

Rheologiens principper

De rheologiske grundprincipper og anvendelse af rheologisk apparatur
Version VIII



Indholdsfortegnelse

Indledning	Side 3
Symbolfortegnelse	Side 3
Hvor anvendes rheologi	Side 3
Rheologiens grundlag	Side 4
Begreber	Side 4
Kvalitativ og grafisk fremstilling af reelle mediers rheologiske adfærd (flydeadfærd)	Side 6
Newtoniske medier	Side 6
Ikke-newtoniske medier	Side 6
Tidsuafhængige medier	Side 6
Pseudoplastiske medier	Side 7
Dilatante medier	Side 8
Plastiske medier	Side 9
Thixotrope medier	Side 10
Rheopekse medier	Side 11
Indflydelsesfaktorer på de rheologiske egenskaber	Side 12
Definerede målebetingelser	Side 13
Rheologisk måleudstyr	Side 14
Måleprincipper og eksempler på anvendelse	Side 14
Viskosimeter til online brug i produktionsprocessen	Side 20
Anvendelseseksempel for industriviskosimetre	Side 20
Viskositetsregulering af farver og lak	Side 21
Viskositetsovervågning ved kunstfiberproduktion	Side 22
Forædling af chokolademasse	Side 23
Checkliste til valg af det bedst egnede viskosimeter	Side 23
Service	Side 24

Kontakt os for yderligere information på tlf. 44 54 00 00 eller via e-mail b-h@buch-holm.dk



Indledning

Denne håndbog gennemgår kort de rheologiske grundprincipper og anvendelsen af rheometre og viskosimetre. Efter hvert afsnit er der en sammenfatning af begreberne samt eksempler og checkliste til valg af viskosimetre.

Symbolfortegnelse

τ (Tau)	Forskydningsspænding (shear stress)	$\text{Pa} = \text{N/m}^2$
γ (Gamma)	Deformation	-
$\dot{\gamma}$	Forskydningstal (hastighed) (shear rate)	s^{-1}
η (Eta)	Dynamisk viskositet	$\text{Pa}\cdot\text{s} = \text{kg}/\text{m}\cdot\text{s}$, $1 \text{ mPa} = \text{cP}$
ν (Nu)	Kinematisk viskositet	m^2/s , $1 \text{ mm}^2/\text{s} = \text{cst}$
ρ (Rho)	Massefylde	kg/m^3
G	Elasticitetsmodul	$\text{Pa} = \text{kg}/\text{m}\cdot\text{s}^2$
F	Kraft	$\text{N} = \text{kg}/\text{m}\cdot\text{s}^2$
A	Flade	m^2
s	Forskydning, vej	m
h	Afstand	m
v	Hastighed	m/s
t	Tid	s

Hvor anvendes rheologi?

Rheologi (flydekendskab eller læren om flydeadfærd) er et delområde inden for fysikken og befatter sig med deformation og flydeevne hos flydende og faste legemer. Rheologiske egenskaber (flydeegenskaber) er altså værdier som karakteriserer deformations-reaktionen af disse legemer ved påvirkning af ydre kræfter. Kendskabet til de rheologiske egenskaber af forarbejdede substanser er nødvendig til:

- Kvalitetskontrol og -sikring af løbende produktion, f.eks. overvågning af polymerisation, overvågning af kvaliteten af farver, creme og pasta, kontrol af råstoffer og halvfabrikata i levnedsmiddelindustrien m.m.
- Ændring af de rheologiske egenskaber i produktet medfører større accept hos forbrugeren, f.eks. modning af yoghurt, jævning af sauce, forædling af chokolade.
- Udvikling af produkter med nye egenskaber, f.eks. medier som er tyndtflydende til fast ved tilføring af et elektrisk eller magnetisk felt, til anvendelse i koblinger eller dæmpere.
- Grundlags- og strukturundersøgelser til opklaring af bl.a. molekyllære og interpartikulære vekselvirkninger.
- Fastlæggelse og målrettet ændring af de rheologiske egenskaber (først og fremmest viskositeten) muliggør optimal konstruktion af produktionsmetoder, effektivisering af proceskontrol og -styring samt opnåelse af en højere accept af produktet hos forbrugeren.
- Optimal udlægning og udformning af anlæg, f.eks. rørledninger, pumper, presser, valser, dyser, coatinganlæg, blandeanlæg m.m.



Rheologiens grundlag

Begreber

Fra fysikkens verden er det kendt, at et vilkårligt stof reagerer på en mekanisk påvirkning (kraftindvirkning) med en deformation. To grænsetilfælde ses som ydereksempler:

Elastisk deformation

Den tilførte spænding (kraftpåvirkning) bevirker en øjeblikkelig deformation (stofpartiklerne forskydes i forhold til hinanden). Denne deformation vedbliver så længe belastningen holdes. Ved fjernelse af belastningen ophæves deformationen helt (stofpartiklerne indtager atter deres oprindelige pladser).

Anskueliggørelse af den elastiske deformation via et elastisk legeme.

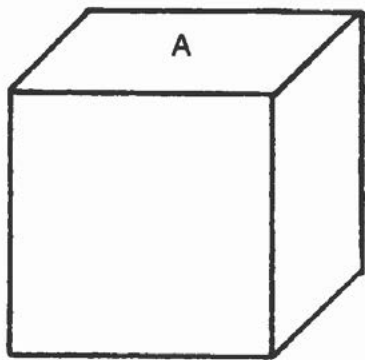


Fig. 1A: Elastisk legeme uden kraftindvirkning

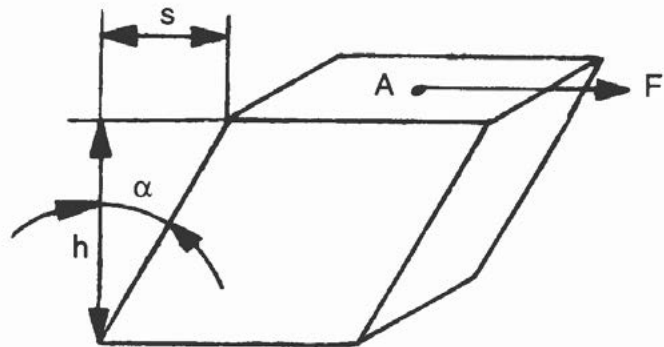


Fig. 1B: Elastisk legeme ved påvirkning af kraft F

Den øverste flade A påvirkes af kraften F. Den øverste flade forskydes med stykket s. Kvotienten af kraft F og flade A hedder forskydnings-spænding τ .

- $\tau = F/A$ Enhed: $N/m^2 = Pa$

Kvotienten af forskydning s og afstand h hedder deformation γ .

- $\gamma = s/h = \tan \alpha$

Deformationen er dimensionsløs

Kvotienten af forskydningspænding τ og deformation γ er elasticitetsmodul G.

- $G = \tau/\gamma$ Enhed: Pa

Elasticitetsmodulet G er den karakteristiske værdi for rene elastiske legemer.

Viskos deformation

Den tilførte spænding (kraftpåvirkning) bevirker en stadig voksende deformation (flydeevne). Flydeevnen holder så længe belastningen bibeholdes.

Anskueliggørelsen af viskos deformation via 2-plade-modellen.

