

# Élelmiszerek reológiai sajátságai és mérésük alapelvei\*

L Á S Z T I T Y R A D O M I R

Műszaki Egyetem, Biokémiai és Élelmiszertechnológiai Tanszék, Budapest

## 1. Néhány bevezető gondolat

A kémiai összetétel, a mikrobiológiai állapot, a szín és aroma mellett az élelmiszerek többségénél fontos szerepet játszanak a minőség elbírálásában a reológiai tulajdonságok is. Sok esetben a reológiai sajátságok döntőek lehetnek. Elég ebből a szempontból megemlíteni olyan élelmiszereket, mint a vaj, sajt, margarin, sütőipari termékek, joghurt, méz, csokoládé, dzsem stb. Előbbiekre vezethető vissza, hogy az élelmiszertudomány az utóbbi évtizedekben nagy figyelmet szentel ezeknek a kérdéseknek.

A területen folyó kutatómunka főbb irányai az alábbiakban foglalhatók össze:

- az élelmiszerek minősége és a fogyasztói igények szempontjából optimális reológiai sajátságok megállapítása,
- olyan technológiai eljárások kidolgozása, amelyek biztosítják az optimális kolloidikai reológiai sajátságokat,
- az optimális reológiai tulajdonságok megőrzése a tárolás alatt,
- megfelelő laboratóriumi és üzemi mérési és értékelési módszerek kidolgozása az élelmiszermínőség ellenőrzése és biztosítása érdekében.

A fogyasztók igényeinek megfelelő élelmiszerek előállítása, a reológiai sajátságok szabályozásának szükségessége, feltétlenül igényli a reológiai tulajdonságokat befolyásoló tényezők beható vizsgálatát. E tényezők közül alapvetően kettőt lehet kiemelni: a kolloidikai sajátságokat és az élelmiszerek kémiai összetételét. Sok esetben a kémiai sajátságok és a reológiai tulajdonságok közötti összefüggés nem közvetlen, mivel gyakran egyéb tényezők (kolloidikai, strukturális stb.) ezt befolyásolják. Ezért nem vonhatók le közvetlen következtetések az élelmiszerek reológiai tulajdonságaira a bruttó összetételi adatok (víz, fehérje, szénhidrát, zsirtartalom) alapján. Példaként említem meg, hogy a hús és a vér bruttó kémiai összetétele között (lásd I. táblázat) alig van különbség, ugyanakkor reológiai szempontból teljesen eltérő rendszerekről van szó. Más esetekben, így például egy folyékony élelmiszereknél nagyon jó korrekció található egyes összetételi adatok és a viszkózus (plasztikus) sajátságok között. Megemlítem pl. a tejet, gyümölcsleveket, mézet, csokoládémasszát.

Összességében az mondható el, hogy reológiai szempontból az élelmiszerek legtöbbször bonyolult rendszereket képeznek, ezért a sajátságok leírása, mérése gyakran jelent nehéz feladatot. Az ezzel összefüggő kérdések taglalása előtt néhány reológiai alapkérdést kívánok áttekinteni.

\* A III. Nemzetközi Élelmiszeralitikai Módszertani Szimpoziumon angol nyelven elhangzott előadás. Szentendre 1975. X. 8–11.

A hús és a vér átlagos kémiai összetétele %-ban

Alkotórész	Hús (sovány)	Vér (sertés)
Víz .....	75%	79,0
Fehéjiek .....	20,1	18,9
S-énhidrátok .....	0,3	0,1
Lipidek .....	3,0	0,1
Egyéb komponensek .....	1,6	1,5

## 2. Néhány reológiai alapismeret

A reológia általános fogalmazásban a fizikának az a része, amely a testben végbemenő alakváltozásokkal, deformációkkal foglalkozik. Szűbebb értelemben reológiának nevezzük az anyagok folyásával foglalkozó tudományt. Az általános és egyben az élelmiszertudományi gyakorlatban is többé-kevésbé az utóbbi értelmezést fogadják el. Ennek megfelelően az élelmiszereológia elsősorban azon anyagokkal foglalkozik, amelyek a klasszikus mechanika testei között sajátosságait tekintve a szilárd anyagok és az ideális folyadékok között helyezkednek el. Ezeknek az ún. reológiai testeknek a helyzetét jól szemlélteti a 2. táblázat, amely *Reiner*-től származik. A testekre ható erőket osztályozni lehet aszerint, hogy egyenlően hatnak-e a tér minden irányába (hidrosztatikus erő, légnyomás stb.), vagy a térirány szerint változóak (nyíró, húzó, hajlító erők).

