

Reologiskolan del 2: Visckoelasticitet

Såsen skär sig, smöret smälter och marmeladen stelnar i processen. Detta är exempel på reologiska förändringar som bäst beskrivs i visckoelastiska termer.

MATS STADING

I första delen av reologiskolan beskrevs vad viskositet är och hur den används. Tyvärr kan inte viskositet användas för att beskriva vad som händer när något smälter eller stelnar, eftersom viskositeten är oändlig för ett fast material. Vi får då istället använda dynamiska storheter som modul och fasvinkel för att beskriva konsistens och karaktär.

Studslera

Om vi börjar med ett exempel som säkert många har lekt med – studslera – så är det ett typiskt material, som inte kan beskrivas helt genom dess viskositet eller elasticitet. Den kan formas och långsamt dras ut långa trådar. Rullas den till en boll studsar den som en gummiboll.

Studslera likaväl som många livsmedel – t ex marmelad, majonnäs, margarin – är material, som både är viskösa och elastiska, alltså visckoelastiska. För dessa behövs den komplexa modulen, vilken i skjuvning betecknas G^* . Den kan delas upp i två delar, lagringsmodulen G' som beskriver de elastiska egenskaperna, och G'' , förlustmodulen som beskriver de viskösa egenskaperna. Men vad är egentligen en modul?

Många moduler

Det finns en uppsjö olika moduler och för ett elastiskt material kan man säga att modulen beskriver styvheten hos materialet. Fjäderkonstanten är en typisk modul. Den



Mats Stading demonstrerar hur studslera flyter.

beskriver vilken kraft som behövs för att dra ut en fjäder en bestämd sträcka, alltså kraft delat med längd.

Samma sak gäller för den komplexa modulen, fast man använder istället kraft per ytenhet delat med dimensionslös deformation (se formelrutan). Modulen kan mätas på olika sätt och ett av de vanligare visas i figur 1. Man håller sitt visckoelastiska material i en kopp och sänker ned en koncentrisk cylinder (kallas "bob") i materialet. Koppen oscilleras i en sinusformad rörelse och kraften som materialet överför mäts med den koncentrisk cylinder. Kraften blir också sinusformad med samma frekvens som på koppen, men förskjuten i förhållande till rörelsen.

Förskjutningen mäts som en fasvinkel och varierar beroende på materialets karaktär. Ett helt elastiskt material, som stål, har ingen förskjutning alls och fasvinkeln $d=0^\circ$ medan en vätska har maximal förskjutning och $d=90^\circ$. Den pålagda deformationen, den uppmätta kraften och förskjutningen används för att beräkna lagringsmodulen och förlustmodulen.

Bestämna karaktär

Visckoelastiska mätningar vid olika frekvenser kan användas för att bestämma karaktären hos ett material på motsvarande sätt som optiska spektrum används i spektrofotometri. Ett mekaniskt spektrum för studslera visas i figur 2.

Modulerna varierar kraftigt med frekvensen, vilket väl beskriver hur man upplever studsleran, när man leker med den. Låga frekvenser motsvarar att man långsamt kan dra ut långa trådar av studsleran. Förlustmodulen som beskriver de viskösa egenskaperna är då mycket större än lagringsmodulen – studsleran uppför sig alltså som en trögflytande vätska. Vid höga frekvenser är lagringsmodulen mycket större än förlustmodulen och studsleran uppför sig elastiskt och studsar. Studsen är snabb och motsvarar en hög frekvens.

Karaktärisera övergångar

Visckoelastiska mätningar passar även bra för att karaktärisera övergångar som smältning, kristallisation och gelbildning. Modulerna mäts då vid en enskild frekvens samtidigt som andra parametrar ändras, som t ex temperatur eller pH.

Om vi tar kokning av ägg som exempel, så övergår äggvitan från vätska till fast material när temperaturen ökar. Precis samma sak kan vi göra i reometern i figur 1. Vi håller äggvitan i koppen och mäter den komplexa

Formelruta
$G^* = \text{komplex skjuvmodul} \left[\frac{N}{m^2} = \frac{N}{m^2} = Pa \right]$
$G' = \text{lagringsmodulen} [Pa]$
$G'' = \text{förlustmodulen} [Pa]$
$G^* = G' + jG'', j^2 = -1$
$\tan \delta = \frac{G''}{G'}$
δ har enheten [°], eller vanligare [radianer] när frekvensen uttrycks i vinkelfrekvens ω
$\omega = 2\pi f$ där f är frekvensen i [Hz]

modulen samtidigt som vi ökar temperaturen. Albuminet i äggvitan kommer då att aggregera och bilda en gel i mätkoppen när temperaturen är tillräckligt hög.

Samma sak gäller för många andra proteiner. I figur 3 visas hur proteinet β -laktoglobulin från vassle bildar gel när temperaturen ökas. (Notera att G' och d visas. Man behöver två parametrar för att beskriva ett viskoelastiskt material, men vilka två som väljs är godtyckligt.)

Vid låg temperatur är β -laktoglobulinlösningen en vätska, vilket visas av den höga fasvinkeln. Lösningen har låg viskositet varför mätsignalen är brusig. När temperaturen ökas aggregerar proteinet och G' ökar samtidigt som d minskar, dvs karaktären hos lösningen går från vätska mot ett mer elastiskt material. Detta sker i två steg och vid 75° ökar G' drastiskt när proteinet denaturerar.