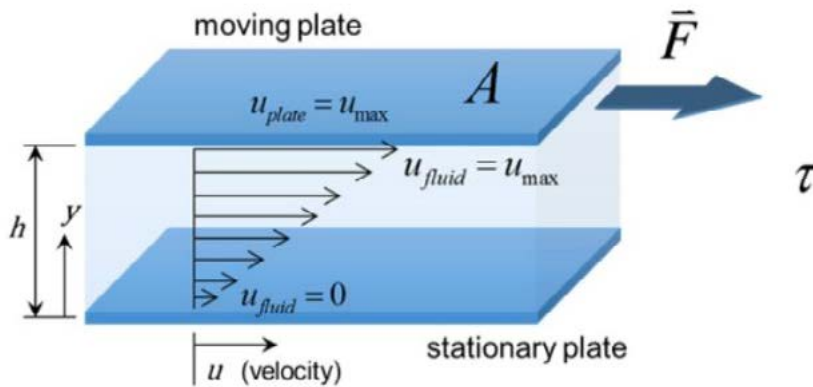


Fig 2: Hastighedsfordeling mellem en stillestående plade og en plade i bevægelse

Den øverste plade med fladen A påvirkes med kraften F . Den øverste plade bevæger sig med hastigheden v . Der opstår en laminar strømning. Kvotienten af hastighed v af den øverste plade og pladeafstanden h hedder forskydningshastighed γ .

- $\gamma = v/h$ Enhed: $m/sm = s^{-1}$

Forskydningshastigheden betegnes også som deformationshastighed, forskydningsfald eller forskydningsrate. I stedet for tegnet γ benyttes bogstavet D ofte. Kvotienten af forskydnings- spænding τ og forskydningsfald γ betegnes som dynamisk viskositet η .

- $\eta = \tau/\gamma$ Enhed: $Pa \cdot s$ ($1 m Pa \cdot s = 1 cP$)

Dette er et mål for et stofs indvendige gnidning ved laminare strømninger. Ved ideelle vis- kose væsker er stofkonstanten η kun afhængig af tryk og temperatur. Ved de fleste reelle væsker afhænger η også af forskydningsfald og belastningsvarighed (tid).

For flydefunktioner under indflydelse af tyngdekraften har den kinematiske viskositet betydning. Denne får man ved:

- $\nu = \eta/\rho$ (vægtfylde) Enhed: m^2/s ($1 cSt = 1 mm^2/s$)

Sammenhængen mellem forskydningsspænding (shear stress) og forskydningsfald (shear rate) fremstilles grafisk i et diagram som en flydekurve (flydefunktion). Fremstillingen af viskositetens afhængighed af forskydningsfaldet (shear rate) betegner man som viskositetskurven (viskositetsfunktion).

De vigtigste rheologiske begreber er deformation (relativ forskydning af et legemes partikler), forskydningsspænding (shear stress) (kvotient af kraft og flade), forskydningsfald (shear rate) deformationens tidsafledning og viskositet (kvotient af forskydningsspænding og forskydningsfald). De rheologiske egenskaber kan udledes af flydekurver (forskydningsspænding over forskydningsfald eller omvendt) og viskositetskurver (viskositet over forskydningsfald).

Kvalitativ og grafisk fremstilling af reelle mediers rheologiske adfærd (flydeadfærd)

Newtonske medier

Ved en newtonsk væske er viskositeten en stofkonstant (uafhængig af forskydningshastigheden (shear rate)). Den afhænger kun af tryk og temperatur. Til denne stofklasse hører bl.a. vand, mineralske olier, opløsningsmidler og fortyndede opløsninger.

Newtonske væsker karakteriseres fuldstændigt ved angivelsen af viskositetsværdien.

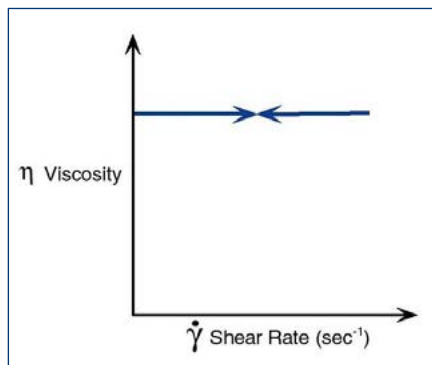


Fig. 3A: Flydekurve for en newtonsk væske

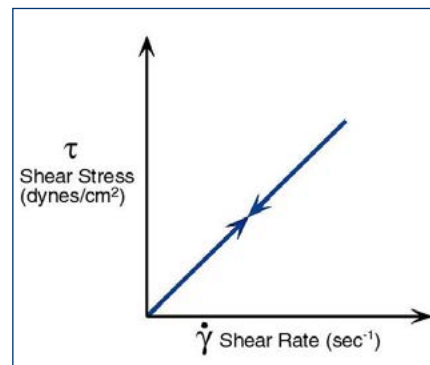


Fig. 3B: Viskositetskurve for en newtonsk væske

Ikke-newtonske medier

For et flertal af stoffer er viskositeten ikke en stofkonstant, men derimod afhængig af forskydningshastigheden (shear rate) eller forskydningspændingen (shear stress) og/eller varigheden af forskydningsbelastningen.

Tidsuafhængige medier

Ved tidsuafhængige medier forstår man stoffer, hvis rheologiske egenskaber er uafhængige af deformationsvarigheden. Flydeegenskaberne afhænger kun af belastningens størrelse.



Silikoneolie: Newtonsk væske

Mayonnaise: Ikke newtonsk væske

Pseudoplastiske medier

Pseudoplastiske (strukturviskose) medier er kendetegnet ved en formindskelse af flydemodstanden ved forhøjelse af deformationshastigheden eller forskydningspændingen (shear stress). Den af værdiparret τ og $\dot{\gamma}$ beregnelige tilsyneladende viskositet aftager med tiltagende deformationshastighed eller forskydningspænding. Pseudoplasticitet kaldes også forskydningsudtynding (shear-thinning).

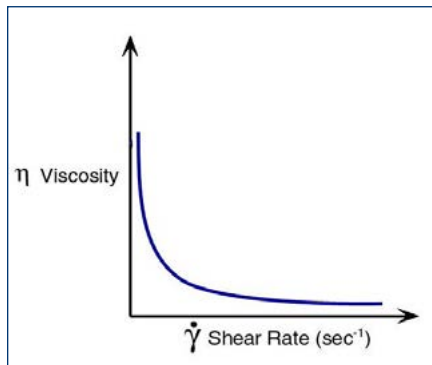


Fig. 4A: Flydekurve for en pseudoplastisk væske

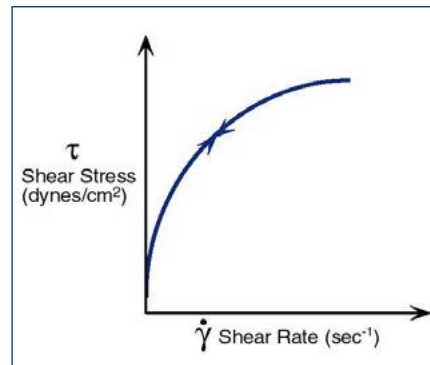


Fig. 4B: Viskositetskurve for en pseudoplastisk væske

Formindskelsen af flydemodstanden med forhøjelsen af forskydningshastigheden (shear rate) fortolkes som ødelæggelse af væskens struktur og som orientering af strukturenhederne (f.eks. molekylekæder, større partikler) i strømningsretningen.

