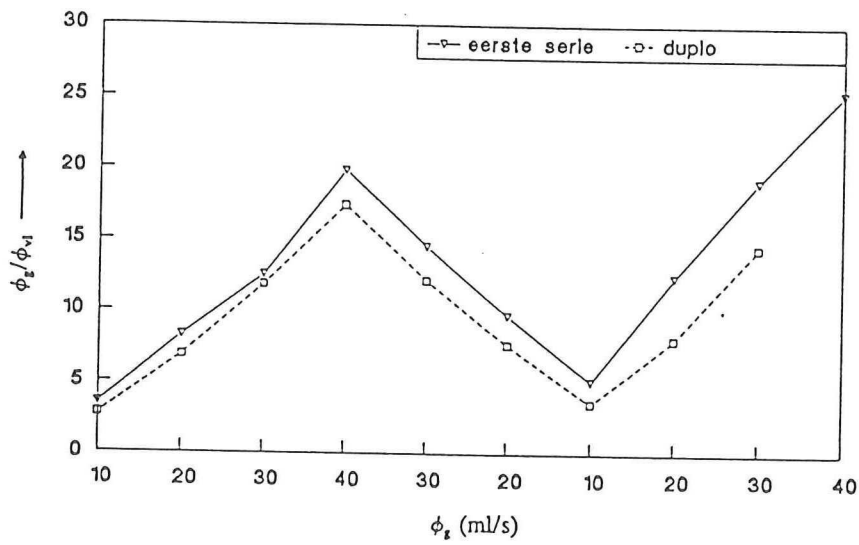
Figuur B2.9. opslag. De opslag van de slagroom bij meetserie 9.



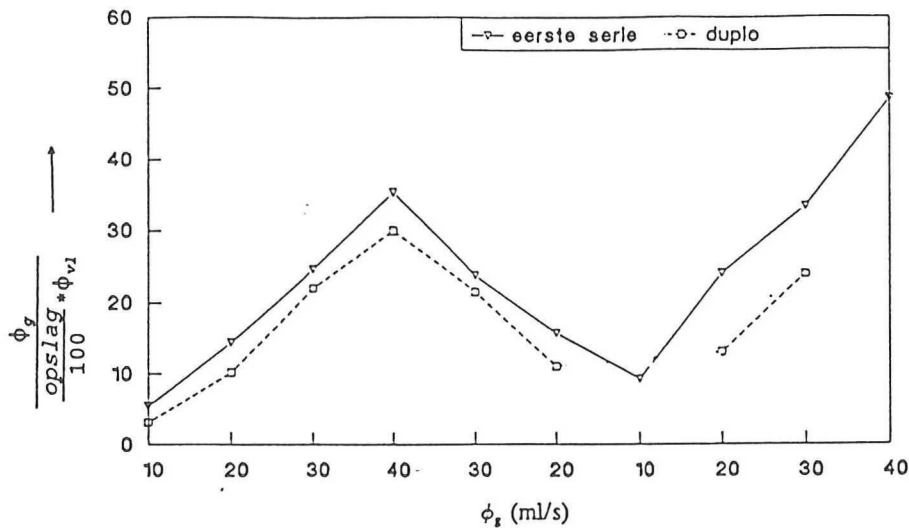
Figuur B2.9. ϕ_{vl} . Het vloeistofdebiet bij meetserie 9.



Figuur B2.9.boter. Het botergehalte van de slagroom bij meetserie 9.



Figuur B2.9. ϕ_{gas}/ϕ_{vl} . De gas/vloeistofdebiet verhouding bij meetserie 9.



Figuur B2.9. overmaat gas. De overmaat gas bij meetserie 9.

Meetserie 10 - Metingen met korrelbuis en room/stikstof stroom 2

Korrelbuis: lengte : 10 cm - 3,7 cm
 korreldiameter : 1 mm

Gas : stikstof
 Druk voorraadvat : 9 bar

Vloeistofdebiet (ml/s) : verstopping en ± 3 (vaste kraanstand)
 Gasdebiet (ml/s bij 1 bar) : ingestelde waarden tussen 10 en 70

Gepoogd is om met dezelfde vloeistofkraanstand als bij meetserie 9 met dezelfde 10 cm buis, maar gevuld met 1 mm korrels (i.p.v. 1,8 mm korrels) te meten. Dat is mislukt omdat de korrelbuis verstopte.

Vervolgens is op dezelfde wijze als bij meetserie 5 het korrelbed verkort tot 3,7 cm en met 1 mm korrels en andere vloeistofkraaninstelling gemeten.

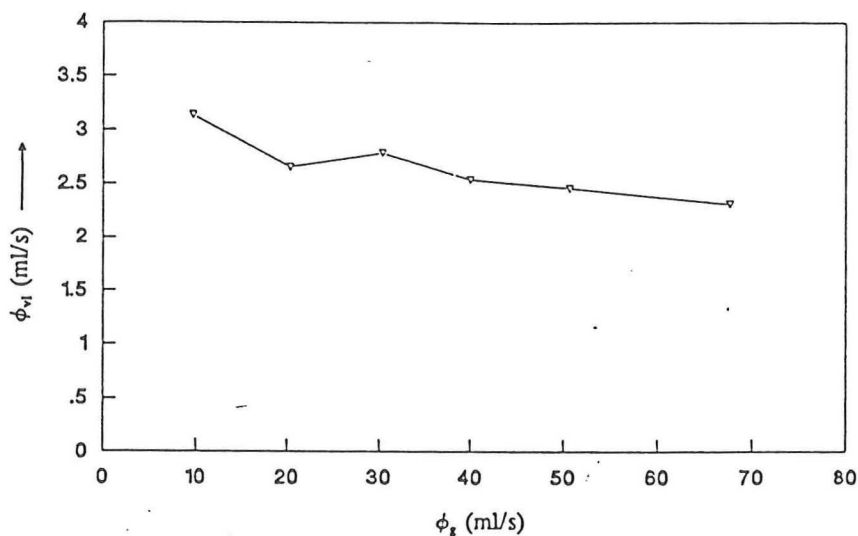
Zelfs bij zeer hoge gasdebieten werd er geen stijve slagroom geproduceerd. Er trad bij de botergehalte bepaling geen duidelijke scheiding op tussen vetfase en vloeistoffase.

Verdere meetgegevens staan in de figuren B2.10. ϕ_{v1} , B2.10.boter en B2.10. ϕ_{gas}/ϕ_{v1} . Het meten van de opslag was niet mogelijk.

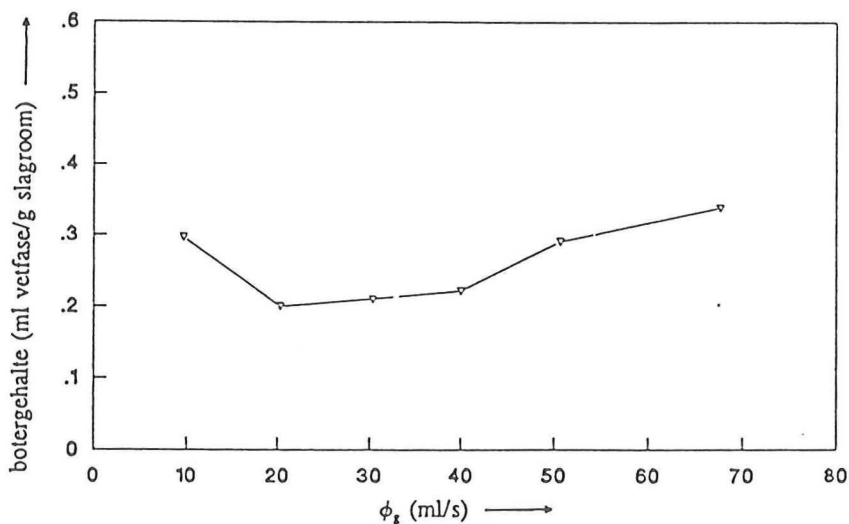
Het botergehalte in figuur B2.10.boter geeft bij een gasdebiet van 9,7 ml/s een hoger botergehalte dan bij 20, 30 en 40 ml/s. Dit is veroorzaakt door instelproblemen. Na het openen van de draaikraan voor de gastoevoer moet de gasflowmeter/regelaar zich instellen. Daardoor is bij het opstarten even een groot gasdebiet door de korrelbuis gegaan.

Vermoedelijk is daardoor botervorming opgetreden die vertraagd in de uitgaande stroom terecht is gekomen.

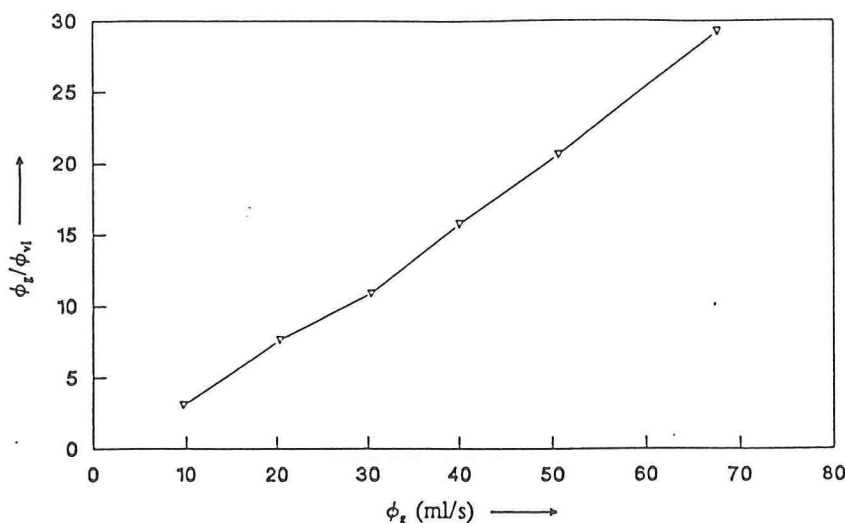
- Conclusie:
- Verstopping van korrelbuis kan worden tegengegaan door de korrelbuis korter te maken
 - Botervorming treedt ook in zeer slappe slagroom op, waarbij niet noodzakelijk het maximale botergehalte wordt bereikt. Bij slappe slagroom is geen duidelijk grensvlak tussen vetfase en waterfase bij de boterbepaling.



Figuur B2.10. ϕ_{vl} . Het vloeistofdebiet bij meetserie 10.



Figuur B2.10.boter. Het botergehalte van de slagroom bij meetserie 10.



Figuur B2.10. ϕ_{gas}/ϕ_{vl} . De gas/vloeistofdebiet verhouding bij meetserie 10.

