

Stipendiereserapport

Processreologi

Besök på tre institut i Europa:

Lunds Tekniska Högskola,
Avdelningen för Livsmedelsteknik, Sverige

ENSIC-INPL, GEMICO, Nancy, Frankrike

University of Plymouth,
Department of Mathematics and Statistics, England

Annika Hjort
Arla Foods Innovation
2003/2004

Sammanfattning

Genom besök på tre olika institut i Europa som arbetar med processreologi har följande områden studerats:

- Relevanta reologiska data vid dimensionering av processutrustning
- Karakterisering av fruktberedningars flödesbeteende
- Karakterisering av yoghurtens flödesbeteende
- Karakterisering av flödesprofilen hos en strömmande vätska

för att öka kunskapen om flödesbeteendet hos komplexa vätskor och hur flödesbeteendet påverkas i en processlinje.

Karakterisering av flödesbeteende hos vätskor med komplexa reologiska egenskaper sker utifrån uppskattade skjuvhastigheter och aktuella temperaturer i processlinjen. Vid karakterisering av fruktberedning krävs en relevant mätmetod för suspensioner som kan hantera fruktbitar. Mätmetoder för suspensioner har studerats på instituten jag besökte men finns inte kommersiellt. Svårigheten i karakteriseringen av yoghurt ligger i provuttaget på processlinjen eftersom yoghurtens viskositet är tidsberoende.

Innehåll

1	KORT INTRODUKTION TILL REOLOGI.....	3
2	INLEDNING	4
3	BESÖK PÅ AVD. FÖR LIVSMEDELSTEKNIK, LTH, LUND	6
3.1	DISKUSSION GÄLLANDE RELEVANTA REOLOGISKA DATA FÖR DIMENSIONERING AV PROCESSUTRUSTNING	6
3.2	DISKUSSION GÄLLANDE KARAKTERISERING AV FRUKTBEREDNINGARS FLÖDESBETEENDE	8
3.3	DISKUSSION GÄLLANDE KARAKTERISERING AV YOGHURTENS FLÖDESBETEENDE	9
4	BESÖK PÅ GEMICO, NANCY, FRANKRIKE	10
4.1	DISKUSSION GÄLLANDE KARAKTERISERING AV FRUKTBEREDNINGARS FLÖDESBETEENDE	10
4.2	ANNAN MÅTUTRUSTNING	11
4.3	DISKUSSION GÄLLANDE KARAKTERISERING AV YOGHURTENS FLÖDESBETEENDE	11
5	BESÖK PÅ UNIVERSITY OF PLYMOUTH, ENGLAND	11
5.1	DISKUSSION GÄLLANDE KARAKTERISERING AV FRUKTBEREDNINGARS FLÖDESBETEENDE	12
5.2	DISKUSSION GÄLLANDE KARAKTERISERING AV YOGHURTENS FLÖDESBETEENDE	13
5.3	KARAKTERISERING AV FLÖDESPROFILN HOS EN STRÖMMANDE VÄTSKA	14
6	DISKUSSION OCH SLUTSATSER.....	16
7	TACK	16
8	REFERENSER	17

1 Kort introduktion till reologi

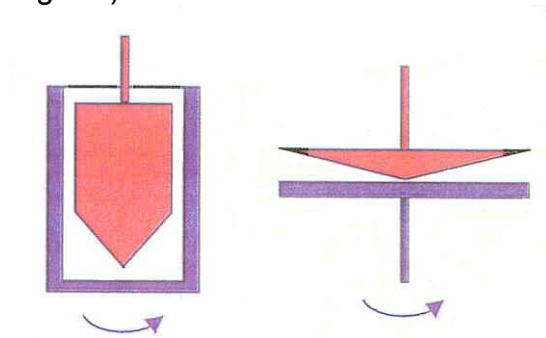
Reologi är läran om materiaens flyt- och deformationsegenskaper. Ordet reologi kommer från det grekiska ordet *rheos* som betyder flyta. Inom livsmedelsindustrin används reologin för att beskriva produkternas konsistens vilken utgörs av viskositet och elasticitet. Viskositeten anger sambandet mellan kraft och deformationshastighet. Begreppet reologi kan beskrivas med viskositetsmätningar, karakterisering av flödesbeteende samt bestämning av materialets struktur^A.

Newtonska vätskor har en konstant viskositet oberoende av skjuvhastigheten som den utsätts för. Newtonska vätskors viskositet är beroende av temperaturen.

Viskositeten hos icke-Newtonska vätskor är både beroende av skjuvhastigheten och temperaturen. De flesta flytande livsmedel är icke-Newtonska skjuvtunnande vätskor vilket betyder att dess viskositet minskar med ökad skjuvhastighet.

För en tixotrop vätska är viskositeten beroende av skjuvhastigheten (skjuvtunnande) men också av tiden vid konstant skjuvning av produkten.

I en sk rotationsviskosimeter kan viskositeten mätas som funktion av skjuvhastigheten. Vanliga mätgeometrier är koncentriska cylindrar och kon/platta (se Figur 1)^B.



Figur 1 Koncentrisk cylinder och kon-platta för mätning av viskositet.