Gennem begge mekanismer (strukturødelæggelse og orientering) forringes de enkelte flydeenheders indre flydemodstand mod hinanden.

Mange reelle stoffer opfører sig pseudoplastisk, f.eks. koncentrerede opløsninger, smeltninger, harpiks, suspensioner, pasta osv.



Dilatante medier

Dilatante medier er kendetegnet ved en forhøjelse af flydemodstanden ved forhøjelse af forskydningshastigheden (shear rate) eller forskydningspændingen (shear stress). Dilatant opførsel kaldes også forskydningshærdning (shear-thickening).

"Viskositets" funktionen stiger med voksende $\dot{\gamma}$ eller τ .

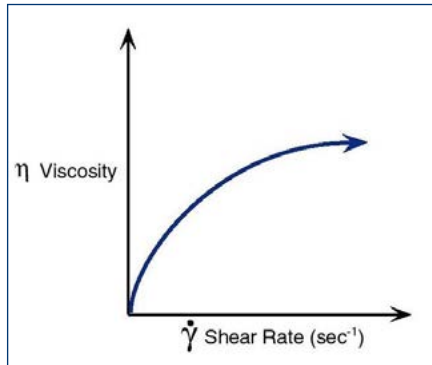


Fig. 5A: Flydekurve for en dilatant væske

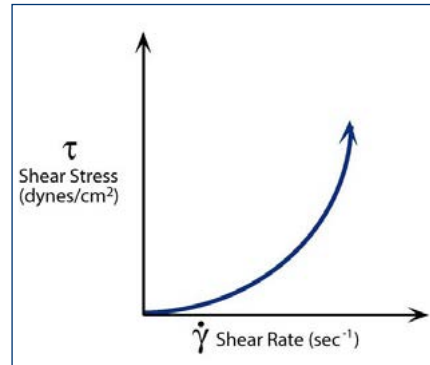


Fig. 5B: viskositetskurve for en dilatant væske

Forhøjelse af flydemodstanden ved stigende forskydningshastighed (shear rate) fortolkes som opbygningsmekanisme til en fastere struktur, eller ved disperse medier som en overfladeforstørrelse af de faste partikler gennem forskydningen. Overfladeforstørrelsen opstår gennem en adskillelse af agglomeratet (sammenklumpning af partikler).

Dermed opnås en omfordeling af væsken i suspensionen til den nydannede overflade. Ved koncentrerede suspensioner (ved væske-faststof blandinger iagttages først og fremmest dilatansen) er væskemængden ikke længere tilstrækkelig til at garantere en smørefilm mellem partiklerne og dermed stiger flydemodstanden.

Plastiske medier

Opfører en substans sig som et fast legeme ved små forskydningsbelastninger og lader det sig først deformere uigenkaldeligt efter opnåelse af en mindste forskydningsspænding (shear stress) τ_0 (yieldpoint), drejer det sig om et plastisk medie.

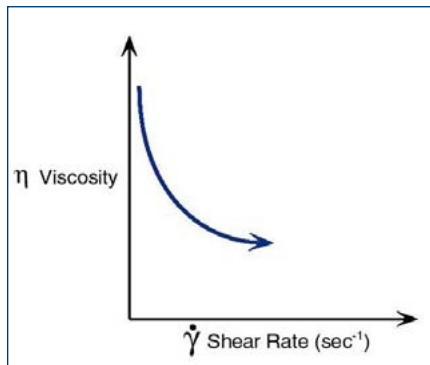


Fig. 6A: Flydekurve for plastiske væsker

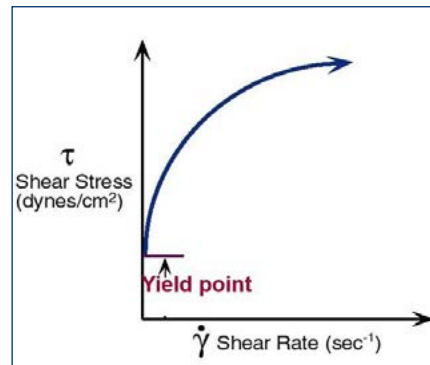


Fig. 6B: Viskositetskurve for plastiske væsker

Forekomsten af en flydekurve fortolker man som endelig strukturfasthed, som opstår via kraften mellem flydeenhederne. Ved suspensioner kan det bevises, at den faste fase som en struktur udvikler (f.eks. korthusstruktur), ikke ødelægges ved en endelig belastning, men derimod udelukkende deformeres elastisk. Bryder den struktur sammen (ved forhøjelse af belastningen) deformerer mediet sig plastisk og begynder at flyde. Som årsag til ikke-linearitet i plastisk flydeevne betragter man atter den videre strukturødelæggelse og partikelorientering.

Fedt, voks, pasta, gel og farve besidder altid en flydegrænse.

Tidsafhængige medier

Under tidsafhængige medier forstår man stoffer, hvis rheologiske egenskaber afhænger af både størrelsen og varigheden af påvirkningen samt tiden, der går efter påvirkning.

Tixotrope medier

Tixotropemedier er kendetegnet ved aftagelse af viskositeten med tiltagende varig belastning. Efter afslutning af deformationsprocessen (forskydningspåvirkning = σ) opnår substansen efter endelig hviletid atter sin udgangstilstand (reversibel Gel-Sol-forandring). Anskuelige præsentationer af tixotrope mediers adfærd ses af hysteresekurver.

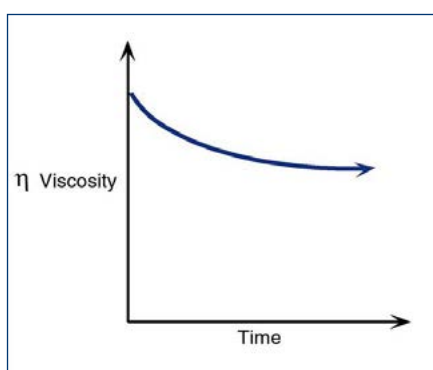


Fig. 7A: Tidsafhængig flydekurve for en tixotrop væske

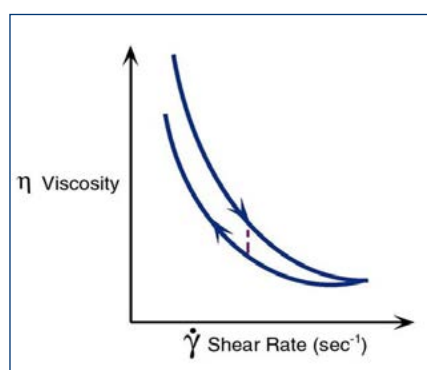


Fig. 7B: Viskositetskurve for en tixotrop væske (hysteresekurve)

Den thixotrope adfærd fortolkes analogt med den pseudoplastiske, dog med den forskel at ødelæggelses- og orienteringsprocessen under deformationsforløbet afvikles i endelig tid. Dermed ligger forskellen mellem thixotrope og pseudoplastiske medier udelukkende i tidsrummet for ligevægtstilstanden mellem strukturobygning og -ødelæggelse. Ved pseudoplastiske medier går tiden til opnåelse af ligevægten mod nul, mens den for thixotrope medier er endelig.

Til de mest kendte thixotrope stoffer hører bl.a. æggelikør, lak, klister og gylle.