Meetserie 11 - Metingen met korrelbuis en room/stikstof stroom 3

Korrelbuis: lengte : 7,5 cm
 korreldiameter : 1 mm

Gas : stikstof
 Druk voorraadvat : 9 bar

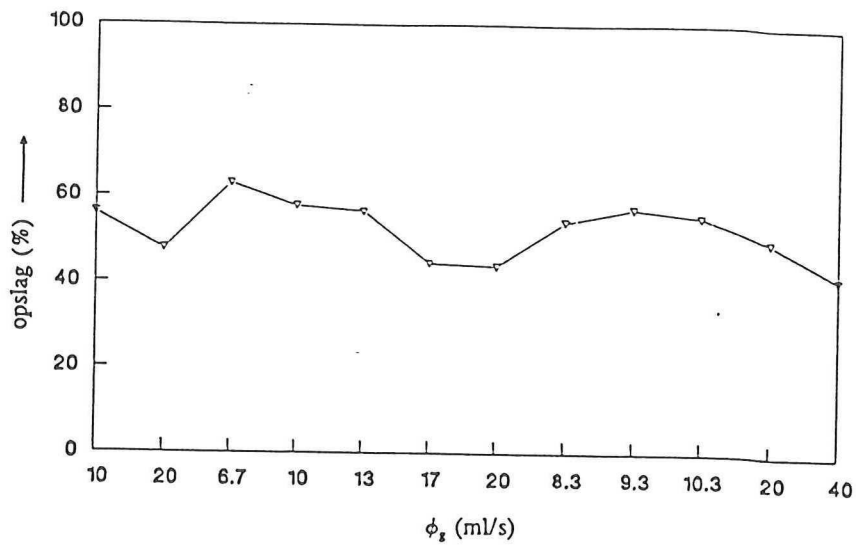
Vloeistofdebiet (ml/s) : 0,5 tot 1 ml/s (vaste kraanstand)
 Gasdebiet (ml/s bij 1 bar) : ingestelde waarden tussen 6 en 40

Deze resultaten meetserie zijn vergelijkbaar met de resultaten van meetserie 9, voor wat betreft de daling van de opslag bij te groot gasdebiet, de maximale botervorming en de daling van het vloeistofdebiet.

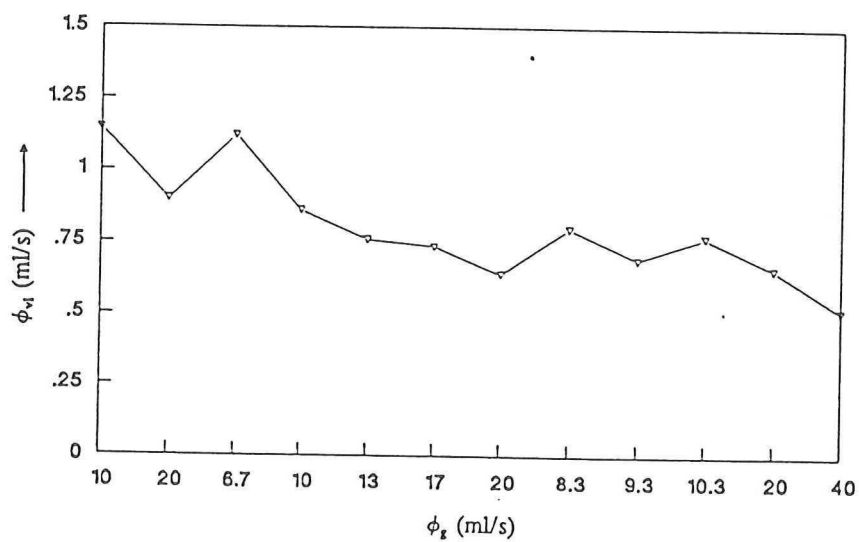
Daarnaast bleek dat er een opslag stijging optrad bij stijging van het gasdebiet als dat debiet net voldoende was om stijve slagroom te produceren (de kom met slagroom kon onderste boven gehouden worden zonder wegvloeien van slagroom). Deze opslag stijging trad op bij een gasdebiet stijging van 8,3 naar 9,3 ml/s.

Verdere meetgegevens staan in de figuren B2.11.opslag, B2.11. ϕ_{vl} , B2.11.boter, B2.11. ϕ_{gas}/ϕ_{vl} en B2.11.overmaat gas.

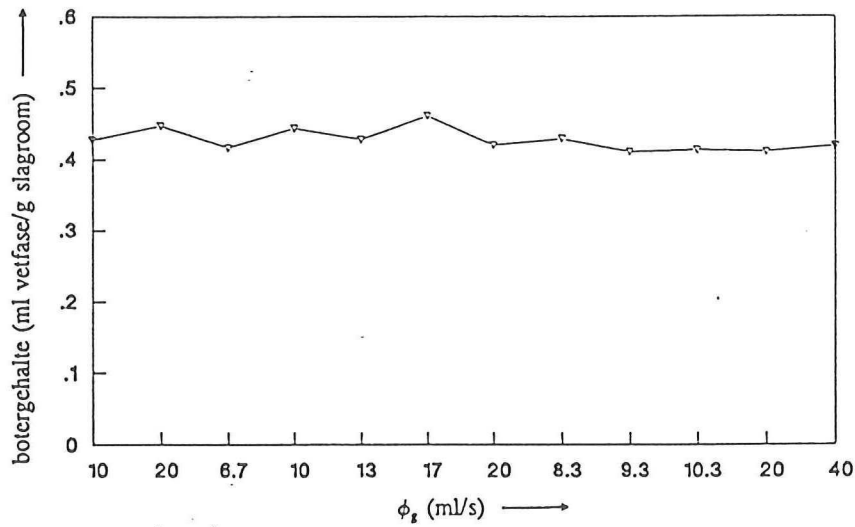
Conclusie: - Vergelijkbare resultaten als bij meetserie 9, voor wat betreft de daling van opslag bij te groot gasdebiet, de maximale botervorming en de daling van het vloeistofdebiet.
 - Stijging van de opslag bij het vergroten van het gasdebiet als dat debiet net voldoende was om stijve slagroom te produceren



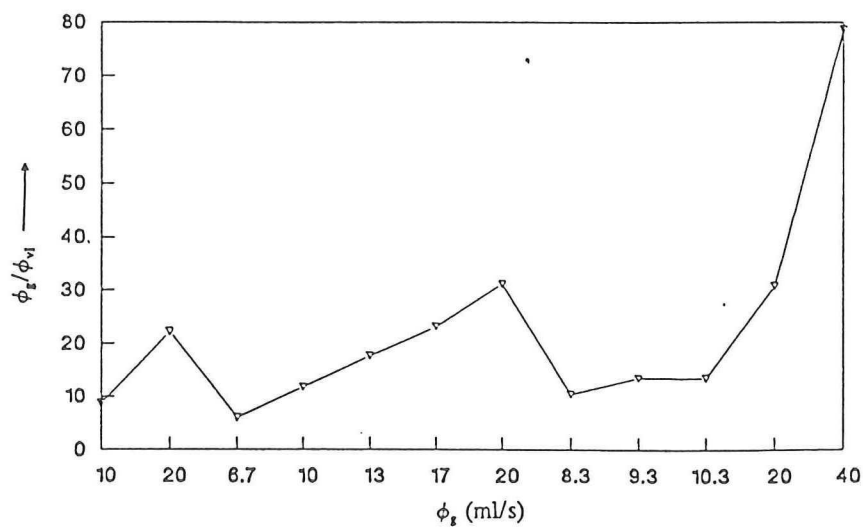
Figuur B2.11. opslag. De opslag van de slagroom bij meetserie 11.



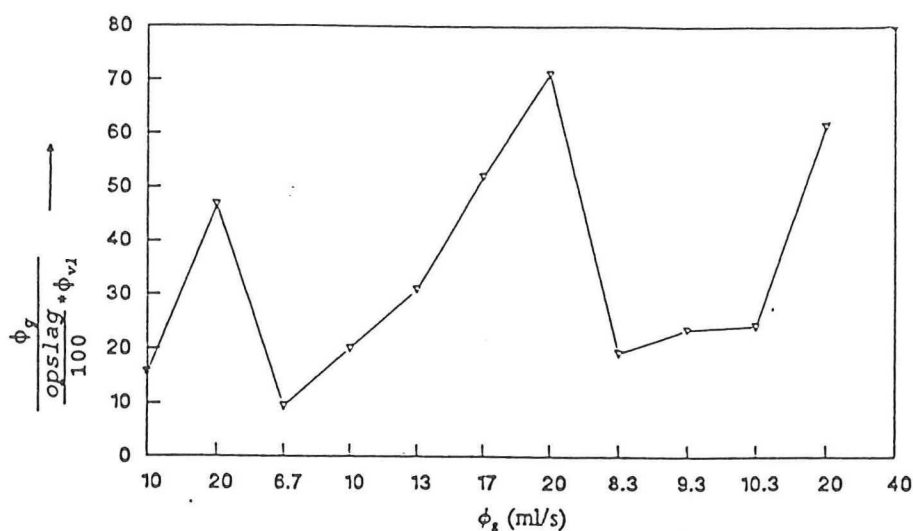
Figuur B2.11. ϕ_{v1} . Het vloeistofdebiet bij meetserie 11.



Figuur B2.11.boter. Het botergehalte van de slagroom bij meetserie 11.



Figuur B2.11. ϕ_{gas}/ϕ_{vl} . De gas/vloeistofdebiet verhouding bij meetserie 11.



Figuur B2.11. overmaat gas. De overmaat gas bij meetserie 11.

Meetserie 12 - Metingen met korrelbuis en room/stikstof stroom 4

Korrelbuis: lengte : 5,4 cm
 korreldiameter : 1 mm

Gas : stikstof
 Druk voorraadvat : 9 bar

Vloeistofdebiet (ml/s) : 2,4 ml/s tot dichtslippen (vaste kraanstand)
 Gasdebiet (ml/s bij 1 bar) : ingestelde waarden tussen 10 en 53

Deze meetserie is in feite een combinatie van 3 meetseries en is gedaan om het teruglopen van het vloeistofdebiet in de tijd te onderzoeken.

De eerste serie is uitgevoerd met een gasdebiet van 40 ml/s. De tweede en derde serie waren duplo's. Die series zijn gestart met 30 seconden een gasdebiet van 53 ml/s en vervolgens een debiet van 10 resp. 23 resp 40 ml/s.

Bij de metingen was meestal een insteltijd van circa 20 seconden nodig. Elke vloeistofdebiet meting werd over een tijdsduur van 15 tot 60 seconden genomen. Het geregistreerde meettijdstip is halverwege de meting.