2 Inledning

I mitt arbete med processfrågor på Arla Foods har jag intresserat mig för mejeriprodukters reologiska egenskaper (främst flödesbeteende) och egenskapernas betydelse för val av processutrustning.

För att öka mina kunskaper inom detta område fick jag tack vare Mejeritekniskt Forum möjligheten att göra en studieresa till tre olika institut i Europa som arbetar med processreologi. Professor Ulf Bolmstedt på Avd. för Livsmedelsteknik på LTH tog emot mig i Lund och hjälpte mig att få kontakt med två andra institut i Europa som forskar inom detta område. Huvudämnet som jag önskade studera var *hur vätskor med komplexa reologiska egenskaper påverkas av mekanisk bearbetning*.

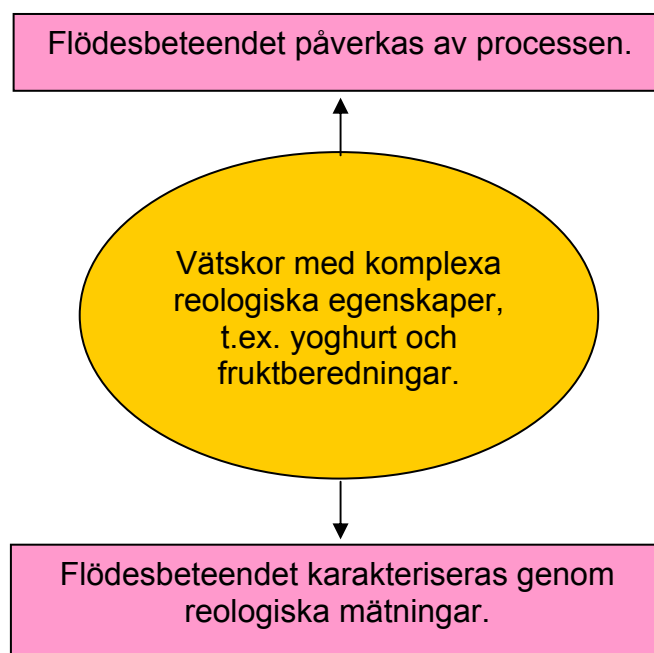
För att tydliggöra denna frågeställning bör man ställa frågorna: *Vad är det som påverkas hos vätskorna? Vad innebär mekanisk bearbetning?*

Svaret på detta är att det är flödesbeteendet hos vätskorna som påverkas i processlinjen i och med den mekaniska bearbetning som vätskan utsätts för i pumpar, ventiler, värmeväxlare etc.

Flödesbeteendet kan karakteriseras genom reologiska mätningar i t.ex. ett koncentriskt cylindersystem där produkten utsätts för ett skjuvhastighetsvep.

Först undersöks vilka skjuvhastigheter, temperaturer etc som är relevanta i aktuell process och sedan karakteriseras vätskans flödesbeteende under dessa förhållanden. Vid pumpning tex, ligger skjuvhastigheten på 100-1000 s⁻¹.

Produkternas flödesbeteende är av största vikt vid dimensionering av processutrustning. I mitt arbete på Arla Foods har behovet av denna kunskap visat sig vara mycket stort i dialogen med leverantörer vid val av processutrustning.



Jag önskade öka min kunskap inom följande områden genom detta stipendium:

- Relevanta reologiska data vid dimensionering av processutrustning.
- Karakterisering av fruktberedningars flödesbeteende.
Bitarnas inverkan på flödesbeteendet? Inverkan av vätskan kring bitarna?
- Karakterisering av yoghurtens flödesbeteende.
- Karakterisering av flödesprofilen hos en strömmande vätska.

I september 2003 besökte jag professor Ulf Bolmstedt på Avdelningen för Livsmedelsteknik på LTH för diskussion av processreologi. Ulf har under flera år väglett mig inom processreologi.

I oktober 2003 reste jag till Nancy i Frankrike för att besöka professor Lionel Choplin på GEMICO (Centre de Génie Chimique des Milieux Rhéologiquement Complexes) som tillhör École Nationale Supérieure des Industries Chimique de Nancy (ENSIC) och Institut National Polytechnique de Lorraine (INPL).

I juni 2004 gjorde jag min avslutande resa till University of Plymouth och Department of Mathematics and Statistics där jag besökte professor Eirian Jones.

Utifrån diskussionerna med professorerna samt litteratur som jag har läst diskuteras i denna rapport vad jag har lärt mig om mina frågeställningar.

3 Besök på Avd. för Livsmedelsteknik, LTH, Lund

På Avdelningen för Livsmedelsteknik vid Lunds Tekniska Högskola bedrivs forskning inom livsmedelsteknik dvs studier av kemiska och fysikaliska förändringar vid förädling av livsmedel. För att öka kunskapen om livsmedelsprocesser och för att kunna förbättra dem studeras strömning, värme- och masstransport. Processerna analyseras experimentellt, teoretiskt och beskrivs med matematiska modeller.



För experimentella försök finns en försökshall i pilotskala med de flesta enhetsoperationerna som förekommer inom livsmedelsindustrin.