2. táblázat

A reológiai testek helyzete a klasszikus mechanika többi testei között (*Reiner* szerint)

A test megnevezése		Szilárd			Folyadék	
		Euklidesi	Hooke		Newtoni	Pascali
Reológiai egyenlet	Izotróp nyomás	$\varepsilon_V \equiv 0$	$P = \chi \varepsilon_V$	Reológiai testek	$P = \chi \varepsilon_V$	$\varepsilon_V \equiv 0$
	Nyírás	$\varepsilon_T \equiv 0$	$\tau = E \varepsilon_T$		$\tau = \eta \dot{\varepsilon}'_T$	$\tau \equiv 0$
Jellemző állapotok .....		$\infty \leftarrow \chi$ $\infty \leftarrow E$			$\chi \rightarrow \infty$ $\eta \rightarrow 0$	

A táblázatban szereplő betűjelzések:  $\varepsilon_V$  = térfogatdeformáció,  $\varepsilon_T$  = tangenciális erő hatására létrejövő deformáció,  $P$  = nyomás,  $\tau$  = nyírófeszültség,  $\chi$  = összenyomhatóság modulusz,  $E$  = nyírórugalmassági modulusz,  $\eta$  = viszkozitás,  $\dot{\varepsilon}'_T$  = sebességgradiens.

Az előbbieket izotróp, az utóbbiakat anizotróp erőknek nevezzük.

Az izotróp erők alávetett testeknél minden esetben reverzibilis térfogatváltozás következik be. Ezt a törvényt a reológia első axiomájának is szokták nevezni.

Mivel a gyakorlat szempontjából sokkal nagyobb fontossággal bírnak az anizotróp erők hatására fellépő alakváltozások, ezért ezeket részletesebben tárgyaljuk.

Az anizotróp erők hatására létrejövő alakváltozás jellege szerint a testeket a következőképpen csoportosíthatjuk:

a) *Elasztikus testeknek* nevezzük azokat a testeket, amelyeknek alakváltozása reverzibilis és sztatikus egyensúly alakul ki a deformáció során. Ezeknek a testeknek az alakváltozása az *elasztikus deformáció*.

b) A *viszkózus testek* alakváltozása *irreverzibilis*, az alakváltozás állandó erők hatására folytonosan előre halad, dinamikus egyensúly áll be. Az alakváltozás sebessége állandó értéket vesz fel. Az idetartozó testek alakváltozása a *folyás*.

c) A *plasztikus testek* alakváltozása irreverzibilis, a deformáció állandó erők hatására folytonosan előre halad, azonban a változás előrehaladása során nem áll be a dinamikus egyensúly, az alakváltozás sebessége növekszik. A testeknek ez a fajta alakváltozása a maradó vagy *irreverzibilis plasztikus deformáció*.

Az elasztikus és plasztikus deformációt, továbbá a folyást a testek reológiai jellemzőjének tekintjük. Az olyan testeket, amelyek a fő reológiai tulajdonságoknak csak egyikével rendelkeznek, *ideális reológiai testeknek* nevezzük.

A gyakorlatban előforduló anyagok között ezen feltételeket kielégítő sajátosságú testeket nem találunk. A valóságban található „*reális*” testek lényegében az összes reológiai alaptulajdonságokkal rendelkeznek. Bizonyos körülmények és feltételek mellett azonban előfordulhat, hogy e sajátságok egyike, vagy másika elhanyagolhatóan kicsiny és így a testek megközelíthetik az ideális reológiai testek tulajdonságait. (Ezt a tényt a reológia második axiómája fejezi ki, amely kimondja, hogy a valóságban minden anyagi test, bár változó mértékben, az összes reológiai alaptulajdonságokkal rendelkezik.)

A testek kvantitatív reológiai jellemzésére a reológiai egyenletek szolgálnak, amelyek összefüggést adnak a deformáló feszültség és a deformáció mértéke között.