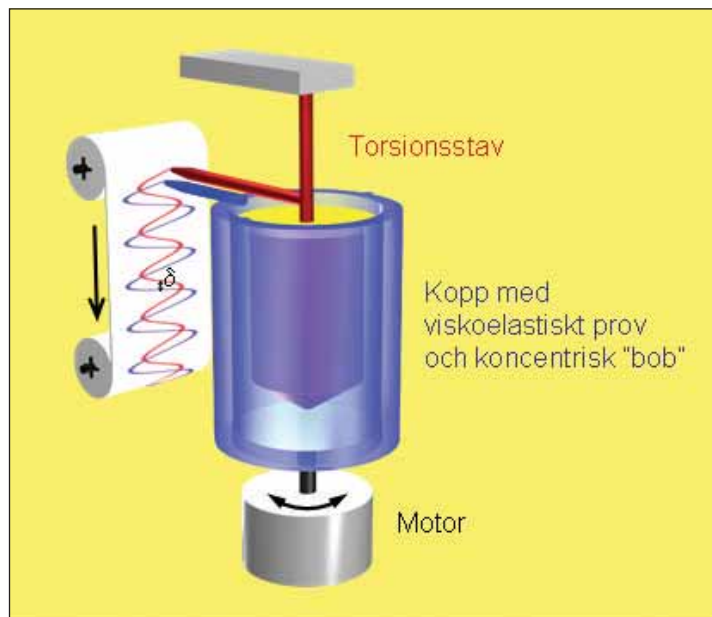
Liten deformation

En fördel med viskoelastiska mätningar är att man deformerar sitt material ytterst lite, bara så mycket som krävs för en mätning, men ändå så lite att materialet inte förändras. Man kan på så sätt göra upprepade mätningar på samma prov och följa förändringarna som sker. Den använda deformationen måste dock testas ytterst noggrant så inte materialet påverkas. I mätningen i figur 3 användes en deformation $g=10$ upphöjt till -3 vilket motsvarar en maximal rörelse av 8 mm. Om man ökar rörelsen 30 mm, vilket fortfarande är en ytterst liten deformation, förstörs den första strukturen som bildas och den slutliga lagringsmodulen blir sex gånger mindre! Det är alltså ytterst viktigt att man använder en tillräckligt liten deformation.

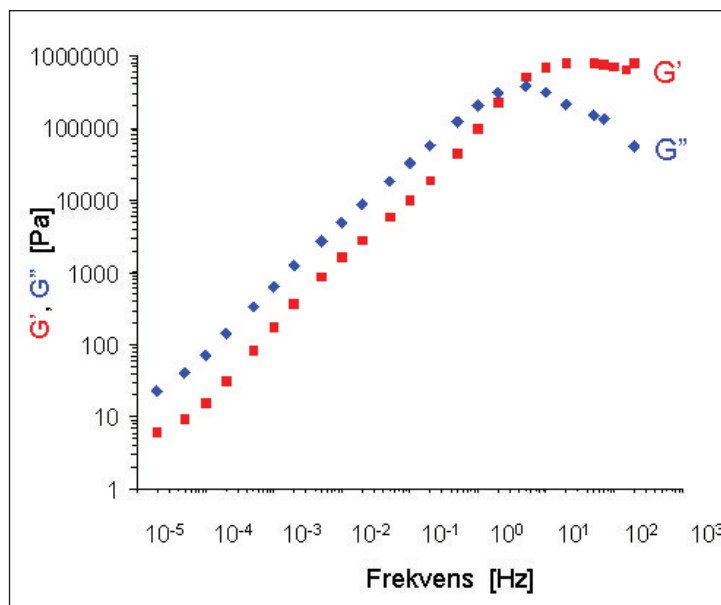
Studslera och rena proteinlösningar kanske verkar långt från verkliga livsmedel, men samma metoder används för att karakterisera hur såsen skär sig eller när smöret smälter. Rena, enkla system är dock tydligare som exempel, men ett mekaniskt spektrum för marmelad eller yoghurt är minst lika intressant som för studslera.

Vidare läsning

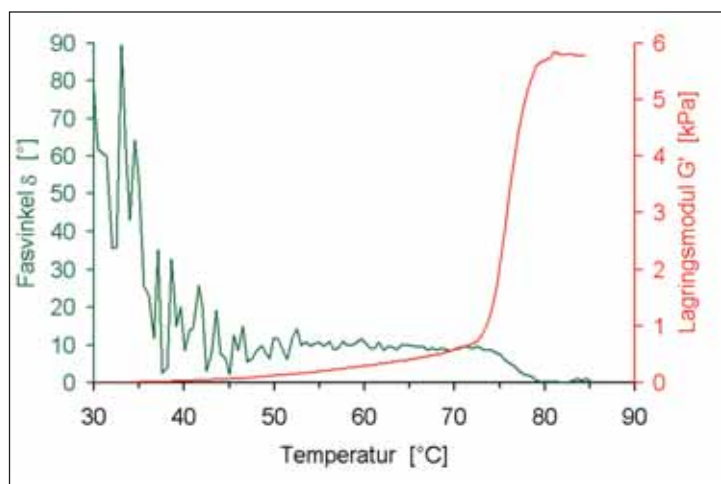
- "An Introduction to Rheology" by H.A. Barnes, J.F. Hutton and K. Walters (1989) Elsevier Amsterdam, ISBN 0-444-87140-3
- "Rheology Principles, measurements and applications" (1994) Macosco, C. W., VCH Publishers, New York, ISBN 1-56081-579-5



Figur 1. Principskiss för en reometer vid viskoelastiska mätningar.



Figur 2. Mekaniskt spektrum för studslera. Vid låga frekvenser dominerar G'' och studsleran uppträder som en trögflytande vätska. Vid höga frekvenser dominerar G' och studsleran uppträder som en elastisk-studsboll.



Figur 3. Gelbildning av proteinet β -laktoglobulin följt med viskoelastiska mätningar vid 1 Hz. (Stading och Hermansson, 1990).