Ulf Bolmstedt är professor på Avd. För Livsmedelsteknik och arbetar samtidigt som specialist på Tetra Pak Processing Components, Department of Heat Transfer i Lund.

Ulf Bolmstedt är specialiserad inom reologi, värmeöverföring, indunstning samt programmering och modellering och arbetar i olika forskningsprojekt på LTH och Tetra Pak. Ulf handleder också forskarstudenter och studenter som gör examensarbeten. Ett examensarbete som Ulf nyligen har handlett handlar om förträngning av produkt genom en plattvärmeväxlare. Titeln för examensarbetet är *Analysis and Modelling of the Mixed Phase Distribution in a Food Plate Heat Exchanger^C*.

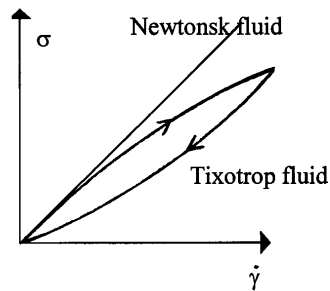
3.1 Diskussion gällande relevanta reologiska data för dimensionering av processutrustning

Vid dimensionering av processutrustning genomförs en reologisk mätning av aktuell produkt för att karakterisera produkten i rörelse. Lämplig mätmetod för detta är ett skjuvhastighetssvep i ett koncentriskt cylindersystem. Prov bör tas direkt från processlinjen varför en portabel viskosimeter som kan tas med ut på anläggningen bör användas. Om prov förpackas och transporteras före mätning kommer de reologiska mätningarna inte att vara relevanta eftersom provet förändras med tiden.

Prov tas så nära den enhet som ska dimensioneras som möjligt. Om t.ex. en värmeväxlare ska dimensioneras ska prov tas ut så nära nuvarande värmeväxlare som möjligt. Provet analyseras vid tre till fem temperaturer beroende på hur stort temperaturspann som hanteras i värmeväxlaren. Vid dimensionering av en pump räcker det oftast med en reologisk mätning vid den temperatur som produkten har då den passerar pumpen.

Vid dimensionering av en UHT-anläggning bör reologiska mätningar genomföras vid en så hög temperatur som möjligt vilket brukar vara kring 90°C. För att reologiska mätningar ska kunna genomföras vid 140°C måste en trycksatt cell användas. Detta är dock inte nödvändigt då proverna brukar vara mer eller mindre Newtonska vid så höga temperaturer.

Då en produkt utsätts för ett skjuvhastighetssvep blir resultatet en svepkurva enligt Figur 2.



Figur 2 Flytkurva för Newtonsk respektive icke-Newtonsk vätska.

Skjuvhastighetssvepet anpassas till Power Law som är ett empiriskt samband mellan skjuvspänningen och skjuvhastigheten.

$$\sigma = K \cdot \dot{\gamma}^n$$

σ = skjuvspänning (Pa)

$\dot{\gamma}$ = skjuvhastighet (s^{-1})

η = viskositet (Pa s)

n = flytindex (-)

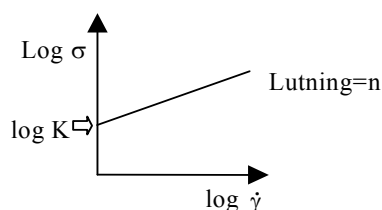
K = konsistensfaktor (Pa s^n)

För en Newtonsk fluid är $n=1$ och $K=\eta$.

Då uttrycket logaritmeras uppkommer följande samband:

$$\text{Log} \sigma = \text{Log} K + n \cdot \text{Log} \dot{\gamma}$$

Ett diagram där logaritmen av skjuvspänningen ritas versus logaritmen av skjuvhastigheten enligt Figur 3 ger en rät linje med lutningen n och en skärningspunkt med y-axeln som är $\log K$. Konstanten K utvärderas vid skjuvhastigheten = $1 s^{-1}$.



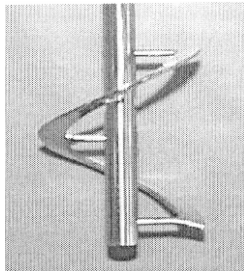
Figur 3 Grafisk metod för att bestämma värdena på n och K .

Vid dimensionering av utrustning används n och K som funktion av temperaturen som indata, $n=f(T)$ och $K=f(T)$.

3.2 **Diskussion gällande karakterisering av fruktberedningars flödesbeteende**

Fruktberedningar är suspensioner (dvs en vätska innehållande fasta partiklar) med en kontinuerlig fas och fasta partiklar i form av fruktbitar/bär. Ett problem med karakterisering av suspensioner är att traditionella reologiska mätsystem (tex platta-platta eller koncentrisk cylinder) har spalter som är så små att de inte tillåter partiklar. Om bitarna tas bort och reologiska mätningar utförs på den kontinuerliga fasen av en suspension så representerar resultatet inte produkten. Det finns dock reologiska mätinstrument som klarar suspensioner inklusive bitar. Dessa mätinstrument kräver dock noggrann kalibrering och validering för varje typ av vätska för att säkra att resultaten är tillförlitliga.