Ideális reológiai testekre az alábbi általános összefüggések (reológiai egyenletek) érvényesek:

$$\tau = G\dot{\epsilon} \quad (\text{elasztikus test}) \quad (1)$$

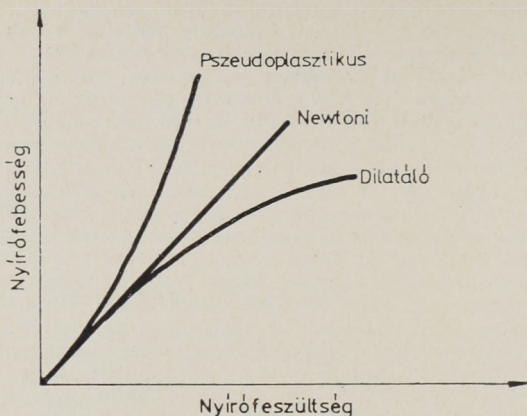
$$\tau = \tau_h \quad (\text{plasztikus test}) \quad (2)$$

$$\tau = \eta\dot{\epsilon} \quad (\text{viszkózus test}) \quad (3)$$

ahol  $\tau$  nyírófeszültség  
 $G$  nyírórugalmodulus  
 $\eta$  viszkozitás  
 $\tau_h$  határfeszültség  
 $\epsilon$  deformáció  
 $\dot{\epsilon}$  deformációsebesség

Gyakorlati szempontból elsősorban az (1) és (3) összefüggés jelentős, utóbbit grafikusán az 1. ábra szemlélteti. Az ideális elasztikus (Hooke-test) és ideális viszkózus (newtoni folyadék) testek mellett igen gyakoriak az olyan anyagok, amelyeknél a nyírófeszültség-deformáció (ill. nyírófeszültség-nyírósebesség) összefüggés nem lineáris (nem ideális elasztikus test; általánosított „newtoni”, vagy „nem newtoni” folyadék). Ezekre jellegzetes görbéket ugyancsak az 1. ábrán láthatunk.

A nem newtoni folyadékok két típusa ismeretes. A *szerkezeti viszkózus* vagy *pseudoplasztikus* anyagoknál a viszkozitás a nyírósebesség növekedésével csökken. A jelenséget azzal magyarázzuk, hogy a makromolekulák, ill. molekula-aggregátumok segítségével kialakult szerkezet a nyírófeszültség hatására meg bomlik, a molekulák, molekulacsoportok fokozatosan rendeződnek, mintegy beállnak az áramlás irányába.



1. ábra

A másik típust a „dilatáló” anyagok képviselik. Ezeknél növekvő deformációssebességgel viszkozitásnövekedés tapasztalható. Így viselkednek pl. a nagy mennyiségű szilárd anyagot tartalmazó szuszpenziók. Ha a deformációs sebesség kicsiny, a folyadék a szilárd részecskék egymáshoz képesti elmozdulásakor kenőanyagként szolgál. Ha viszont a deformációs sebesség nagy, a szilárd részecskék rendje fellazul a változó, növekvő nagyságú hézagokat nem minden esetben tölti ki a folyadék, a kenőhatás nem teljes, viszkozitásnövekedés lép fel.

### 3. Reológiai modellek

A reológiai testek tulajdonságainak, a fellépő alakváltozásoknak szemléletesebbé tétele és tanulmányozásuk megkönnyebbítése érdekében a reológiában igen gyakran modellekkel dolgoznak. Ezek a modellek nem a reológiai testek valamiféle laboratóriumi kicsinyített másai, hanem olyan mechanikai, vagy elektromos rendszerek, amelyek viselkedése azonos matematikai egyenletekkel írható le, mint a nekik megfelelő reológiai testeké. Az elektromos modellek kapacitások és ellenállások kombinációjával alakíthatók ki. Az alábbiakban röviden néhány mechanikai modellt ismertetünk.

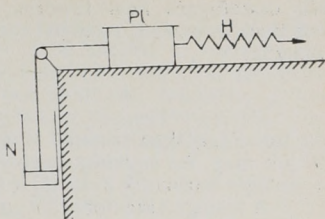
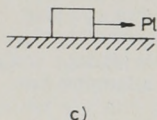
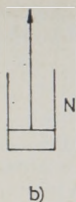
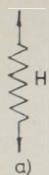
A mechanikai modellek olyan elemekből épülnek fel, melyek az egyes reológiai alaptulajdonságokat, az elaszticitást, viszkozitást és plaszticitást képviselik.