Sæbe er typisk thixotrop



Plastmaling er typisk rheopeks

Rheopekse medier

Rheopekse medier viser med deformationsvarigheden t en stigende funktion $\eta(t)$ ved konstant forskydningshastighed (shear rate). Også ved disse stoffer er processen reversibel. Det betyder, at substanserne atter opnår deres udgangstilstand efter afslutning af deformationsprocessen.

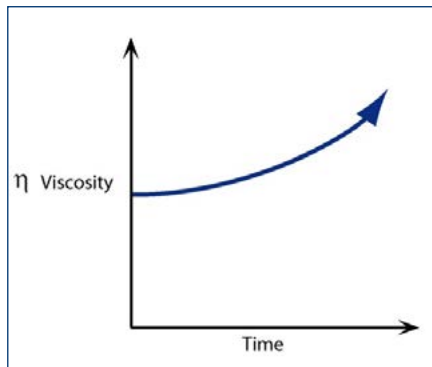


Fig. 8A: Tidsafhængig flydekurve for en rheopektisk væske

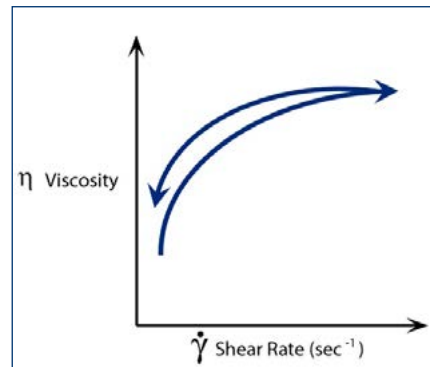


Fig. 8B: Viskositetskurve for en rheopektisk væske (hysteresekurve)

Rheopekse mediers adfærd svarer til dilatante medier, dog foregår ødelæggelses- og orienteringsprocessen af strukturerne i endelige intervaller. Meget creme og konfekture udviser rheopeks adfærd i begrænsede temperatur- og forskydningshastighedsområder.

Viskoelastiske stoffer

Denne stofgruppe er karakteriseret ved en elastisk og en viskos komponent i den rheologiske adfærd. Under deformationsprocessen "forbruges" en del af den tilførte energi til den elastiske deformation (f.eks. af molekylærkæder) og en del til den viskose deformation. Viskoelastiske mediers flydeadfærd kan anskueliggøres ved hjælp af en serieforbindelse af fjedre og dæmpere (Maxwell-modellen).

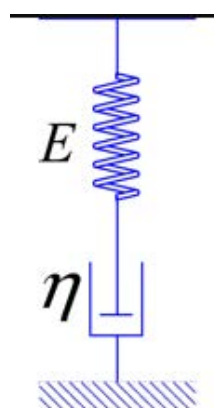


Fig. 9: Maxwell-model af en viskoelastisk væske

Efter tilføjelsen af en konstant belastning bliver fjederelementet omgående deformeret. Størrelsen af den elastiske deformation afhænger af belastningen og elasticitetsmodulet. Det viskoelastiske stof flyder som en ren viskos, newtons væske. Ved fjernelse af belastningen "afspændes" fjederen atter.

Viskoelastiske medier er f.eks. plast-smeltemasse og tyggegummi.

Indflydelsesfaktorer på de rheologiske egenskaber

Stofegenskaber

Under dette begreb kan man sammenfatte mange parametre:

- Kemisk sammensætning
- Form og andel i forskellige faser (f.eks. frugtkødsdele i grøntsagssaft)
- Partikelstørrelsesfordeling, partikelform og -fordeling af de disperse partikler
- Overfladeaktive stoffer
- Forløb af videre reaktioner i substanser

Temperatur

De rheologiske egenskaber er meget temperaturnafhængige. Selv en lille temperaturforøgelse kan føre til overproportional forringelse af viskositeten.

Således kan viskositeten af olie aftage med op til 20% ved en temperaturforøgelse på 1° C. Rheologiske undersøgelser fordrer derfor en måling og styring af temperaturen med 0,1° C nøjagtighed.

Forskydningsfald (shear rate)

Forskydningsfaldet er for de fleste reelle væsker af afgørende betydning for deres viskositet. Forhøjelse af forskydningsfaldet kan føre til både stigning og fald i viskositeten.

Tid

Hviletiden og belastningstiden i de enkelte forskydningsfaldsområder kan for de fleste reelle væskers vedkommende ikke negligeres.

Tryk

De fleste målinger bliver gennemført ved omgivende tryk svarende til anvendelsesområdet. At trykforøgelse fører til viskositetsforhøjelse skal man kun tage hensyn til ved ekstreme forhold (f.eks. boring i store dybder).





Definerede målebetingelser

Forudsætningen for enhver måling er definerede målebetingelser. Derfor er en række normer blevet udarbejdet. Formålet med disse normer er at fastlægge en definition af målebetingelserne for de tilsvarende viskosimetre.

I normerne fastlægges det nødvendige apparatur til viskositetsbestemmelse, forberedelse, gennemførelse samt analyse af målingerne.

Vigtige normer

- DIN 51 562 Ubbelohdeviskosimetre
- DIN 53 015 Kuglefaldsviskosimetre
- DIN 53 018 Rotationsviskosimetre
- DIN 53 019 Rotationsviskosimetre
- DIN 53 012 Kapillarviskosimetre

Rheologisk måleudstyr

Måleprincipper og eksempler på anvendelse

Kuglefaldsviskosimeter

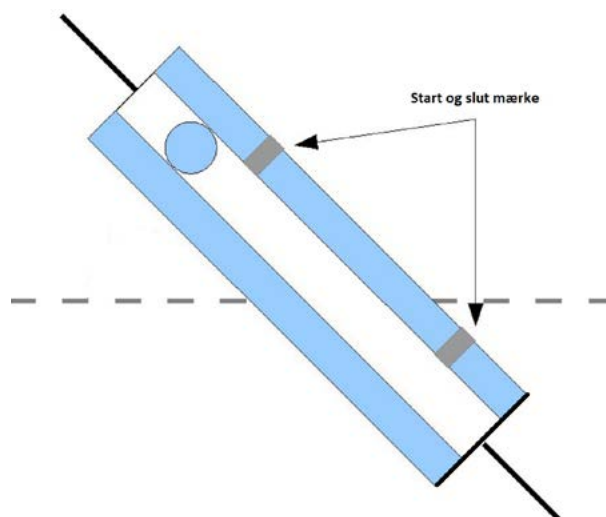


Fig. 10: Kuglefaldsviskosimetrets måleprincip

Ved kuglefaldsviskosimetret falder kuglen gennem væsken der skal måles. Man måler den tid det tager for kuglen at tilbagelægge den definerede strækning. Da man ved denne apparattype ikke kan beregne forskydningsfaldet (shear rate) foretages en kalibrering med en newtonsk væske.

Ud fra apparatkonstanten, den målte tid og vægtfylden af væsken og kuglen kan viskositeten for newtonske væsker bestemmes. Kuglefaldsviskosimetret udmærker sig ved en stor nøjagtighed og et bredt måleområde.

Eksempel på kuglefaldsviskosimeter

Brookfield KF30 eller KF40 viskosimetret som på billedet til højre.