Ett reologiskt mätinstrument som klarar bitar är en mixerviskosimeter, en så kallad *Helical Ribbon Impeller*. En mixerviskosimeter består av en mätkropp med en komplex geometri som roterar i en vätska innesluten i en cylinder. Mixerviskosimetern (se Figur 4) har i ett examensarbete utvärderats för livsmedel genom ett samarbete mellan Avdelningen för kemisk apparatteknik på LTH och Tetra Pak^D.



Figur 4 Mätkropp - Helical Ribbon Impeller (Med tillstånd av Tetra Pak).

Målet var att undersöka mixerviskosimeterns funktion vid viskositetsmätningar på livsmedelssuspensioner. Viskositetsdata ska kunna användas vid dimensionering av processutrustning. Studien gick också ut på att bestämma den högsta tillåtna koncentration av partiklar som mixerviskosimetern kan hantera samt vilken effekt partikelkoncentrationen hade på viskositeten.

Traditionella reologiska mätsystem (tex kon-platta eller koncentrisk cylinder) är väldefinierade geometrier där den skjuvning produkten utsätts för lätt kan beräknas från arean av den yta som skjuvar produkten. Den komplexa geometrin hos mätkroppen i en mixerviskosimeter gör att dessa data inte kan beräknas utan mätkroppen måste kalibreras.

Viskosimetern utvärderades för stärkelselösningar, tomatpuré, soppor, såser etc. Viskosimetern kunde användas för suspensioner med en hög koncentration av partiklar (upp till 40%).

Undersökningen visade att metoden gav mer exakta värden på n och K i Power Law än data som fås fram genom mätningar med traditionella metoder på en vätska från vilken bitarna har tagits bort.

Mixerviskosimetern är inte utvärderad för fruktberedningar men kan vara en möjlig mätmetod.

3.3 Diskussion gällande karakterisering av yoghurtens flödesbeteende

I Tetra Paks bok *Dairy Processing Handbook*^A beskrivs yoghurtprocessen enligt Figur 5. Hur yoghurtens viskositet förändras i processlinjen kan förenklat illustreras enligt Figur 6.

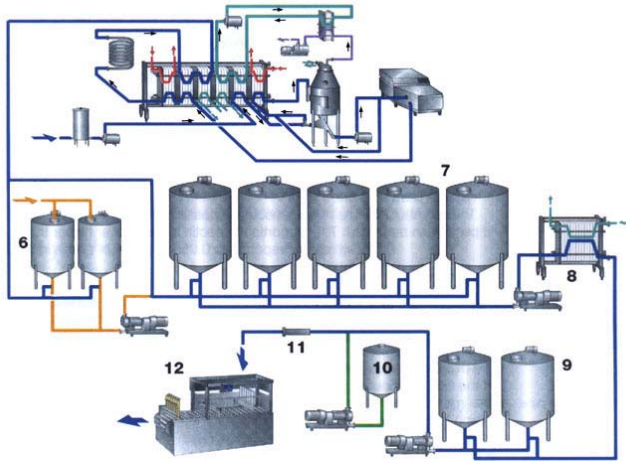


Fig. 11.14 Production line for stirred yoghurt.

Pre-treatment is shown in detail in figure 11.9

- 6 Bulk starter tanks
- 7 Incubation tanks
- 8 Plate cooler
- 9 Buffer tanks
- 10 Fruit/Flavor
- 11 Mixer
- 12 Packaging

- Milk/yoghurt
- Cooling media
- Heating media
- Vapor
- Culture
- Fruit/Flavor

Figur 5 Produktionslinje för rörd yoghurt.

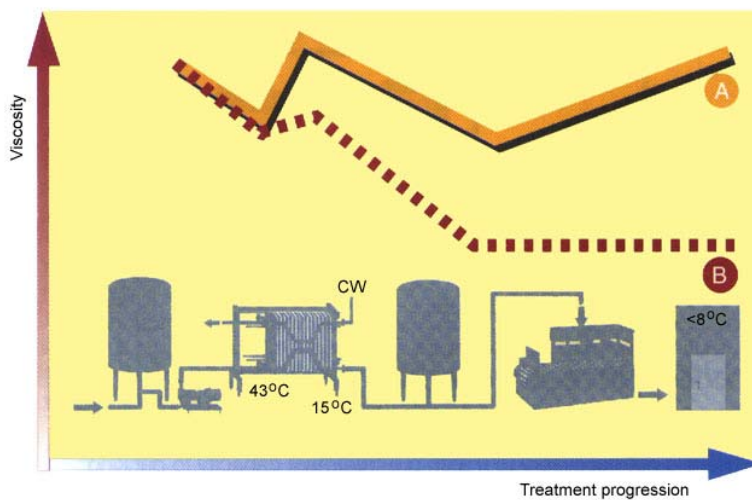


Fig. 11.16 Viscosity development of stirred yoghurt during cooling, packing and storage.

- A Optimum plant design
- B Badly designed plant

Figur 6 Yoghurtens förändring i viskositet i produktionslinjen (kylning, packning, lagring).