De meetgegevens zijn verwerkt in figuren B2.12.1. ϕ_{v1} , B2.12.1.opslag, B2.12.1.boter, B2.12.2. ϕ_{v1} , B2.12.3. ϕ_{v1} en B2.12.3.boter.

Bij de eerste serie is de eerste vloeistofdebiet meting na 45 seconden gedaan (van $t=30$ s tot $t=60$) en bedroeg circa 2 ml/s. Bij de meting na 100 seconden was het vloeistofdebiet 1,6 ml/s en was de stationaire waarde, waar het debiet naar toe gaat, bijna bereikt.

Bij deze eerste serie leek de opslag noch de botervorming beïnvloed te zijn door de daling van het vloeistofdebiet.

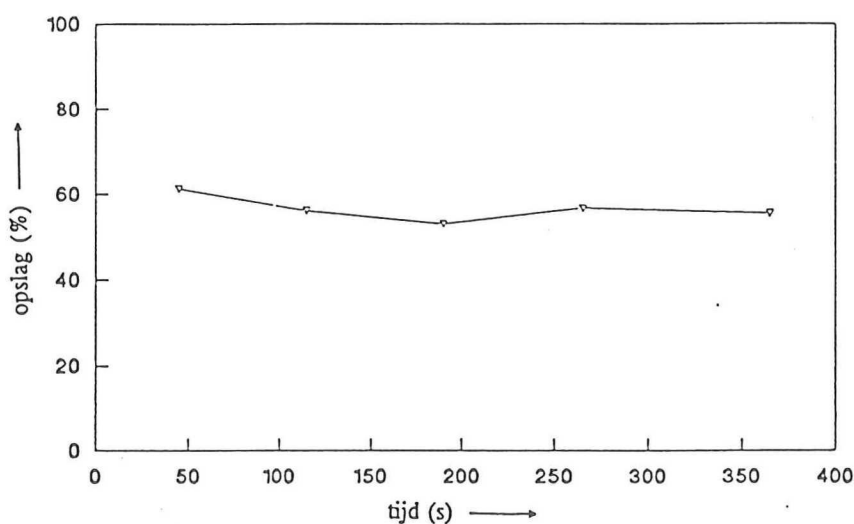
Bij de tweede en de derde serie is het gasdebiet eerst 30 seconden ingesteld op een hoge waarde, 53 ml/s, daarna meer dan 140 seconden op een lage waarde, 10 ml/s, en vervolgens weer naar een wat hogere waarde.

De resultaten van deze duplo series weken aanzienlijk van elkaar af.

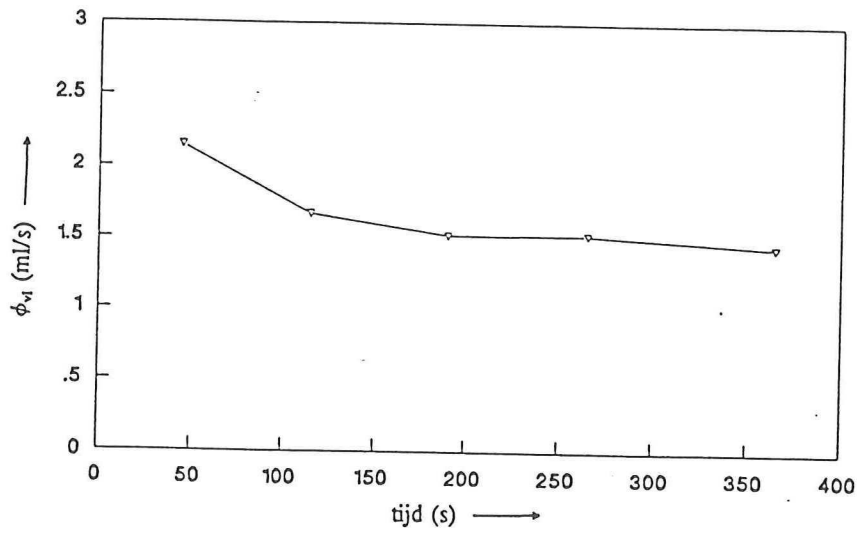
Het vloeistofdebiet is bepaald vanaf het overschakelen naar het 10 ml/s gasdebiet. Zelfs nadat de korrelbuis al enige insteltijd had gehad met doorstroming met stijve slagroom, bleek bij dit lage gasdebiet, waarmee slappe slagroom werd geproduceerd, het vloeistofdebiet toch terug te lopen. Dat is vooral bij serie 2 geconstateerd. Na verhoging van het gasdebiet naar 23 ml/s bleef het vloeistofdebiet bij serie 2 stationair (nog steeds redelijk slappe slagroom), terwijl bij serie 3 de korrelbuis compleet dichtslipte.

Het horizontaal respectievelijk verticaal staan van de korrelbuis beïnvloedt de experimenten, zoals bleek bij het dichtslippen bij serie 3. De korrelbuis stond onder een hoek van 45° en het bleek dat het gas veel meer aan de bovenzijde en de slagroom veel meer aan de onderzijde van de doorsnede stroomde.

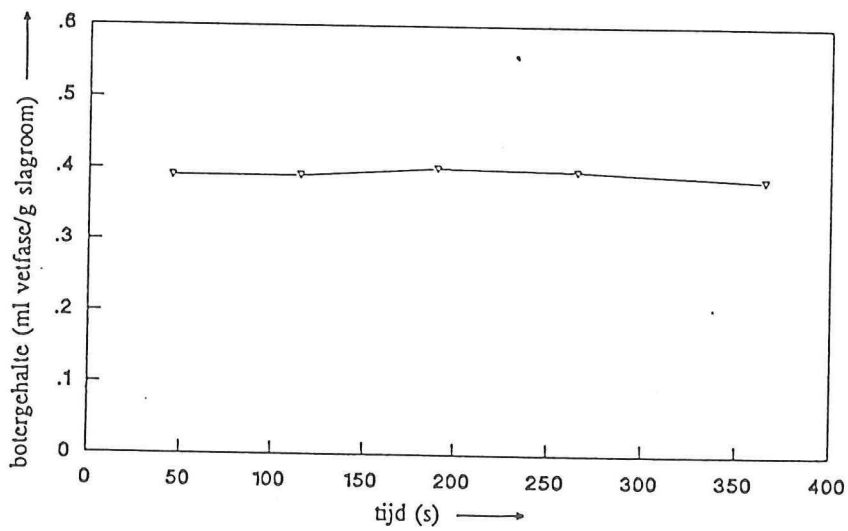
- Conclusie:
- Er zet zich vermoedelijk een boterlaag af op de korreltjes. Zelfs bij het produceren van slappe slagroom blijkt het vloeistofdebiet na een insteltijd, in de orde van minuten, terug te lopen naar een stationaire waarde. Bij stijvere slagroom kan de korrelbuis volledig dichtslippen.
 - Duplo metingen geven weer duidelijk afwijkende resultaten.
 - Door de niet-verticale opstelling van de korrelbuis, zal de slagroom en het gas ontmengen en een niet uniform stromingsprofiel over een doorsnede ontstaan. (Gas boven, slagroom onder).



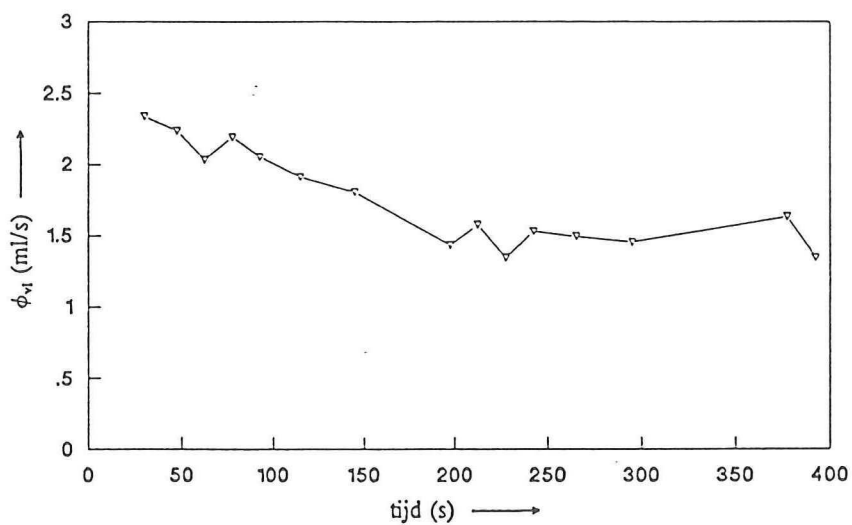
Figuur B2.12.1.opslag. De opslag van de slagroom bij meetserie 12, eerste serie.



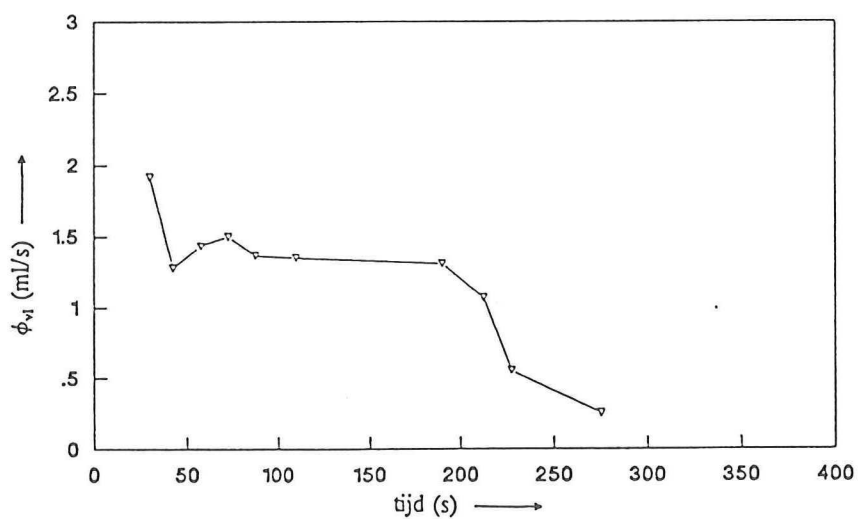
Figuur B2.12.1. ϕ_{v1} . Het vloeistofdebiet bij meetserie 12, eerste serie.