Kugletrykviskosimeter

En variant af kuglefaldsviskosimetret er kugletrykviskosimetret. Kuglen fastgøres til en stav hvor på definerede påvirkninger på en substans kan tilføres. Derved udvides det målbare viskositetsområde betydeligt. Disse apparater er egnede til karakterisering af højviskose newtonske væsker.

Visse henvisninger til ikke-newtonske væsker kan udvindes af målingerne.

Kuglefalds- og kugletrykviskosimeter egner sig til bestemmelse af viskositet i newtonske medier og giver støttepunkter for ikke-newtonske væskers flydeadfærd.

Rotationsviskosimetre

Rotationsviskosimetre med målesystem efter plade-plade-, kegle-plade- eller koaksial cylinderprincippet er de mest alsidige typer.

De muliggør måling af flydekurver og bestemmelse af tidsafhængig og tidsuafhængig flydeadfærd. Anvendes typisk i polymerkemiske, farve-, tekstil- og levnedsmiddelindustrien. Beregningsligninger for forskydningsspænding (shear stress) og forskydningsfald (shear rate) samt apparatkonstant er indeholdt i producentens dokumentation.

Måleprincipper

Der forhåndsfastsættes enten forskydningsspænding (drejningsmoment) eller forskydningsfald (omdrejningstal).

Hvis drejningsmomentet defineres (dermed defineres også forskydningsspændingen) tillader modstanden af den forskudte væske kun et bestemt forskydningsfald, der omfattes som omdrejningstallet.

Hvis forskydningsfaldet (dvs. omdrejningstallet) forhåndsfastsættes opstår der en forskydningsspænding i den indvendige del af målesystemet pga. modstanden i den forskudte væske. Denne spænding kan måles som drejningsmoment.

Forskellige måleprincipper

Searle-princippet

Her roterer den indvendige cylinder f.eks. keglen med et konstant eller defineret variabelt omdrejningstal. Den udvendige cylinder f.eks. en plade forholder sig i ro. Under rotationen flyder målesubstansen ind i åbningen. Modstanden af den forskudte væske (viskositet) måles som drejningsmoment på den indvendige cylinder.

God temperaturkontrol og meget bredt viskositetsområde har ført til at Searle-typen er den mest anvendte. Searle-apparater har ulemper i området med meget lavviskose væsker, når disse skal udsættes for meget høje forskydningsfald (shear rate). Dette skaber høje centrifugal-kræfter, der fører til ikke-laminar strømning.

Eksempler på rotationsviskosimetre (Koaksial cylinder)

Dette kunne være et instrument fra Brookfield som forskellige varianter fra de helt simple med analog skala til de avancerede med opsamling af data m.v.

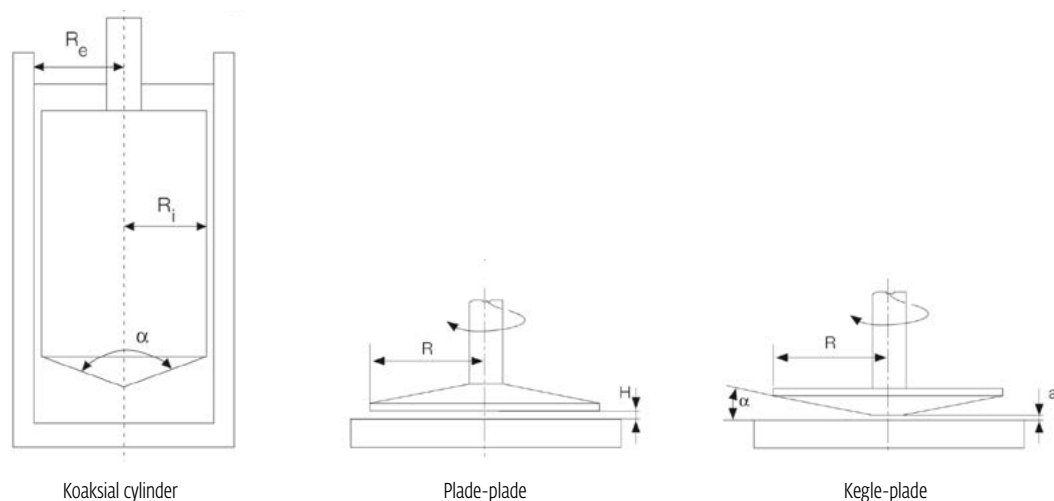
F.eks. Brookfield DV2T som er et meget alsidigt instrument til brugere, der søger enkel og nem betjening til krævende måleopgaver. DV2T EXTRA har samme specifikationer, men er opbygget med et mere robust kuglelejesystem, der forlænger levetiden, hvis det bruges meget eller står i beskiddet miljø. Leveres med Rheocalc T software og instrumentet forvandles til et prisbilligt rheometer. Denne model fås også i en kegle/plade version, som kan benyttes til prøvemængder på mellem 0,5 og 2 ml.



Coutte-princippet

Her roterer den udvendige cylinder, f.eks. pladen. Modstanden af den forskudte væske i åbningen frembringer et viskositetsafhængigt drejningsmoment på den indvendige cylinder, som bestemmes af modkraften, som er nødvendig for at holde den indvendige cylinder i ro. Fordelen ved viskosimetre af Coutte-typen er at turbulensen som følge af centrifugalkræfterne undgås. Derfor kan også lavviskøse væsker ved højere forskydningsfald (shear rate) måles. Målefølsomheden er generelt større end ved Searle-typen, så også målinger i området for meget lave forskydningsfald (shear rate) er mulige. Ulempen ved målesystemet er begrænsede temperaturstyringsmuligheder.

Fig. 11: Målesystemer for rotationsviskosimetre



Baggrunden for valg af forskellige målesystemer

Cylindersystemer er universelt anvendelige og giver fordele som bedre temperaturstyringsmuligheder og kan klare målinger af substanser med større partikler i den disperse fase (forholdet mellem spaltebredde og diameteren af de største partikler skal mindst være fra 3:1 til 10:1).

For "plade-plade" og "kegle-plade" målesystemer gælder følgende fordele: let rengøring, lille prøvemængde, meget højt forskydningsfald er muligt, samme strømningsbetingelser over hele målefladen. Ulemperne er begrænsninger ved måling af suspensioner, dårligere temperaturstyringsmuligheder og den relative store frie overflade.

Rotationsviskosimetre er de mest alsidige rheologiske målapparater. De muliggør fastsættelse af flydekurver og karakteristika af flydeadfærdens tidsafhængighed. Valget af apparattype og målesystem afhænger af opgaven.

Eksempel på kegle- og pladeviskosimetre

Disse apparater kunne være viskosimetrene CAP 1000+ og CAP 2000+ fra Brookfield. En instrumentserie, som er designet til måling af prøver med medium til høj viskositet bl.a. i maling, klæbemidler og lak i industrilaboratorier. Serien omfatter versioner til lav (5 - 75 °C) eller høj temperatur (50 - 235 °C). Kan benyttes til prøvemængder på under 1 ml.



Kapillarviskosimetre

Ved kapillarviskosimetre flyder målesubstansen under indflydelse af tyngdekraften (type Ubbelohde) eller tilført ydre tryk (højtrykskapillarviskosimeter) gennem et kapillær. Viskositeten kan beregnes ud fra måling af volumenstrømmen (tid), trykdifference mellem to målepunkter og den geometriske størrelse af kapillæret.