Yoghurten är skjuvtunnande och tixotrop. Tixotropi innebär att viskositeten minskar med tiden vid konstant skjuvning pga strukturell nedbrytning av produkten. Därmed är inte bara de skjuvhastigheter som yoghurten utsätts för i processutrustningen viktig utan även tiden i systemet har betydelse för yoghurtens viskositet.

I många fall kan produkten återhämta sig och återfå sin struktur då skjuvningen upphör men i vissa fall bryts strukturen ned irreversibelt.

Vid provuttag av yoghurt på processlinjen påverkas produkten av skjuvningen vid provuttaget (t.ex. genom en provkran) samt av den tid den får vila innan reologisk mätning utförs vilket gör det mycket svårt att få fram relevanta reologiska data.

Det bästa man kan göra är att ta ut ett prov ur en provkran med en öppning lika stor som diametern på röret och att genomföra en reologisk mätning omedelbart efter prouttaget.

4 Besök på GEMICO, Nancy, Frankrike

Institut National Polytechnique de Lorraine (INPL) är en teknisk högskola med åtta olika inriktningar. En av inriktningarna är kemiteknik och institutionen som kemiteknikutbildningen ges på heter École Nationale Supérieure des Industries Chimique de Nancy (ENSIC).



År 1991 bildades Centre de Génie Chimique des Milieux Rhéologiquement Complexes även kallat GEMICO som ett samarbete mellan ENSIC-INPL och fem industriföretag för forskning om komplexa vätskor.

Forskningsområdena är uppdelade i fyra delar:

- Reologi
- Blandning
- Masstransport (geler, porösa partiklar)
- Dispergerade system (emulsioner, suspensioner, pulver)

Till dessa områden utvecklas reologiska mätsystem på GEMICO.

Professor Lionel Choplin är ansvarig för GEMICO och han tog emot mig, berättade om forskningen som bedrivs på institutionen och vi diskuterade mina frågeställningar. Dessvärre fanns vissa konkurrensmässiga hinder för att jag skulle få information om många forskningsområden då ett av de stora franska mejeriföretagen deltar i flera av forskningsprojekten.

4.1 *Diskussion gällande karakterisering av fruktberedningars flödesbeteende*

En typ av mixerviskosimeter, sk *Helical Ribbon Impeller* har utvecklats på GEMICO och denna diskuterades med professor Lionel Choplin. Enligt försök som har gjorts på GEMICO så uppnås viskositet/skjuvhastighetskurvor med *Helical Ribbon Impeller* som överensstämmer perfekt med kurvor som fås från mätningar med kon-platta för ett stort spann av skjuvhastigheter^E. Utvärderingen skedde på sallads dressing, tomatketchup mm. För tomatketchup gav inte traditionella metoder reproducerbara viskositet/ skjuvhastighetskurvor vilket däremot *Helical Ribbon Impeller* gjorde.

Lionel Choplin beskrev att för att kunna använda mixerviskosimetern till fruktberedningar så måste mätutrustningen förses med en större behållare än den de använder idag (cylinderdiameter som är 10-20 gånger större än partikeldiameter). Utrustningen måste därefter kalibreras för denna geometri och för olika typer av vätskor.

4.2 Annan mätutrustning

På GEMICO arbetar man även med sk *Rheo-reactors* som är en utveckling av mixerviskosimetern. Cylindern som provet hålls i kan t.ex. sättas under tryck eller extrema temperaturer för att efterlikna någon specifik batchprocess. En Rheo-reactor kan användas för att karakterisera ett reaktionsförlopp, ett blandningsförlopp etc. Reaktorn kan förses med bafflar och olika typer av omrörare. Konduktiviteten, temperatur, skjuvspänning och skjuvhastighet kan mätas i reaktorn.

4.3 Diskussion gällande karakterisering av yoghurtens flödesbeteende

Ett forskningsarbete kring modellering av yoghurtens viskositet i processlinjen pågår på GEMICO. Detta är mycket svårt eftersom yoghurtens viskositet ofta varierar från batch till batch. Information kring forskningsprojektet är konfidentiell.

5 Besök på University of Plymouth, England

University of Plymouth har mer än 23 000 studenter vilket gör det till ett av de största universiteten i England. Universitetet har sju olika fakulteter vilka omfattar en rad olika ämnesområden. En av de sju fakulteterna på universitetet, Faculty of Technology är uppdelad i sex olika avdelningar och jag besökte en av dem, Department of Mathematics and Statistics. Professor Eirian Jones tog emot mig, visade mig runt på avdelningen, gav mig inblick i avdelningens forskning och vi diskuterade de frågeställningar som jag hade med mig.



På Department of Mathematics and Statistics arbetar man med forskning och konsultuppdrag inom en rad olika områden. Resultaten från forskningen publiceras i tidskrifter och presenteras på nationella och internationella konferenser. Aktuella forskningsområden är bla reologi och fluidmekanik vilka är relevanta forskningsområden för mina frågeställningar.