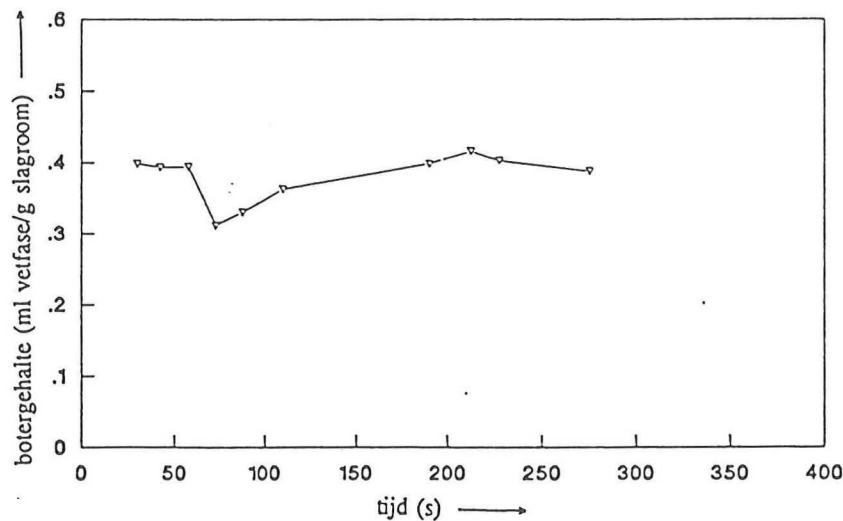
Figuur B2.12.1. boter. Het botergehalte van de slagroom bij meetserie 12, eerste serie.



Figuur B2.12.2. ϕ_{v1} . Het vloeistofdebiet bij meetserie 12, tweede serie.



Figuur B2.12.3. ϕ_{v1} . Het vloeistofdebiet bij meetserie 12, derde serie.



Figuur B2.12.3.boter. Het botergehalte van de slagroom bij meetserie 12, derde serie.

Meetserie 13 - Metingen met korrelbuis en room/stikstof stroom 5

Korrelbuis: lengte : 10 cm 5,4 cm
 korreldiameter : 1,8 mm 1 mm

Gas : stikstof
 Druk voorraadvat : 9 bar

Vloeistofdebiet (ml/s) : 1,6 à 2,5 ml/s (vaste kraanstand)
 Gasdebiet (ml/s bij 1 bar) : ingestelde waarden tussen 10 en 57

Deze meetserie is in feite weer een combinatie van 3 meetseries. Het doel was verder onderzoek naar het ontstaan van de vetlaag op de bolletjes.

Serie 1 werd uitgevoerd met 1,8 mm korreltjes en een buis van 10 cm. Series 2 en 3 waren duplo's van elkaar en bovendien uitgevoerd met dezelfde korrelbuis als series 2 en 3 van meetserie 12.

De meetgegevens zijn verwerkt in figuren B2.13.1. ϕ_{v1} , B2.13.1.boter, B2.13.2. ϕ_{v1} , B2.13.3. ϕ_{v1} en B2.13.3.boter.

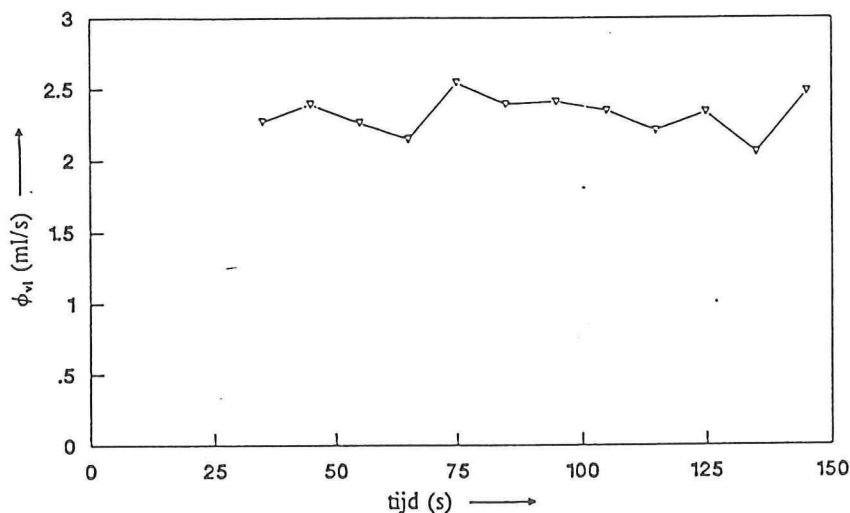
Bij serie 1 werd gestart met het produceren van stijve slagroom bij een gasdebiet van 57 ml/s gedurende 30 seconden. Na het terugbrengen van dat gasdebiet naar 13 ml/s (productie van slappe slagroom) trad geen afname van het vloeistofdebiet meer op.

De botervorming bij serie 1 lijkt iets onder de 0,4 ml vetfase/g slagroom te liggen. In de botergehalte metingen vanaf tijd=70 s zit een meetfout, omdat de ontstane vetfase zo lang had gestaan dat er zo op het oog te zien dat er kristallen in gevormd waren. (te lang gewacht

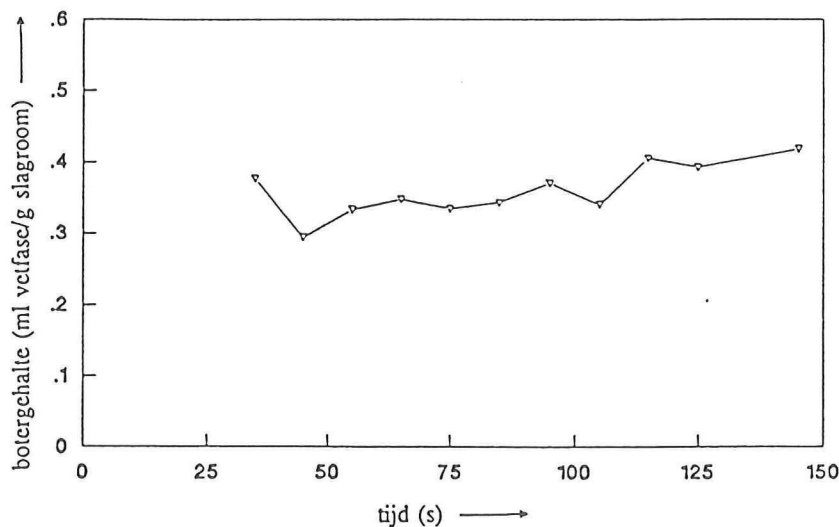
met aflezen).

Bij series 2 en 3 werd net stijve slagroom geproduceerd bij een gasdebit van 27 ml/s. Er trad bij beide series een vergelijkbare daling van het vloeistofdebit op, van 2,4 naar 1,8 ml/s. Precieze schatting van de insteltijd van het vloeistofdebit is lastig. Het frequenter nemen van monsters is daarvoor noodzakelijk, maar daardoor moet de tijdsduur van de monsternamen worden teruggebracht wat de nauwkeurigheid verslechtert.

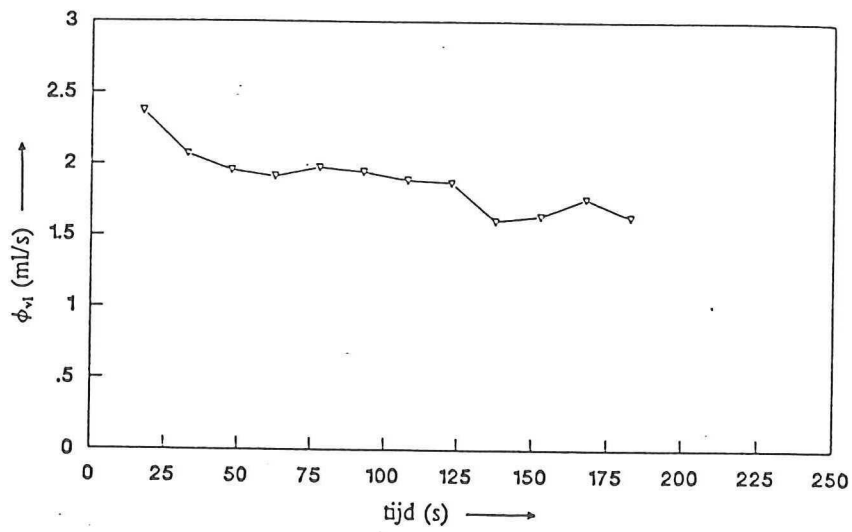
- Conclusie:
- Bij grotere 1,8 mm korrels in de korrelbuis is niet geconstateerd dat de insteltijd van het vloeistofdebit groter is.
 - Bij de 1 mm korrels is wederom het teruglopen van het vloeistofdebit naar een stationaire waarde gemeten.
 - Te lang wachten met het aflezen van het botergehalte geeft een te hoge meetwaarde, vanwege de vermoedelijk kristalvorming.



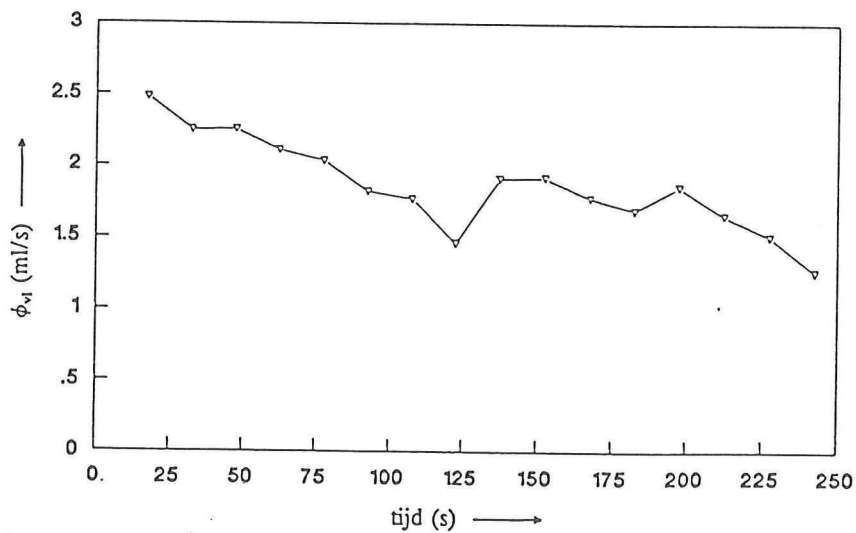
Figuur B2.13.1. ϕ_{vl} . Het vloeistofdebit bij meetserie 13, eerste serie.