A három mechanikai elem a következő:

a) A Hooke test modellje rugó, mely a terhelés hatására megnyúlik (összenyomódik) és a terhelés megszüntetése után visszanyeri eredeti alakját (2a. ábra). Jele: H.

b) A newtoni folyadék modellje folyadék, vagy légfék, mely a terhelés hatására kezdeti gyorsulás után egyenletes sebességgel mozdul el (2b. ábra). Jele: N.

c) A plasztikus test modellje felületen nyugvó szilárd test, mely a külső erő hatására a súrlódó erő legyőzése után mozgásba jön (2c. ábra). Jele: Pl.



2. ábra

3. ábra

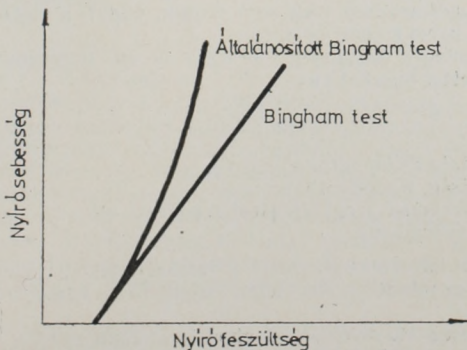
A reológiai modellek igen jól felhasználhatók a *komplex reológiai testek* szemléltetésére. Ez utóbbiak a három alaptest kombinációja révén állíthatók elő. Szerepük az élelmiszertudományban abban van, hogy megfelelő kombináció kiválasztása esetén egyes konkrét élelmiszerek élelmiszeripari nyersanyagok reológiai sajátosságai jól megközelíthetők és lehetőség nyílik objektív fizikai állandókon nyugvó reológiai jellemzésükre.

Példaként először a *Bingham-test* modelljét (lásd: 3. ábra) hozom fel. Mint a modellből látható, a *Bingham* test elasztikus, plasztikus és viszkózus sajátsággal rendelkezik. A plasztikus elemnek megfelelő határfeszültség elérééig rugalmas testként viselkedik. Ezt a feszültséget túllépve, plasztikus és viszkózus alakváltozás lép fel. A test reológiai alapegyenlete a következő:

$$\tau = \tau_h + \eta \dot{\epsilon}$$

(ahol  $\tau$  = nyírófeszültség,  $\tau_h$  = határfeszültség,  $\eta$  = viszkozitás,  $\dot{\epsilon}$  = nyírósebesség)

Az összefüggést a 4. ábra szemlélteti. A gyakorlatban előforduló anyagok jelentős része a Bingham testhez hasonlóan csak bizonyos határfeszültség elérése után indul folyásnak, azonban a továbbiakban a nyírófeszültség-nyírósebesség



4. ábra

ség összefüggés nem lineáris. Ezeket az anyagokat *általánosított Bingham-testeknek* nevezzük, reológiai viselkedésüket pedig az alábbi összefüggéssel jellemezzük:

$$\tau = \tau_h + k \dot{\epsilon}^n$$

Az összefüggésben szereplő  $K$  és  $n$  állandó értékét általában empirikusan állapítjuk meg. Az egyenlet egyben alkalmas arra, hogy vázlatosan szemléltessük a reológia harmadik axiomáját is, amely a következőket mondja ki:

A reológiai szempontból egyszerűbb test reológiai alap egyenlete levezethető a nála bonyolultabb reológiai test alapegyenletéből, amennyiben az utóbbiban egy, vagy több konstans egységnyinek, ill. zérusnak vesszünk. Így  $n = 1$  esetben a Bingham-test alapösszefüggéséhez jutunk, ha  $\tau_h = 0$ , akkor a newtoni folyadék jellemző alapegyenletét kapjuk meg.

A *Maxwell*-test vagy *Maxwell*-folyadék olyan ideális komplex reológiai test, mely viszkózus és elasztikus tulajdonságokkal rendelkezik. Mechanikai modellje egymáshoz kapcsolódó rugalmas és viszkózus elemmel ábrázolható (5. ábra). A deformáló feszültség hatására a *Maxwell*-folyadékon elasztikus és viszkózus elválkozás lép fel, a kétféle deformáció nagysága és aránya a H-elem rugalmassági modulusának és az N-elem viszkozitálásának a függvénye. A létrejövő alakváltozás nagyságát a rugalmas és a viszkózus alakváltozás összege adja meg. Mivel a viszkózus alakváltozás az időnek is függvénye, a *Maxwell*-folyadék deformációja függ a deformáló feszültség hatásának idejétől is. A *Maxwell*-folyadék jellemezhető a deformációs sebességgel, mely a viszkózus és elasztikus alakváltozás sebességéből adódik ki:

$$\dot{\epsilon} = \dot{\tau}/\gamma + \tau/\eta$$

ahol  $\dot{\tau}/\gamma$  elasztikus alakváltozás sebessége.