Forholdet mellem længde og diameter af kapillæret skal mindst være 50:1 for at maksimere præcisionen ved ind- og udløb.

I kapillarviskosimeteret (Ubbelohde) ændres det effektive forskydningsfald (shear rate) som følge af det kontinuerlige hydrostatiske tryk på kapillæret. Sådanne viskosimetre kan derfor kun anvendes til newtonske væsker, men udmærker sig ved høj målenøjagtighed. Deres anvendelsesområde er lavviskøse væsker (f.eks. vine, spirituousa, sukkeropløsninger og olier).

Med højtrykskapillarviskosimetre kan et større forskydningsfaldsområde dækkes ved variation af det tilførte tryk. Tidspåvirkningen kan ved et konstant forskydningsfald (shear rate) ikke varieres. Derfor kan dette apparat kun anvendes til newtonske væsker og tidsuafhængige medier. Problemer ved trykmåling fører ofte til større målefejl.

Højtrykskapillarviskosimetre anvendes hyppigst til karakterisering af polymeres rheologiske egenskaber.

En variant af kapillarviskosimetret er udløbsbægeret, f.eks. Ford cup, som anvendes i bl.a. farveindustrien. Disse giver kun sammenligningsværdier og ikke en fysisk beregnet værdi for de rheologiske egenskaber. Der fås Fordkopper, der overholder DIN 53211 eller ISO 2431. Fås i mange varianter, f.eks. "suppeske-typen" som ses på billedet eller med elektrisk opvarmning af prøven. Bruges typisk til kvalitetskontrol eller simple laboratorietests.

En anden variant af kapillarviskosimetret er et mekanisk reguleret kapillarviskosimeter. Her måles differencen i trykket mellem ind- og udløbet ved et fast omdrejningstal med en ændring af forskydningsfaldet (shear rate). Herudfra beregnes viskositeten.

Beregningsligninger og apparatkonstanter til undersøgelse af viskositeten medfølger ved apparatleverancen.

Kapillarviskosimetre anvendes til newtonske væsker (Ubbelohde) og til tidsuafhængige medier (højtrykskapillarviskosimetre).



Kapillarviskosimeter type Ubbelohde



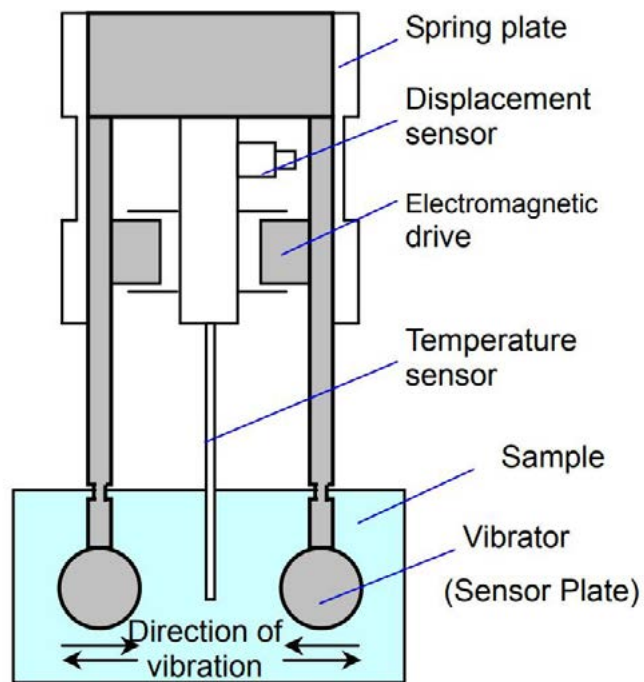
Ford cup

Vibrationsviskosimeter

Vibrationsviskosimetre virker ved, at de tynde sensorplader nedsænkes i en prøve. Når fjederpladerne vibreres med en ensartet frekvens, varierer amplituden som reaktion på den friktionskraft, der frembringes af viskositeten mellem sensorpladerne og prøven.

Viskosimetret styrer den elektriske strøm, der skal til for at vibrere fjederpladerne for at udvikle ensartet amplitude.

Den kraft, der kræves for måling, er direkte proportional med viskositeten $\times$ tæthed. Når fjederpladerne vibrerer med en konstant frekvens for at udvikle ensartet amplitude til prøver med forskellige viskositeter, er den elektriske strøm (kraft) derfor også direkte proportional med produktet af viskositet og massefylde i hver prøve. Ved hjælp af en teoretisk formel baseret på dette måleprincip påvises den fysiske mængde målt ved vibrationsviskosimetrets som "viskositet $\times$ massefylde", normalt vises begge værdier



Fysisk klassifikation af væsker

Newtonsk væske:

Vand, sukker opløsning, saltopløsning, alkohol, opløsningsmiddel, glycerin, siliciumolie, oliebaseret /vandbaseret kosmetik, kviksølv.

Dilatant væske:

Stivelsesopløsning, fugtigt sand (hurtigt sand), suspension (høj koncentration), gylle, maling, chokolade, kærnemælk.

Pseudoplastisk væske:

Kolloid opløsning, polymeropløsning, emulsion, gulvlak, maling/farvestof, mayonnaise, saucer, juice, kondenseret mælk.

Plastisk væske:

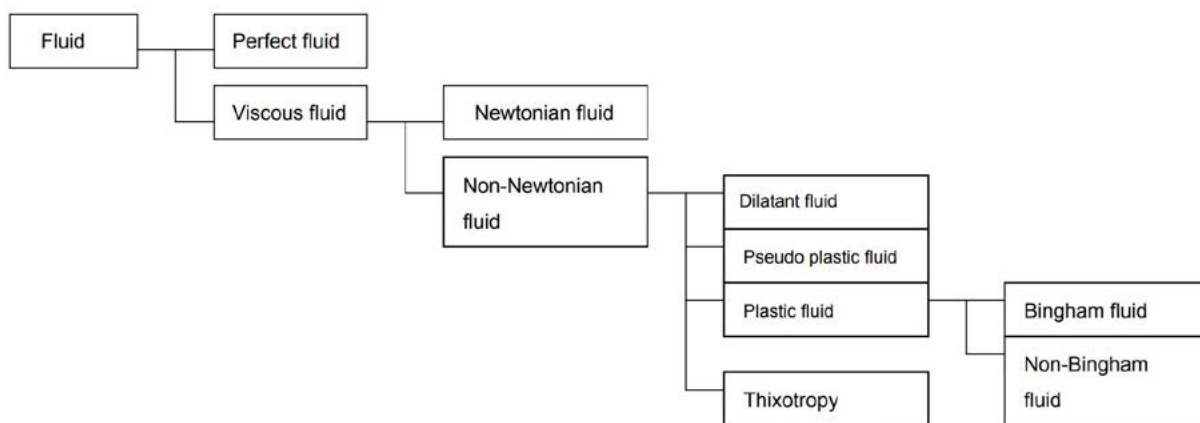
Bingham-væske:

Margarine, tomatketchup, æggehvite (skum), tandpasta, cream (kosmetik), forskellige opslæmninger (uklar væske med fast partikel).

Ikke-Bingham-væske: Printerblæk, maling, belægning, mayonnaise, raffineret mel af yams, asfalt, blod.

Tixotrop væske:

Loddepasta, fedt, trykfarve, tomatketchup, kakao, creme (kosmetik).