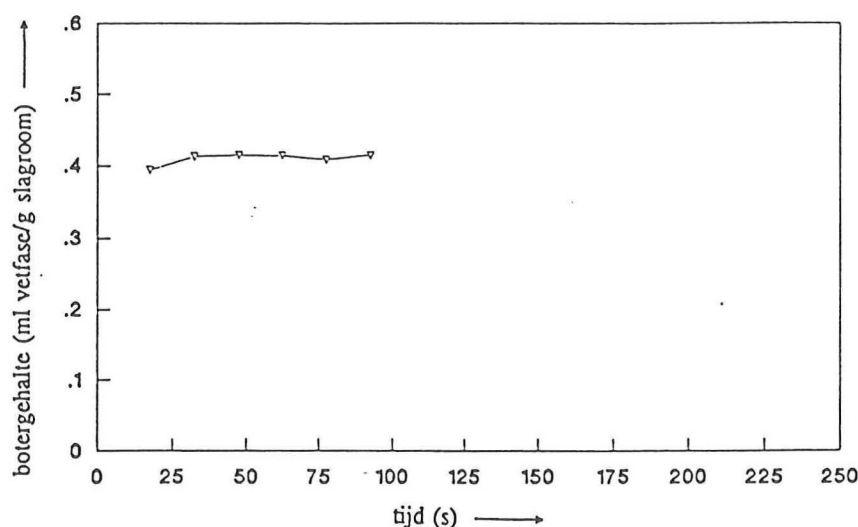
Figuur B2.13.1. boter. Het botergehalte van de slagroom bij meetserie 13, eerste serie.



Figuur B2.13.2. ϕ_{v1} . Het vloeistofdebiet bij meetserie 13, tweede serie.



Figuur B2.13.3. ϕ_{v1} . Het vloeistofdebiet bij meetserie 13, derde serie.



Figuur B2.13.3.boter. Het botergehalte van de slagroom bij meetserie 13, derde serie.

Meetserie 14 - Metingen met korrelbuis en room/stikstof stroom 6

Korrelbuis: lengte : 10 cm
 korreldiameter : 1,8 mm

Gas : stikstof
 Druk voorraadvat : 9 bar

Vloeistofdebiet (ml/s) : 1,9 tot 3,6 ml/s (vaste kraanstand)
 Gasdebiet (ml/s bij 1 bar) : ingestelde waarden tussen 0 en 14

Doel van deze meting was uit te zoeken vanaf welk gasdebiet er een geleidelijke overgang zou zijn van een botergehalte van 0 naar 0,4 ml vetfase per gram slagroom. Het vermoeden van een geleidelijke overgang was ontstaan naar aanleiding van meetserie 10. Dat is niet gelukt, maar de meting had zeer bruikbare resultaten.

Bij de ingestelde vloeistofkraan is het gasdebiet verhoogd van 0 via 10 ml/s naar 14 ml/s. Bij 10 ml/s was het botergehalte nog steeds 0, maar bij 14 ml/s werd goede stijve slagroom geproduceerd en was het botergehalte maximaal, ca 0,4 ml vetfase per g slagroom.

Bij het terugbrengen van het gasdebiet werd de uitgespoten slagroom weer vloeibaar, maar bleef het botergehalte maximaal zelfs bij zeer lage gassnelheden. Het vloeistofdebiet bleek ook gedaald te zijn.

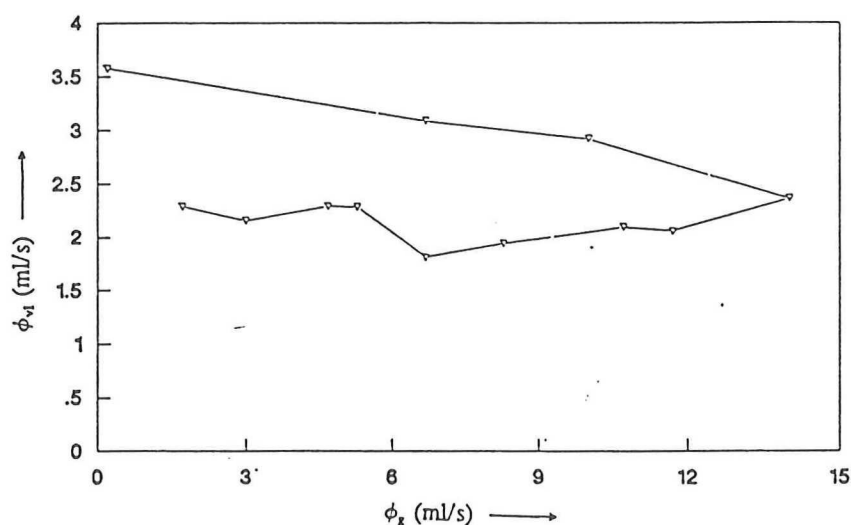
De (vloeibare) slagroom, die is uitgespoten bij het terugbrengen van het gasdebiet, had nadat deze een tijd in een bekersglas had gestaan, een stijve bovenlaag.

Vermoedelijk heeft de eenmaal ontstane boterlaag de kanaaltjes tussen de korrels dermate

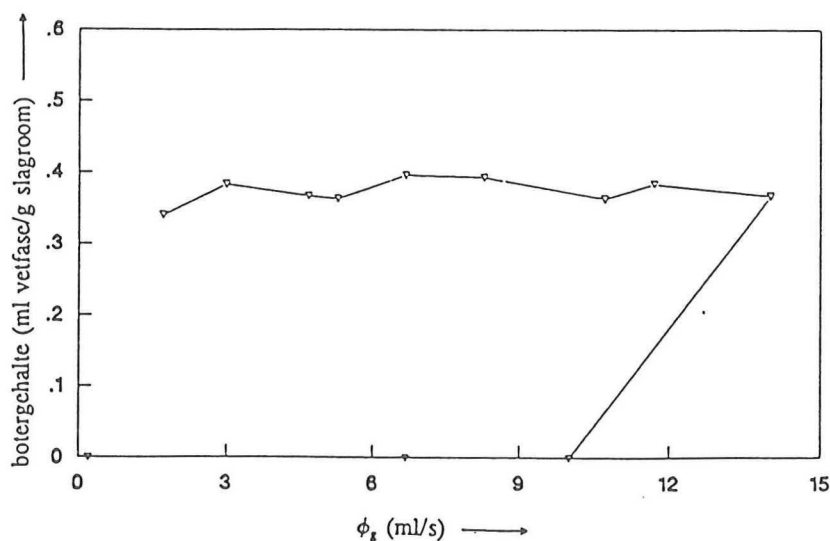
versmald, waardoor botervorming kon optreden en dat door de toegenomen weerstand over de korrelbuis het vloeistofdebiet afnam.

De meetgegevens zijn verwerkt in figuren B2.14. ϕ_{v1} , B2.14.boter en B2.14. ϕ_{gas}/ϕ_{v1} .

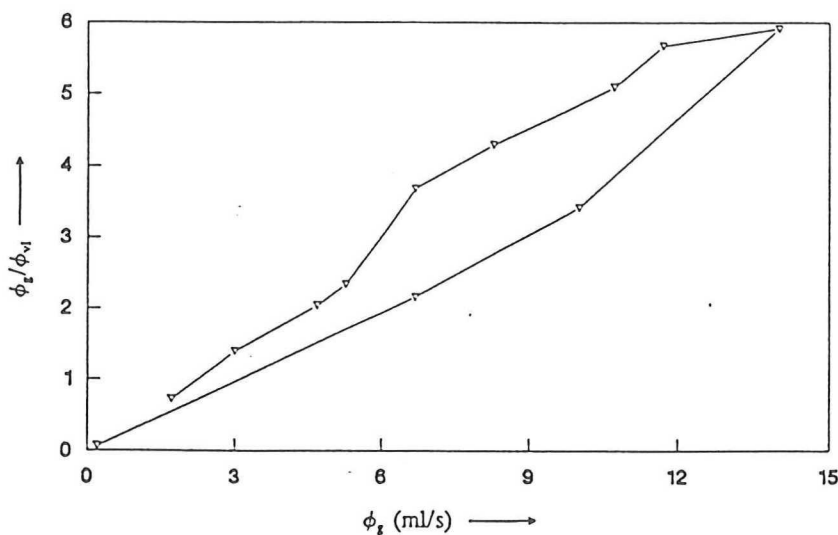
Conclusie: - De botervorming in de stroming treedt op door de vernauwing van de kanaaltjes tussen de korrels door de ontstane boterlaag op de korrels.
 - Het debiet daalt door de ontstane boterlaag.
 - Geleidelijke toename van botervorming is niet waargenomen. Vermoedelijk is de overgang van minimale naar maximale botervorming uitsluitend geleidelijk als de korrelbuis zo kort en/of de korrels zo groot korrels zijn dat alleen bij zeer grote gasdebieten uitbotering kan worden verkregen.



Figuur B2.14. ϕ_{v1} . Het vloeistofdebiet bij meetserie 14.



Figuur B2.14.boter. Het botergehalte van de slagroom bij meetserie 14.



Figuur B2.14. ϕ_{gas}/ϕ_{vl} . De gas/vloeistofdebiet verhouding bij meetserie 14.

Meetserie 15 - Diverse metingen 1

Room kloppen in glove box.

De glove box is een opstelling, waarmee de slagroomstabiliteit in een lachgasomgeving bestudeerd kon worden.

De experimenten bestonden uit het vier keer bereiden van slagroom in de lachgas omgeving:

1. bereiden met een mixer, bewaren in de lachgas omgeving
2. bereiden met een mixer, bewaren in buitenlucht
3. bereiden met een spuitbus, bewaren in de lachgas omgeving
4. bereiden met een spuitbus, bewaren in buitenlucht

Bij experimenten 1 en 2 was de slagroom, die in de lachgas omgeving bleef, lange tijd goed (> 45 min), terwijl bij de slagroom die in de buitenlucht werd bewaard na 4 minuten de eerste bellen al openbraken aan het oppervlak, dat bovendien glanzend werd.

Bij experimenten 3 en 4 was de slagroom die in de lachgas omgeving bleef na 5 minuten nog goed, terwijl de slagroom in de buitenlucht al na één minuut glanzend werd en de scherpe randen van de spuitvorm afvlakten.

Conclusie: - De diffusie van het lachgas uit de slagroom is de snelheidsbepalende stap bij de eerste achteruitgang van spuitbusslagroom en niet de ontbrekende uitbotering.
 - De diffusie van het lachgas uit de slagroom tast de kwaliteit direct na het uitspuiten aan.
 - Het vochtig worden van het bovenoppervlak toont aan dat de drainage het kleiner worden van de bellen niet kan bijhouden.

Meetserie 16 - Diverse metingen 2

Opslag en boter gehalte in slagroom geklopt met mixer

Naast de proeven met de korrelbuis is er ook slagroom geklopt met een mixer in zowel lucht omgeving als lachgas omgeving.

Het experiment van het kloppen van room in lachgas omgeving is uitgevoerd in een glove box.