Az 5. ábra modellje nagyon alkalmas egy fontos reológiai jelenség a *relaxáció* bemutatására és magyarázatára. Relaxáció alatt a reológiában azt a jelenséget értjük, hogy az azonos mértékű deformáció fenntartásához szükséges feszültség az idő függvényében csökken. Ha *Maxwell*-testen bizonyos mértékű alakváltozást létesítve a deformációt megállapítjuk és állandó értéken tartjuk, akkor az történik, hogy a megnyúlás mértékét változatlanul tartva a feszültség csökken, mivel a viszkózus elem dugattyúja a rugófeszültség hatására mindaddig mozgásban marad, míg a rugófeszültség meg nem szűnik, vagyis a rugalmas elem vissza nem nyeri eredeti hosszát.

Matematikailag a feszültség változása az idő függvényében az alábbi egyenlettel fejezhető ki:

$$\tau_t = \tau_0 e^{-t/\tau_r}$$

ahol  $\tau_t$  feszültség  $t$  időpontban

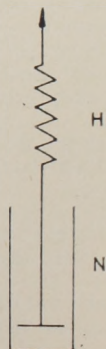
$\tau_0$  feszültség, 0 időpontban

$t$  a deformáció megállapításától számított idő

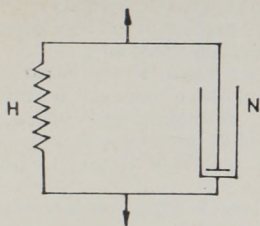
$\tau_r = \eta/\gamma$  a relaxációs idő.

A relaxációs idő értéke alkalmas a reológiai testek jellemzésére. Gyakorlatilag minden reális testen észlelhető a relaxációs jelensége.

A *Kelvin*-test a *Maxwell*-folyadékhoz hasonlóan szintén viszkózus és elasztikus alapelemekből építhető fel. Ebben az esetben azonban ezek az elemek nem sorba kapcsolva, hanem párhuzamosan elhelyezve szerepelnek. (6. ábra).



5. ábra



6. ábra

A Kelvin testnél Maxwell-folyadéktól eltérően nem a deformációk, ill. deformációsebesség addicionálódnak, hanem a feszültségek. A modellben uralkodó feszültség a két elem feszültségének az összegéből adódik.

A reológiai tulajdonságait az alábbi egyenlettel jellemezhetjük:

$$\tau = \gamma \varepsilon + \eta \dot{\varepsilon}$$

ahol  $\tau$  deformáció feszültség  
 $\gamma$  rugalmassági modulusz  
 $\varepsilon$  rugalmas alakváltozás  
 $\eta$  viszkozitás  
 $\dot{\varepsilon}$  nyírősebesség

A Kelvin-test modellje nagyon alkalmas egy másik, szintén az időtől függő jelenség, a *késleltetett rugalmasság* tanulmányozására. A modellben úi. a viszkózus elem az elasztikus egyensúly beállítását csillapító ellenállásként működik. A késleltetett rugalmasság jelenség tehát abban áll, hogy a deformáló feszültség hatására a rugalmas alakváltozás nem pillanatszerűen áll elő hanem csak hosszabb idő után és aszimptotikusan éri el a végső értékét. Matematikailag kifejezve:

$$\varepsilon = \tau/\gamma [1 - e^{-\gamma/\eta \cdot t}]$$

ahol  $\varepsilon$  alakváltozás  
 $\tau$  deformáló feszültség  
 $\gamma$  szilárdsági modulusz  
 $\eta$  viszkozitás  
 $t$  idő

Az egyenlethől kiolvasható, hogy a deformáció elméletileg csak  $t = \infty$  idő alatt éri el végleges értékét. Ha a deformáló erőt megszüntetjük, akkor a deformáció megszűnése szintén nem pillanatszerűen következik be, hanem olyan exponenciális függvény szerint csökken, mely formailag teljesen hasonló a feszültség-relaxációt leíró egyenlethez:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 e^{-\gamma/\eta \cdot t}$$

ahol  $\varepsilon_0$  deformáció,  $t = 0$  időpontban.