Ett exempel på konsultuppdrag inom livsmedelssektorn som Department of Mathematics and Statistics har arbetat med är en analys av hur konservburkar innehållande en vätska ska förflyttas i en cirkelbana för att uppnå omblandning i konservburken under värmebehandlingen^{F,G}. Konservburken innehåller 90% vätska och 10% luft. Studien visade att vid en viss rotationshastighet och en viss position kommer luftbubblan i konservburken att röra sig genom vätskan vilket förbättrar omblandningen avsevärt.

Ett exempel på ett industrisamarbete (sk LINK-projekt) som Department of Mathematics and Statistics deltar i är *projektet "Maintaining the quality of medium to high viscosity foods during heat recovery in counter current heat exchangers"*. Projektets mål är att utveckla en ny typ av tubvärmväxlare för viskösa produkter i vilken värmeåtervinning sker genom att kall oprocessad produkt passerar genom tuben och varm processad produkt kyls motströms på mantelsidan. Vinsten med

detta är minskade energikostnader, minskad kylvattenförbrukning mm^{H} . Tetra Pak är ett av företagen som deltar i projektet med Ulf Bolmstedt som aktiv deltagare.

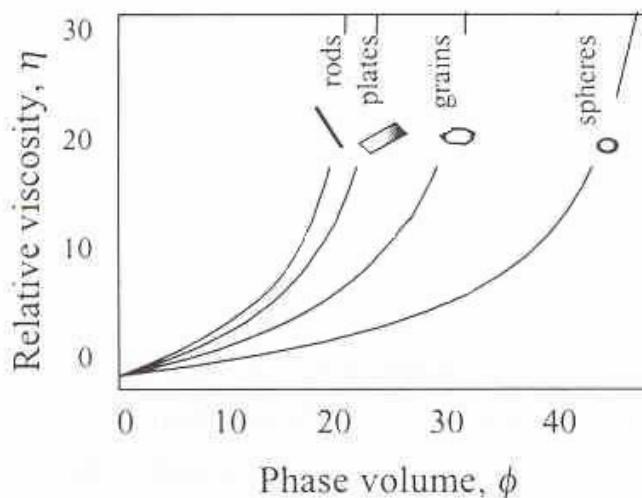
5.1 *Diskussion gällande karakterisering av fruktberedningars flödesbeteende*

Fruktberedningar ser väldigt olika ut beroende på vilken typ av frukt/bär den innehåller och hur mycket frukt/bär beredningen innehåller.

Flödesbeteendet hos en suspension beror på följande parametrar:

- Densiteten hos den kontinuerliga fasen
- Densiteten hos partiklarna
- Partiklarnas möjlighet till deformation
- Koncentrationen av partiklar
- Krafter mellan partiklarna
- Storleken på partiklarna
- Formen på partiklarna

Viskositeten hos en suspension ökar ju fler partiklar som adderas till vätskan. Den viskositetshöjande effekten med avseende på partikelformen följer ordningen: *stavar*>*plattor*>*kuber/korn*>*sfärer* då samma totalvolym av partiklar adderas till en vätska¹ (se Figur 7).

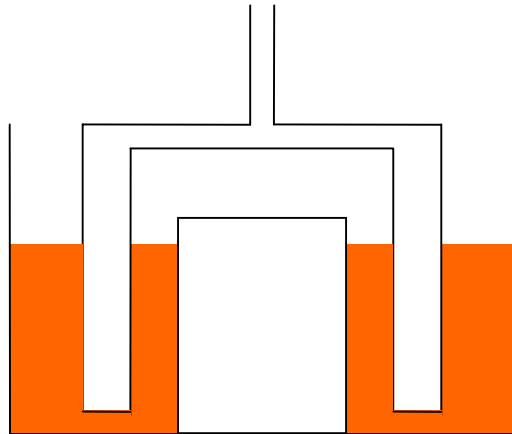


Figur 7 Viskositet som funktion av dispergerad partikelvolym för olika partikelformer.

Detta kan relateras till fruktberedningar där jordgubbsbitar har formen av kuber/sfärer vilket ger en mindre viskositetsökning än t.ex. apelsinfibrer då samma totalvolym av partiklar adderas till fruktberedningen.

Suspensioners flödesegenskaper är svåra att förutspå pga att ansamlingar av partiklar kan uppstå vilket ger en inhomogen produkt vars flödesegenskaper inte kan förutspås.

Department of Mathematics and Statistics har liksom GEMICO i Nancy arbetat med en reologisk mätmetod som klarar partiklar. På Department of Mathematics and Statistics har man inom ovan nämnda LINK-projekt arbetat med en sk wide-gap concentric cylinder för reologiska mätningar på suspensioner.



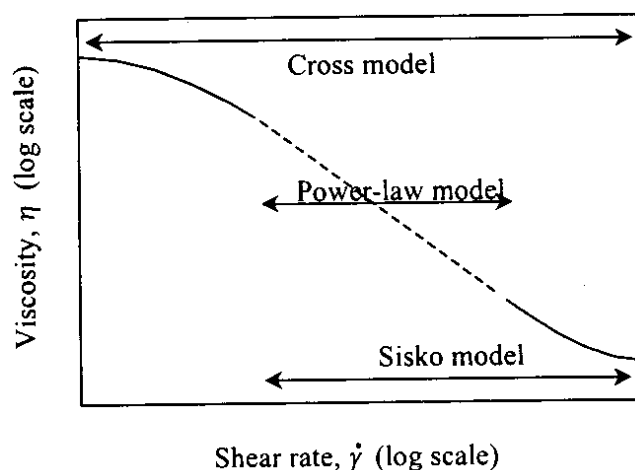
Figur 8 Double concentric cylinder - wide gap.