Slagroom geklopt in een mixer geeft een uitbotering van 0,41 ml vetfase per g slagroom.

De opslag van de geklopte slagroom was in de lucht omgeving 94 % en in de lachgas omgeving 72 %. Nadat de met lachgas geklopte slagroom langere tijd (20 minuten) in de buitenlucht had gestaan, was het bovenoppervlak wel nat, maar de opslag binnenin was nog steeds circa 70 %

Meetserie 17 - Diverse metingen 3

Inzakken van spuitbuslagroom

Het inzakken van spuitbuslagroom na het uitspuiten is bepaald door het meten van het verloop van de opslag van uitgespoten Almhof Uniekaas slagroom. De meetgegevens zijn verwerkt in figuur M.17.opslag.

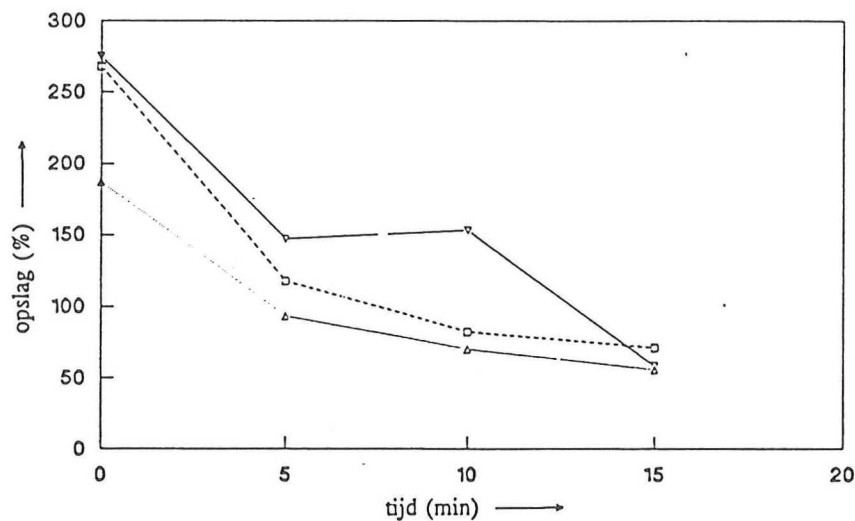
Uit deze figuur blijkt dat de begin opslag van ca 270 % na 5 minuten al zeer aanzienlijk is teruggelopen, in één van de meetseries tot zelfs 120 %. Dat betekent dat na 5 minuten nog $(120+100)/(270+100)=0,59$ ste deel van het oorspronkelijke gespoten volume over is.

Op de lange duur stabiliseert de opslag zich op circa 90 %.

De hoge opslag bij serie 1 na 10 minuten is vermoedelijk een meetfout. De oorzaak van de lagere begin opslag bij de derde meting is onbekend.

De botervorming van deze (Almhof Uniekaas) spuitbuslagroom is 0,15 ml vetfase per g slagroom.

Conclusie: - De hoge opslag van slagroom uit spuitbussen, bij Almhof 270 % direct na het uitspuiten, is na 5 minuten gehalveerd en waarna de opslag daalt naar een stationaire waarde van circa 90 %.



Figuur B2.17.opslag. De opslag bij meetserie 17.

Meetserie 18 - Metingen met korrelbuis en room/lachgas stroom 1

Verkennde metingen

Stijve slagroom is uitgespoten uit een spuitbus die onder 9 bar lachgas druk stond en voorzien was van een korrelbuis met een lengte van 5 cm en korrels van 1 mm. Deze slagroom had een botergehalte van 0,48 ml vetfase per g slagroom en bleef ook na langere tijd stevig.

Naast de spuitbus een half uur niet was gebruikt, was het niet meer mogelijk om slagroom door de korrelbuis te spuiten. Deze moest eerst ontstopt worden.

Bij het uitspuiten zonder dat de slagroom door de korrelbuis ging, dus alleen door de twee kranen, bleek het botergehalte ook 0,49 ml vetfase per gram slagroom te zijn. De uitgespoten slagroom was overigens slap.

- Conclusies:
- Ook zonder korrelbuis kan bij gebruik van lachgas maximale uitbotering verkregen worden. Omdat deze slagroom slap was, spelen ook andere factoren dan botergehalte een rol in de stevigheid van slagroom.
 - De kwaliteit van room varieert. Normaal kan met room van 40 % vet maximaal 0,4 ml vetfase per gram slagroom bereikt worden en het verkregen botergehalte wijst op room met 49 % vet.
 - De uitbotering lijkt beter dan bij room/stikstof experimenten, omdat bij die experimenten de buis nooit verstopt raakt door ze een half uur niet te gebruiken, maar bij room/lachgas wel.

Meetserie 19 - Metingen met korrelbuis en room/lachgas stroom 2

Korrelbuis: lengte	: 3 cm
korreldiameter	: 1 mm
Gas	: lachgas
Druk voorraadvat	: 3 - 4 - 5 - 6 bar
Vloeistofdebiet (ml/s)	:

Deze meetserie had als doel de invloed van de lachgas druk op de opklopbaarheid te meten.

Verondersteld was dat naarmate de lachgasdruk groter zou zijn en dus meer lachgas in de room zou zijn opgelost, de uitgespoten slagroom een hogere opslag zou bereiken. Zie Figuur B2.19.veronderstelling. Dat bleek niet uit te komen.

De meetgegevens zijn verwerkt in figuren B2.19.1.opslag en B2.19.2.opslag.

Het voorraadvat werd op druk gebracht met lachgas, goed geschud en vervolgens weer afgevuld met lachgas (de druk daalt omdat er lachgas oplost in de room), totdat er geen lachgas meer aangevuld hoeft te worden.

Voor iedere meting werd het voorraadvat goed geschud om zeker te zijn dat er voldoende lachgas in de room was opgelost.

Bij een lachgas druk van 2 en 3 bar kwam er alleen vloeibare slagroom uit de spuitbus.

Bij de metingen van serie 2 bleek dat de opslag afnam naarmate de lachgasdruk toenam. Het opslagpercentage daalde van ca 180 % bij 4 bar druk naar 150 % bij 6 bar druk. Bij alle drie de metingen was de slagroom goed uitgeboterd.

Bij metingen met 7 bar lachgasdruk zijn twee duidelijk afwijkende resultaten behaald, met beginopslagen van respectievelijk 130 en 200 %. Bij de meting met een opslag van 130 % stond de kraan niet volledig open en was de slagroom zover uitgeboterd dat water uitzakte. Bij de meting met een opslag van 200 % is mogelijk van te voren niet geschud. Uit meetserie 20 blijkt dat dat grote invloed heeft.

Bij 9 bar overdruk komt de slagroom er om onverklaarbare reden niet meer uit.

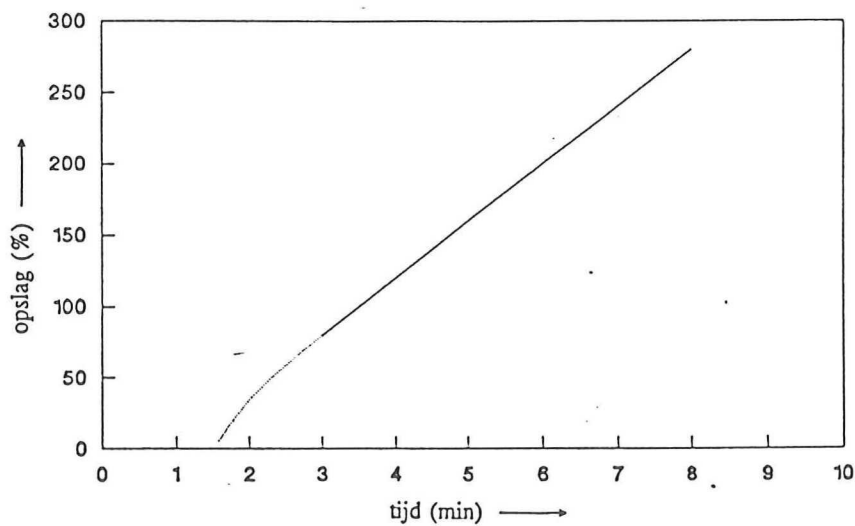
Wederom blijkt dat de korrelbuis is verstopt als deze een half uur blijft liggen.

Bij de meting bij 5 bar van serie 2 gaf een gedeeltelijk een afwijkend resultaat van de meting bij 5 bar van serie 1. De beginopslag is lager, maar het profiel van de opslag in de tijd is vlakker. De slagroom is wel stijf, maar niet heel erg. Net als bij serie 2 heeft de slagroom reeds na 5 minuten (mogelijk eerder) een glimmende bovenlaag en is na één uur niet meer te presenteren.

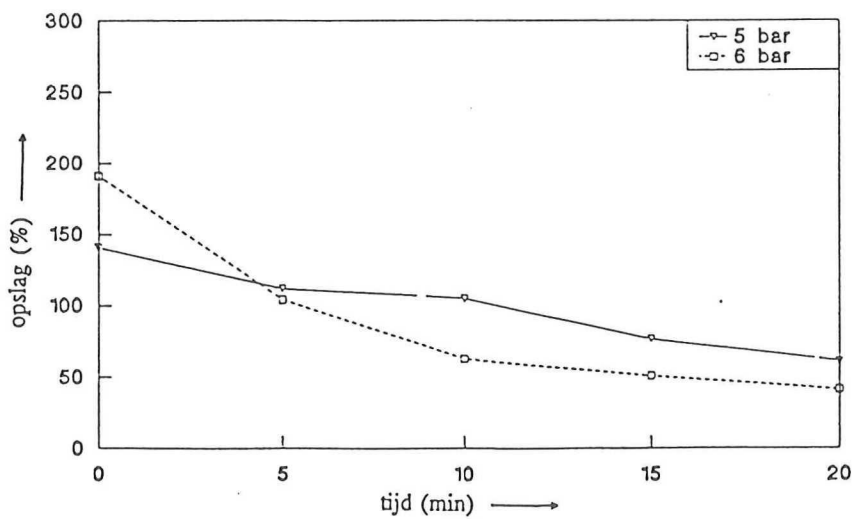
De meting van 6 bar van serie 2 geeft een opslagprofiel dat vergelijkbaar is met de meting van 6 bar van serie 1. Het inzakken van de opslag is vergelijkbaar en de beginopslag is iets hoger.

Bij alle metingen is het botergehalte rond de 0,4 ml vetfase per g slagroom (behalve bij 2 en 3 bar, niet bepaald).