Viskosimeter til inline brug i produktionsprocessen

Produktionsprocesser stiller specielle krav til måleapparater for bestemmelse af de rheologiske egenskaber:

- Let betjening
- Minimal vedligeholdelse
- Robust bygget
- Henholdsvis kontinuerlig og quasikontinuerlig drift
- Afgrænsede måletider
- Mulighed for integration i eksisterende måle-, styre- og reguleringsteknikker

Derudover skal de generelle krav til rheologiske målinger så vidt muligt være opfyldt, særligt realisering af en rheometrisk strømning med mulighed for fastsættelse af flydekurver, temperaturstyring og temperaturkontrol med viskositet-temperatur-kompensation. I praksis vil det altid være nødvendigt at indgå et kompromis.

Måleprincipperne for kapillar- og rotationsviskosimetrene gør det muligt at anvende disse som procesviskosimeter.

Procesviskosimeter Brookfield PV-100 er et kontinuerligt arbejdende rotationsviskosimeter med trykløs eller trykfast dyppesonde eller gennemstrømningssonde.

Procesviskosimeter Brookfield KV-100 er et kontinuerligt arbejdende kapillarviskosimeter til brug i rørledninger eller beholdere.



Anvendelseseksempel for industriviskosimeter

Den kontinuerlige måling og overvågning af viskositeten er en nødvendighed i mange processer for at kunne gennemføre en automatisering. Da industriviskosimeter, i sammenligning med f.eks. tryk- og temperaturfølere, er mere bekostelige og kræver mere vedligeholdelse, afholder mange anlægbyggere og -brugere sig ofte fra at benytte industriviskosimeter i deres projekter.

Hertil kommer ofte et for lille kendskab til viskositetens væsentlige betydning i forskellige forarbejdningsprocesser.

I det følgende er opsat nogle eksempler, der skal opfordre til overvejelse af denne fremgangsmåde og give et motiv til viskositetsregulering eller -overvågning i industrielle processer.

Viskositetsregulering af farver og lak

Farver (f.eks. dybtrykblæk) og lak (f.eks. magnetbåndssuspensioner) indeholder udover pigment, bindemiddel og andre bestanddele og let flygtige opløsningsmidler. Ved fordampning af opløsningsmidlet stiger pigmentkoncentrationen og dermed farveværdien og viskositeten. Dette har indflydelse på farvegengivelsen ved trykkeriprocesser, på lagtykkelsen af farve eller lak og dermed også på resultatet af det færdige produkt samt forbruget af farve eller lak.

Ved kontinuerlig viskositetsregulering v.h.a. et procesviskosimeter optimeres kvalitetskendtegnene (konstant farvegengivelse, ensartet lagtykkelse) og de anvendte råstoffer (farve, lak og opløsningsmiddel) minimeres. Dette opnås ved løbende erstatning af de flygtige opløsningsmidler med det formål at holde viskositeten på den fastsatte værdi.

Undersøgelser har vist, at man ved automatisk farveviskositetsregulering med procesviskosimetre på dybtryksrotationsmaskinerne kunne opnå en årlig besparelse på trykfarve og opløsningsmiddelforbruget svarende til anskaffelsesprisen for viskosimetret. Dertil kommer så den forbedrede kvalitet af de færdige produkter.

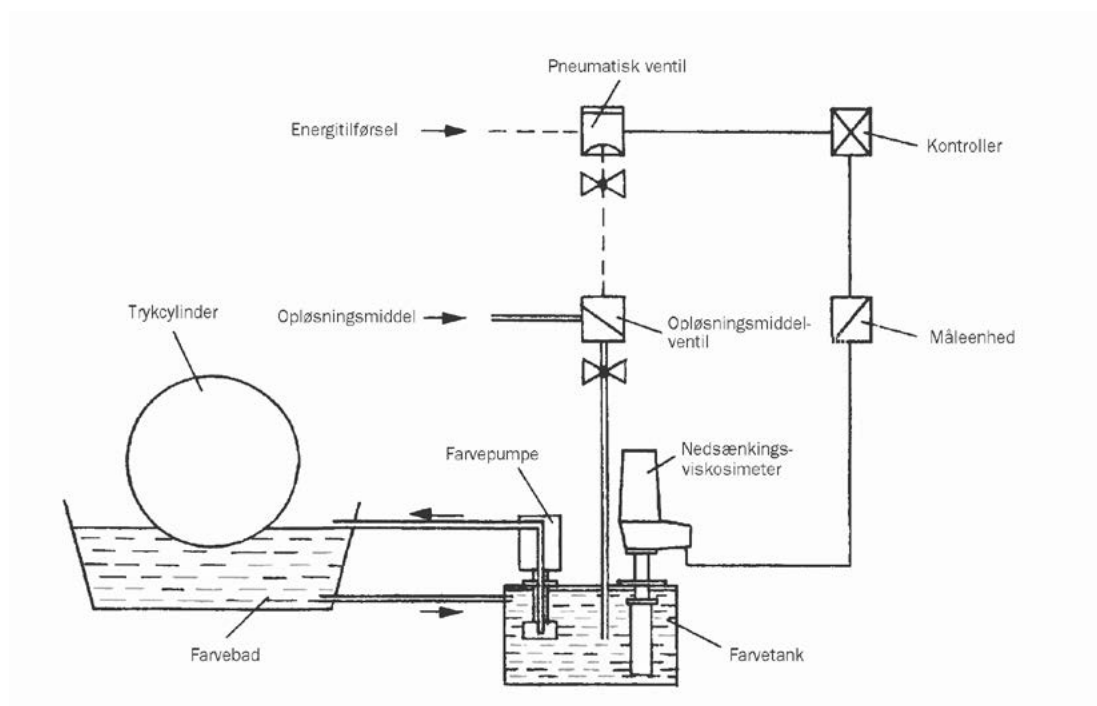


Fig. 12: En dybtryksrotationsmaskines tryksystem

Viskositetsovervågning ved kunstfiberproduktion

Ved fremstilling af Wolpryla-fibre (en PAN-fiber) bestemmes styringen af reaktorerne og andre aggregater af procesviskosimetret. Den kemiske reaktion i reaktoren har stor indflydelse på kvaliteten af produktet.

For spindeprocessen, i hvilken den egentlige fiber fremstilles, har viskositeten afgørende betydning. De optimale flydeegenskaber indstilles derfor i en tyndfilmfordamper efter reaktoren. Ved indsættelse af kontinuerligt arbejdende viskosimetre i et kunstfiberværk får man større indflydelse på kvaliteten af produktet og dermed også på slutproduktet.

Under den årelange brug af procesviskosimetre i et kunstfiberværk i Premnitz frembragte instrumenterne bevis for en mere pålidelig arbejdsmåde og større servicevenlighed.