Wide-gap systemet är utvecklat för att kunna karakterisera en del av de komplexa vätskor som används i LINK-projektet. Metoden skulle kunna vara användbar för reologiska mätningar på fruktberedningar.

5.2 Diskussion gällande karakterisering av yoghurtens flödesbeteende

När man utsätter t.ex. en yoghurt för ett skjuvhastighetssvep och anpassar kurvan till Power Law är det viktigt att notera att Power Law inte gäller i hela skjuvhastighetsspannet.

Det finns andra modeller som gäller vid låga och höga skjuvhastigheter.



Figur 9 Olika modeller inom olika intervall av skjuvhastigheter.

Power Law gäller inte vid skjuvhastigheten = 0 s^{-1} eftersom viskositeten då är oändlig enligt härledning nedan:

$$\sigma = K \cdot \dot{\gamma}^n$$

$$\eta = K \cdot \dot{\gamma}^{n-1}$$

$$\eta = \frac{K}{\dot{\gamma}^{1-n}}$$

$$\dot{\gamma} = 0 \Rightarrow \eta = \infty$$

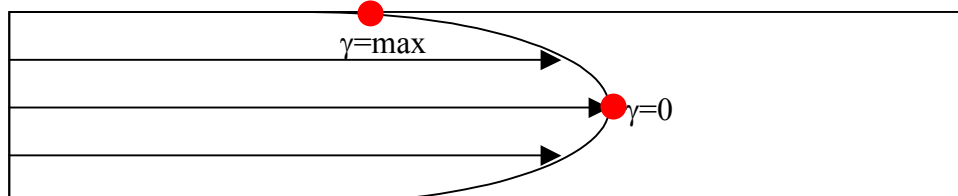
Skjuvhastigheter i processlinjen kan uppskattas för att uppmätta data ska kunna relateras till aktuella skjuvhastigheter i processen.

Vid analys av viskositetsdata är det viktigt att fundera på om man är intresserad av *Start-up viscosity* eller *Equilibrium viscosity*. Dessa viskositeter mäts genom skjuvning av produkten vid konstant skjuvhastighet. *Start-up viscosity* är viskositeten då produkten precis har börjat flyta, t.ex. vid tömning av en tank och *Equilibrium viscosity* är den stabila viskositet som uppnås efter en viss tids skjuvning av en skjuvtunnande vätska.

Skjuvhastigheterna i ett rör varierar över rörtvärsnittet varför där förekommer en rad olika viskositeter i vid rörströmning av tex yoghurt.

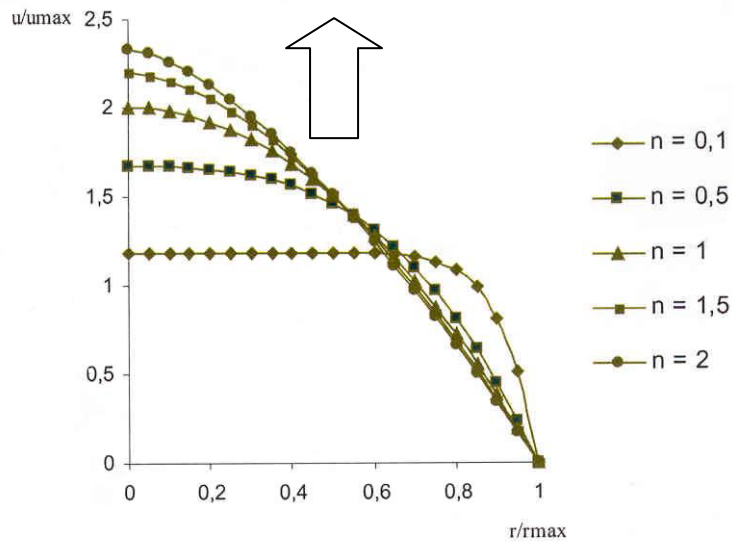
5.3 Karakterisering av flödesprofilen hos en strömmande vätska

För en vätska som strömmar laminärt i ett rör är skjuvhastigheten maximal vid röväggen och lika med noll i centrum av röret (se Figur 10).



Figur 10 Skjuvhastigheter vid laminar strömning i ett rör.

För en vätska som följer Power Law kan flödesprofilens utseende beskrivas med Figur 11^C. För en Newtonsk fluid ($n=1$) har flödesprofilen formen av en parabel. För en skjuvtunnande vätska ($n<1$) är flödesprofilen mer platt pga att viskositeten är högre i mitten av röret där skjuvhastigheten är låg^J.



Figur 11 Flödesprofiler för Power Law-vätskor.