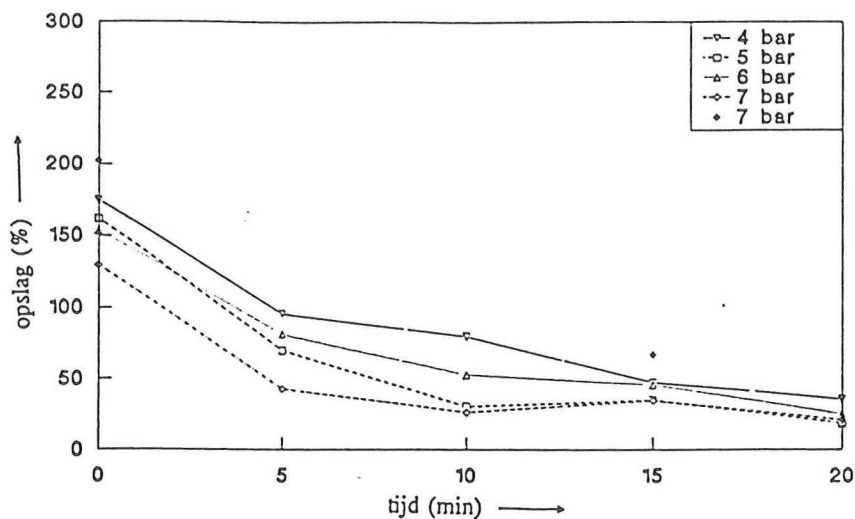
- Conclusie:
- Het bereikte botergehalte was in alle gevallen maximaal.
 - Bij goed uitgeboterde slagroom daalt de opslag (waarschijnlijk) naarmate de gasdruk groter is.
 - De opslag zakt ook met de korrelbuis spuitkop aanzienlijk in.
 - De spuitkop verstopt als deze half uur niet gebruikt wordt.



Figuur B2.19.veronderstelling. De veronderstelde opslag van de slagroom als functie van de lachgasdruk.



Figuur B2.19.1.opslag. De opslag van de slagroom bij meetserie 19, eerste serie.



Figuur B2.19.2.opslag. De opslag van de slagroom bij meetserie 19, tweede serie.

Meetserie 20 - Metingen met korrelbuis en room/lachgas stroom 3

Korrelbuis: lengte : 1 cm
 korreldiameter : 1 mm

Gas : lachgas
 Druk voorraadvat : 3 - 4 - 6 - 8 bar

Vloeistofdebiet (ml/s) :

Bij 3 bar druk in het voorraadvat is de uitgespoten slagroom niet volledig vloeibaar en een beetje vast. Het botergehalte is 0,12, maar er is geen duidelijke scheiding tussen vetfase en waterfase.

Bij 4 bar druk kwam er wel stijve slagroom uit, die wel een gedeeltelijk vloeibaar was, maar er kwam geen water op de bodem van het bekglas.

Het verloop van de opslag na het uitspuiten bij 4 en 6 bar druk in het voorraadvat is verwerkt in Figuur B2.20.opslag. De beginopslag lag iets lager dan bij meetserie 19, waar een korrelbuis van 5 cm werd gebruikt.

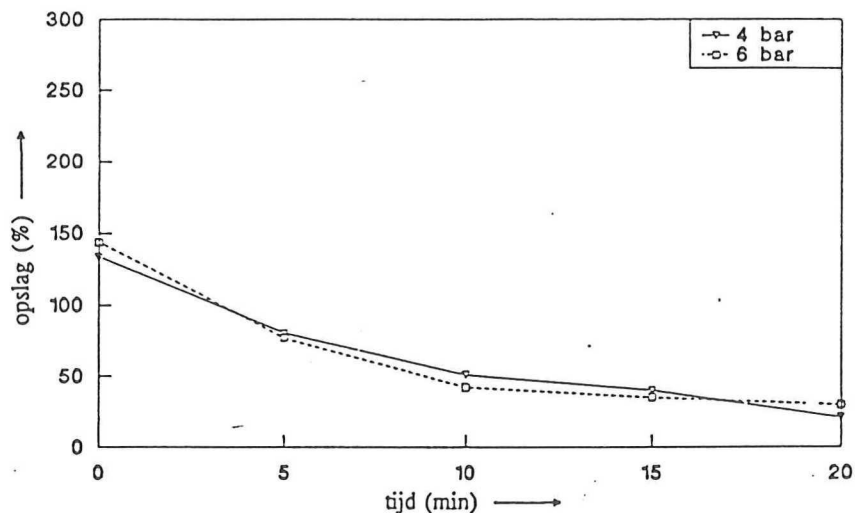
Bij deze twee drukken was het botergehalte 0,41 respectievelijk 0,43.

Bij 8 bar druk moest eerst de korrelbuis worden schoongespoeld om stijve slagroom uit te spuiten, vanwege een verstopping. Er kwam een zeer korrelige slagroom uit, er ontstond een waterlaag op de bodem en de korrelbuis sputtert.

In tegenstelling tot vorige meetseries verstopte de buis niet als deze, eenmaal gevuld met

slagroom, een tijdje niet werd gebruikt.

- Conclusie:
- Bij de kortere buis (grotere drukval per meter) treedt er geen verstopping op door de achtergebleven slagroom in de korrelbuis als deze een tijdje staat.
 - Bij 8 bar is de slagroom zeer duidelijk te ver uitgeboterd.
 - Bij 4 bar is er voldoende uitbotering.
 - Bij te lage druk is er geen stijve slagroom maar een wel beperkte mate van uitbotering bij te lage druk om stijve slagroom te maken.



Figuur B2.20.opslag. De opslag van de slagroom bij meetserie 20.

Meetserie 21 - Metingen met korrelbuis en room/lachgas stroom 4

Korrelbuis: lengte : 5 cm
korreldiameter : 1 mm

Gas : lachgas
Druk voorraadvat : 4 - 4,5 - 5 - 5,5 - 6 bar

Vloeistofdebiet (ml/s) : 7 tot 11 ml/s

Er is een poging gedaan om meetwaarden in te vullen in de vergelijking van Ergun en aan de hand daarvan vast te stellen of het stromingsregime laminair of turbulent was. Dat is niet gelukt.

Er moest worden volstaan met debietmetingen bij 3 drukvallen, omdat bij 4 bar druk in het voorraadvat er alleen maar vloeibare slagroom uit de korrelbuis kwam en bij 6 bar de buis

verstopte.

Als de drukval tegen de superficiële snelheid en het kwadraat van de superficiële snelheid werd uitgezet, werd in beide gevallen een gekromde lijn gevonden.

Deze metingen, het resultaat en het aantal metingen, waren niet genoeg om vast te stellen of de stroom laminair of turbulent zou zijn.

Conclusie: - Het is niet mogelijk om experimenteel vast te stellen of de stroming laminair of turbulent is.

Meetserie 22 - Metingen met korrelbuis en room/lachgas stroom 5

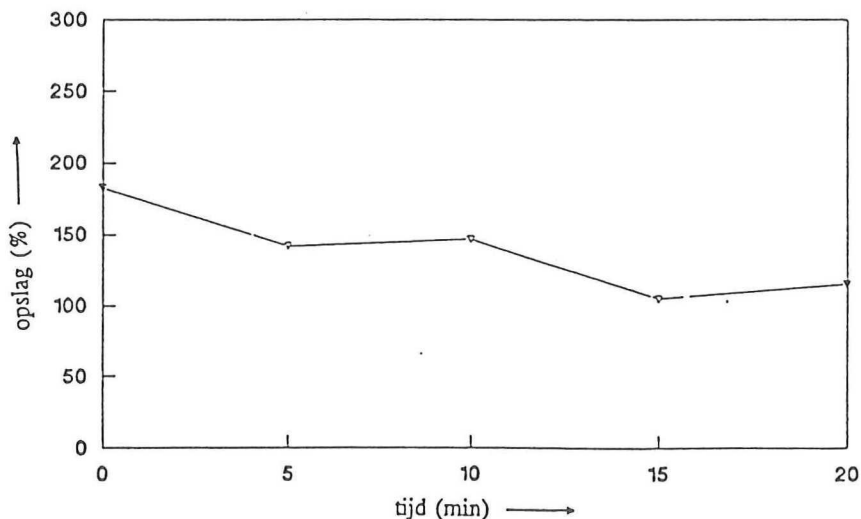
Korrelbuis: lengte : 1 cm
korreldiameter : 1,8 mm

Gas : lachgas
Druk voorraadvat : 6 bar

Vloeistofdebiet (ml/s) :

Meetgegevens zijn verwerkt in figuur B2.22.opslag

Conclusie: - De opslag daalt langzaam doordat het hele bekersglas volgespoten is en er daardoor weinig uitwisselend oppervlak is.
- De slagroom is zodanig stijf dat er na 20 minuten nog opslagmetingen gedaan konden worden.



Figuur B2.22.opslag. De opslag van de slagroom bij meetserie 22.

Meetserie 23 - Metingen met korrelbuis en room/lachgas stroom 6

Korrelbuis: lengte : 1 cm 5 cm
 korreldiameter : 1,8 mm 1 mm / 1,8 mm

Gas : lachgas
Druk voorraadvat : 6 bar

Vloeistofdebiet (ml/s) :

Deze meetserie toont aan dat schudden de uitbotering bevordert, waardoor de opslag aanzienlijk lager is. Dat is gebleken door bij dezelfde korrelbuis (lengte en korreldiameter) twee maal het verloop van de opslag te meten na het uitspuiten, éénmaal met schudden vooraf en éénmaal zonder schudden vooraf.

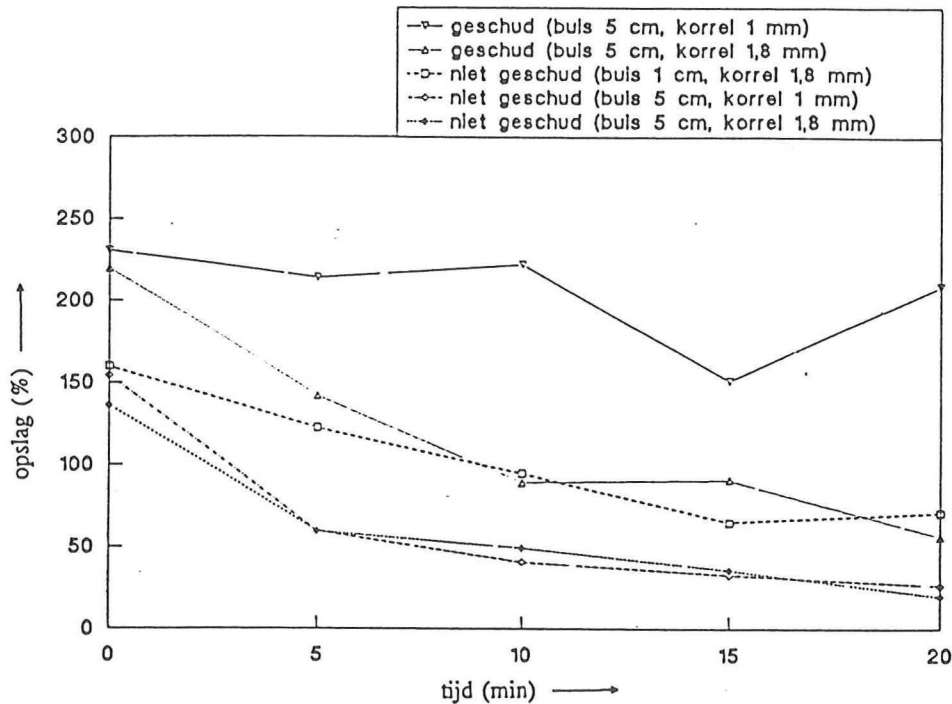
De meetgegevens zijn verwerkt in figuur B2.23.opslag.