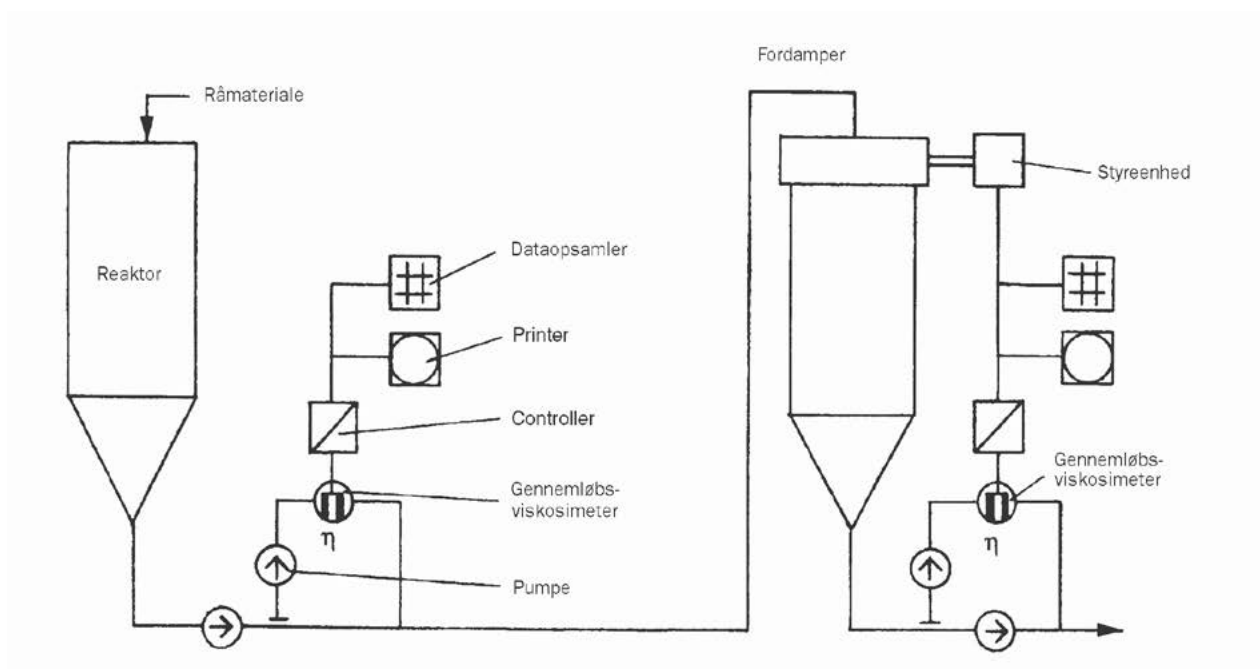


Fig. 13: Viskositetsmåling og kontrol i kunstfiberproduktion

Forædling af chokolademasse

Ved forædlingsprocessen af chokolademasse foregår substansombytningen og strukturomdannelsen samt aromadannelsen i maskiner kaldet "Conche". Her undergår den smuldrede, tørre masse en intensiv forskydningsbehandling og luftning. I slutningen af processen stabiliseres den opnåede struktur af den nu mere flydende masse med en emulgator. Ved tilførelse af fedt (mest kakaosmør) kan de rheologiske egenskaber optimeres til den ønskede værdi.

For at være på den sikre side under den videre forarbejdning sker der ofte et overforbrug af det dyre råstof kakaosmør. Ved brug af industri-viskosimetre til bestemmelse af de rheologiske egenskaber af chokolademassen før og efter restfedttilførelsen kan der spares på råstoffet.

Derudover kan der spares energi ved forkortelse af chokolademassens tid i "Conchen".

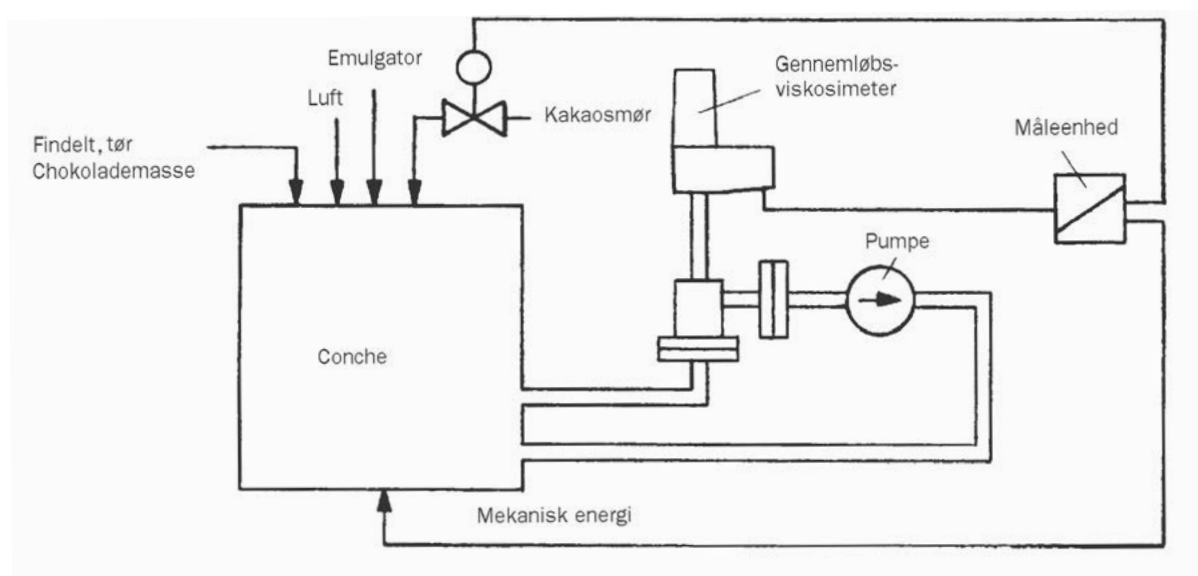


Fig. 14: Kvalitetskontrol af forædling af chokolademasse v.h.a. viskositetsmåling

Checkliste til valg af det bedst egnede viskosimeter

Vigtige parametre for valg af viskosimeter:

- Mediets rheologiske egenskaber
- Stedet, hvor det skal bruges
- Prøvemængde
- Målenøjagtighed
- Databehandling
- Funktionalitet
- Kompatibilitet
- Pris



Service

Vores teknikere tilbyder servicevedligeholdelse og serviceaftaler på alle vores viskosimetre og rheometre. Måling af viskositet er normalt en forholdsvis simpel proces, men kræver at instrumentet kalibreres og efterses årligt for at sikre korrekte måleresultater.

Buch & Holm tilbyder autoriseret service af uddannede teknikere og årlige serviceaftaler med sporbar kalibrering. Vi udfører enten service på stedet, eller

instrumentet kan sendes til service på vores værksted. Ved det årlige eftersyn foretages en kontrolmåling med sporbare standarder og vi adskiller, rens og smører instrumentet. Der vil være en inspektion af ophæng, afbalancering af lejer og ophæng samt eventuel kontrol af temperatur.

Har du spørgsmål, eller ønsker du råd og vejledning vedrørende service, så kontakt Serviceafdelingen på tlf. 44 54 00 00 eller e-mail service@buch-holm.dk



Hos Buch & Holm vil vi gerne bevise vores berettigelse ved at skabe øget værdi for vore kunder. Dette skal vi ganske enkelt gøre ved at levere de bedste produkter og yde den bedste service. Vi lever op til vores mål ved hjælp af velmotiverede medarbejdere, et konkurrencedygtigt produktsortiment med høj forsyningsikkerhed og et stadigt fokus på vidensdeling og øgede kompetencer. Du er altid velkommen til at ringe til os.

BUCH HOLM

Buch & Holm A/S - Marielundvej 39 - 2730 Herlev - tlf.: 44 54 00 00
e-mail: b-h@buch-holm.dk - www.buch-holm.dk