Flödesprofilen ovan gäller om inget slip-flow förekommer i röret. Slip-flow innebär att det bildas ett smörjande lager mellan produkten och rörväggen vilket gör att produkten glider på rörväggen.

Det smörjande lagret för en suspension kan beskrivas som ett skikt utan partiklar med en bredd på ca halva partikelradien. Detta betyder att "smörjningseffekten" är större för suspensioner med stora partiklar!

6 Diskussion och slutsatser

Min studie omfattar svåra frågeställningar och jag har under resornas gång fått erfara att det inte finns svar på alla frågor. Vid mötet på GEMICO i Nancy visade det sig att arbete pågår inom flera av mina intresseområden men många av resultaten är konfidentiella pga att studierna görs i samarbete med ett franskt mejeriföretag.

Vid karakterisering av vätskor med komplexa reologiska egenskaper är det viktigt att provuttag sker så att provet är representativt och att mätning sker vid relevanta skjuvhastigheter och temperaturer.

Det pågår forskning kring reologisk karakterisering av suspensioner (tex fruktberedningar) men ingen av de metoder inklusive mjukvara som jag fick presenterade för mig finns kommersiellt. Det ska också poängteras att flödesbeteendet hos suspensioner inte är en exakt vetenskap då en fas (kontinuerlig fas) flyter och den andra fasen (partiklarna) inte gör det. Vid reologisk mätning på fruktberedning bör man utföra mätningar på hela fruktberedningen med partiklar då mätning på enbart den kontinuerliga fasen inte representerar produkten. Helical Ribbon Impeller och/eller Wide-gap concentric cylinder skulle kunna användas för reologiska mätningar på fruktberedningar men det kräver metodutvecklingsarbete.

Flödesbeteendet hos en fruktberedning påverkas av en rad olika parametrar gällande partiklarna i suspensionen så som partikeldensitet, koncentration av partiklar, partikelform, partikelstorlek men modellering av detta finns inte.

Karakterisering av yoghurtens flödesbeteende försvåras av att yoghurten är tixotrop och därmed förändras med tiden. Tiden från provuttag till mätning är därmed mycket viktig. Vid provuttag skjuvas yoghurten vilket kan påverka resultatet vid reologisk mätning. Yoghurtens reologiska egenskaper varierar dessutom en del från batch till batch varför en korrekt modellering av dess flödesbeteende är nästan omöjlig.

Flödesprofilen hos en strömmande vätska som följer Power Law kan karakteriseras utifrån n-värdet.

Mina studier inom processreologi är av intresse för svensk mejeriindustri då kunskap om karakterisering av mejeriprodukters flytegenskaper är av stor betydelse vid val av rätt processutrustning.

7 TACK

Tack till Mejeritekniskt Forum som har möjliggjort mina stipendieresor.

Jag vill också rikta ett stort tack till professor Ulf Bolmstedt som har givit mig mycket kunskap om processreologi. Ulf skapade möjligheten för mig att träffa professor Lionel Choplin och professor Eirian Jones vilka jag också vill tacka för intressanta diskussioner och ett vänligt bemötande.

Sist men inte minst ett stort tack till Willy Larsson på Arla Foods som har stöttat mig i arbetet med stipendieresorna.

8 Referenser

- ^A Gösta Bylund, *Dairy Processing Handbook*, Tetra Pak Processing Systems AB, Lund, 1995.
- ^B Mats Stading, Reologiskolan Del 1: Viskositet, Livsmedelsteknik 4/02.
- ^C S. Hallgren, J. Lindqvist, *Analysis and Modelling of the Mixed Phase Distribution in a Food Plate Heat Exchanger*, Dept. of Food Engineering, Lund University, 2002.
- ^D I. Eriksson, U. Bolmstedt, A. Axelsson, *Evaluation of a helical ribbon impeller as a viscosity measuring device for fluid foods with particles*, Appl. Rheol. 12, (2002), sid. 303-308.
- ^E Abdellatif Ait-Kadi, Philippe Marchal, Lionel Choplin, Anne-Sophie Chrissemant, Mosto Bousmina, *Quantitative Analysis of Mixer-Type Rheometers using the Couette Analogy*, The Canadian Journal of Chemical Engineering, Volume 80, December 2002.
- ^F J. P. Hughes, T. E. R. Jones, P. W. James, *Numerical simulation and experimental visualization of the isothermal flow of liquid containing a headspace bubble inside a closed cylinder during off-axis rotation*, Trans IChemE, Vol 81, Part C, June 2003.
- ^G P. W. James, J.P. Hughes, T. E. R. Jones, *Numerical and experimental simulation of the flow in rotating containers*, NAFEMS International Journal of CFD case studies, Volume 3, July 2001.
- ^H http://www.defra.gov.uk/research/LINK/publications/newsletters/foodlink/FoodLink_Issue37.pdf (sid. 5).
- ^I Howard A. Barnes, *A handbook of elementary Rheology*, Institute of Non-Newtonian Fluid Mechanics, University of Wales, 2000.
- ^J Flow programme, Flow measurement Guidance Note no. 36, *Non-Newtonian Flowmetering*, University of Liverpool, Dec 2002.