Bij een 5 cm korrelbuis wordt bij korrels met diameter 1 mm en 1,8 mm zonder schudden als opslag 230 respectievelijk 220 % gemeten en na schudden 154 respectievelijk 136 % gemeten.

Dit geeft aan dat de invloed van schudden op de opslag veel groter is dan de invloed van de korreldiameter. Ook blijkt dat de verschillen die veroorzaakt worden door het al dan niet schudden veel groter zijn dan de invloed van de variatie in gasdruk (meetserie 19).

De room die voor het uitspuiten is geschud oogt veel steviger en grover, terwijl zonder schudden de slagroom glad en bijna glimmend oogt.

- Conclusie:
- Vooraf schudden bevordert de uitbotering en daardoor een daling van de opslag.
 - Kiemvorming blijkt een belangrijke parameter te zijn bij het uitboteren. De invloed is groter dan de invloed van de korreldiameter en de gasdruk.
 - Toename van kiemvorming door schudden betekent dat de kiemvorming heterogeen plaatsvindt.
 - Uit de invloed van kiemvorming volgt dat een goede verdeling van het room/gas mengsel erg belangrijk is.
 - Als er bij expansie al vaste slagroom ontstaat, dan wordt extra geëxpandeerd gas niet vastgehouden. Dus als de slagroom nog een beetje vloeibaar is dan wordt het expanderende gas beter vastgehouden.



Figuur B2.23. opslag. De opslag van de slagroom bij meetserie 23.

Meetserie 24 - Diverse metingen 4

Kloppen van room met puddingpoeder

Doel was om aan te tonen dat room kloppen veel sneller gaat als de beginviscositeit groter is. Daarom is aan de vloeibare room pudding poeder (koud bindmiddel) toegevoegd, waardoor de viscositeit inderdaad toenam. Uit de experimenten is inderdaad gebleken dat de slagroom daardoor veel sneller stijf werd.

Puddingpoeder (Sarana) is gekozen omdat het de viscositeit verhoogd en een koud bindmiddel is. Een warm bindmiddel had geen zin omdat de room niet verwarmd mag worden.

Driemaal is 190 ml slagroom geklopt in eenzelfde bekersglas met de mixer in eenzelfde mixerstand.

De eerste keer is slagroom geslagen zonder toevoeging van bindmiddel en duurde het 450 seconden totdat de slagroom inzakte als gevolg van te veel botervorming.

De tweede keer is ca. 10 gram bindmiddel toegevoegd en volgens de aanwijzing op het pak bindmiddel is de room met bindmiddel 10 minuten in de ijskast gezet om visceuze vloeistof te maken. Het kostte vervolgens 270 seconden voordat de slagroom inzakte door te veel botervorming.

De derde keer is veel meer bindmiddel toegevoegd, in de ijskast gekoeld en vervolgens duurde het 160 seconden voordat de slagroom inzakte.

De bepaling van het botergehalte gaf aan dat er botervorming had plaatsgevonden. Duidelijke

fasenscheiding trad niet op omdat het bindmiddel zich concentreerde tussen vet- en waterfase in.

Conclusie: - Naarmate de viscositeit van slagroom hoger is gaat het kloppen sneller.
- Zie ook theoretische achtergrond.

Meetserie 25 - Metingen met korrelbuis en room/lachgas stroom 7

Korrelbuis: lengte : 3 cm
korreldiameter : 1 mm

Gas : lachgas
Druk voorraadvat : 6 - 8 bar

Vloeistofdebiet (ml/s) :

Gepoogd is om room uit echte spuitbussen met de eigen spuitbus en korrelbuis stijf te kloppen. Dat is niet gelukt.

Babette (Malebic), Erlenhof Fix & Fertig (Malèbic) en Almhof (Uniekaas) spuitroom zijn uitgetest.

Bij Babette en Erlenhof was het niet mogelijk om na 10 nog een opslag bepaling te doen, omdat de slagroom te slap was. Tevens is vastgesteld dat er geen uitbotering is opgetreden.

Bij Almhof kon het bekeerglas, waar de slagroom in is opgevangen, worden omgedraaid, zonder dat de slagroom er uit kwam. De slagroom was niet erg stijf, niet te presenteren en had veel vocht op het oppervlak. De opslag na het uitspuiten was ca 120 %. De uitbotering is bij twee verschillende slagroomproducties gemeten: 0,25 ml/g en 0,28 ml/g. Het maximaal haalbare is 0,35 ml/g (room bevat 35 % vet) en als deze slagroom uit z'n originele verpakking wordt uitgespoten, dan is de uitbotering 0,15 ml/g.

Conclusie: - Spuitroom geklopt met de eigen spuitbus geeft geen goede stijve slagroom.
- In Almhof (Uniekaas) room treedt wel uitbotering en in de Malebic room niet. Het botergehalte van Almhof slagroom uitgespoten met de originele verpakking is 0,15 ml/g, met de korrelbuis 0,25 ml/g en maximaal zou 0,35 ml/g haalbaar moeten zijn (35 % vet).
- Almhof slagroom uitgespoten met korrelbuis is in zoverre stijf dat het slagroombekerglas ondersteboven gehouden kan worden, zonder dat de slagroom er uit druipt.

Meetserie 26 - Diverse metingen 5

De opslag direct na het uitspuiten van een Erlenhof Fix & Fertig spuitbus is 457 %.

Meetserie 27 - Metingen met korrelbuis en room/lachgas stroom 8

Korrelbuis: lengte : 10 cm
korreldiameter : 1 mm

Gas : lachgas
Druk voorraadvat : 6 bar

Vloeistofdebiet (ml/s) :

Pogingen om met Belgische spuitroom stijve slagroom met de korrelbuis te produceren zijn mislukt. De geteste room is Gervais en Butterfly. Meting van de opslag was allen direct na het uitspuiten mogelijk, voor latere metingen van de slagroom te slap. Het botergehalte in de uitgespoten room was minder dan 0,04 ml/g.

Meetserie 28 - Diverse metingen 6

Het is niet gelukt de viscositeit van slagroom te bepalen.

Meetserie 29 - Metingen met korrelbuis en room/lachgas stroom 9

Korrelbuis: lengte : 3 cm
korreldiameter : 1 mm

Gas : lachgas
Druk voorraadvat : 1 t/m 6 bar

Vloeistofdebiet (ml/s) :

Doel was de invloed van de kranen op het volumedebiet en de drukval over de (twee) kranen en korrelbuis te onderzoeken. Daarvoor is een drukmeter aangebracht tussen de kranen en de korrelbuis. Er bleek inderdaad een drukval aanwezig te zijn, die het ontstaan van een twee fasen mengsel bevordert. Door het dalen van de druk daalt de oplosbaarheid en moet er dus gas expanderen. Naarmate er meer gas in de kranen expandeert, zal er de inkomende stroom in de korrelbuis meer gas bevatten en dus beter uitboteren.

Experiment 1

Druk in spuitbus is 5,8 bar. De gemeten druk tussen de kranen (kranen 1 en 2) en de korrelbuis is 3,6 bar bij kraan 2 half open (kraan 1 vol open) en 5,3 bar bij kraan 2 vol open (beide kranen vol open).

Er is duidelijk verschil in uitbotering tussen deze twee kraanstanden. Bij kraan 2 half open werd er aanzienlijk uitgeboterde grove slagroom geproduceerd, bij kraan 2 vol open werd

er mooie gladde slagroom geproduceerd die mooi stijf was.

Bij dit experiment was de room goed geschud voor het uitspuiten.

Het resultaat betekent dat het beetje extra expansie in de kraan een veel groter effect heeft op de uitbotering dan de lagere drukval over de korrelbuis.

Experiment 2

De kranen (kranen 1 en 2) tussen het voorraadvat en de korrelbuis zijn vervangen door een kogelkraan na de korrelbuis. De slagroom gaat met groot debiet door de korrelbuis heen en is minder stijf dan bij experiment 1. Vermoedelijk komt dat doordat er te weinig gas is geëxpandeerd bij het binnengaan van de korrelbuis.

Op de drukmeter wordt een drukval van 0,2 bar gemeten als gevolg van de stroming.

Experiment 3

De kranen voor de korrelbuis zijn weer tussengevoegd. Eerst is met een druk van 6 bar in het voorraadvat kraan 2 vol open gezet (kraan 1 ook vol open) en was de druk voor de korrelbuis 4,8 bar.

Nadat kraan 1 en 2 gesloten waren en de kogelkraan nog open was, daalde de druk voor korrelbuis tot 1,8 bar en niet verder.

Als vervolgens de kranen tussen het voorraadvat en de korrelbuis (kraan 1 en kraan 2) weer worden opengedraaid, dan moet de druk voor de korrelbuis stijgen tot iets boven 4 bar, voordat er weer slagroom door de korrelbuis ging stromen. Dit was een vrij duidelijke overgang en meerdere malen geconstateerd. Er is blijkbaar een minimum drukval per meter korrelbuis nodig.

De maximale druk die is gemeten bij stromende slagroom is 5,8 bar.

Conclusie:

- Slagroom heeft yield stress, waardoor bij de gegeven korrelbuis een druk van 4 bar nodig was om de slagroom te laten stromen.
- De drukval van de kraan voor de korrelbuis bevordert de uitbotering doordat er meer geëxpandeerd gas in de stroom is bij het ingaan van de korrelbuis.
- De variatie van het vloeistofdebiet door het veranderen van de kraanstand gaat gepaard met kleine absolute veranderingen van de drukval over de kranen. (orde 0,1 bar)