Az  $\gamma/\eta$  hányadost, mely szintén időjellegű, ugyancsak relaxációs időnek szokták nevezni. Egyes esetekben használják a retardációs (késleltetési) idő kifejezést is, a feszültségrelaxációtól való megkülönböztetés érdekében. A késleltetett rugalmasság jelensége számos élelmiszeripari nyersanyagban, félkész-és készterméken megfigyelhető (tészta, sütőipari termékek bélzete, gélek, stb.).

A feszültségrelaxáció és a késleltetett rugalmasság jelensége rámutat az idő reológiai jelentőségére. Számos anyag reológiai viselkedése függ a deformáció sebességétől is, ezért eltérő deformációsebességű, azonos elven működő reológiai készülékek adatait minden esetben csak megfelelő értékelés után lehet összehasonlítani.

Itt szeretném felhívni a figyelmet két további reológiai jelenségre, a tixotrópiára és a reopexiára, amelyek ugyancsak az idő jelentőségét húzzák alá.

*Tixotrópia* alatt azt a jelenséget értjük, hogy egyes anyagok (elsősorban gélek) eredeti szerkezete a nyírófeszültség hatására megváltozik (pl. szőlőállapotba mennek át) viszkozitásuk csökken, majd a deformáló feszültség megszűnte után

a viszkozitás fokozatos növekedésével fokozatosan az eredeti szerkezet áll vissza (géllé visszaalakulnak). (Nem tévesztendő össze a pszeudoplasztikus közeg viselkedésével, amelynél az eredeti szerkezet pillanatszerűen visszaáll).

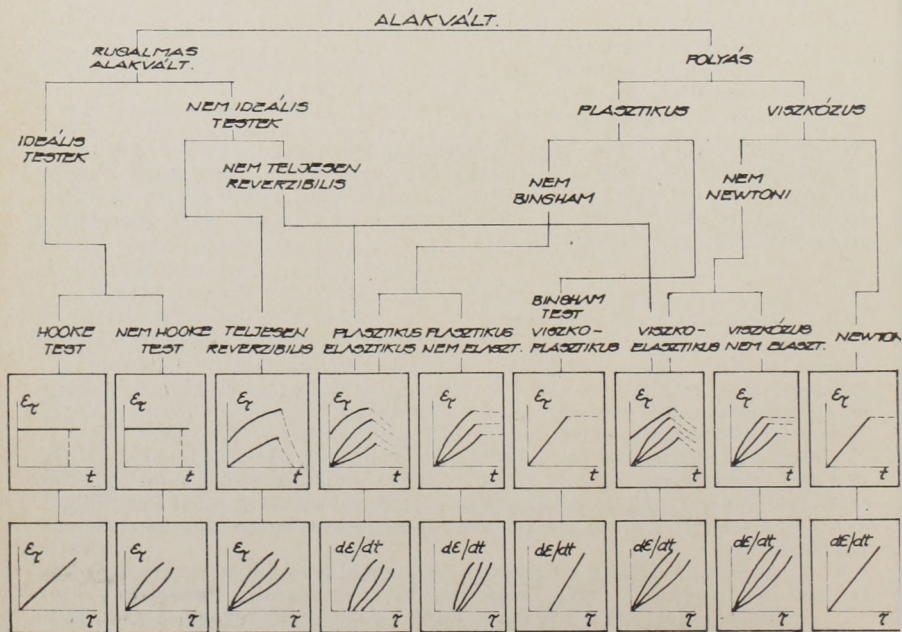
A *reopexia* jelensége lényegében abban áll, hogy a vizsgált anyag viszkozitása növekszik a deformáció idejének függvényében. Szokásos a reopexiát mutató anyagok „keményedő anyag”-ként történő jellemzése. A viszkozitás növekedés azzal magyarázható, hogy az alakváltozás során kedvező körülmények alakulnak ki másodlagos kötések kialakulására molekulák, ill. molekula asszociátumok között.

Az előzőekben kifejezettek alapján a módszertani kérdések ismertetése előtt újabb vázlatot (7. ábra) mutatok be, amely a reológiai testek részletesebb osztályozását szemlélteti. A vázlat a különböző testeket a

$$\varepsilon_{\tau} = f(t), \quad \varepsilon_{\tau} = f(\tau) \quad \text{és} \quad \frac{d\varepsilon_{\tau}}{dt} = f(\tau)$$

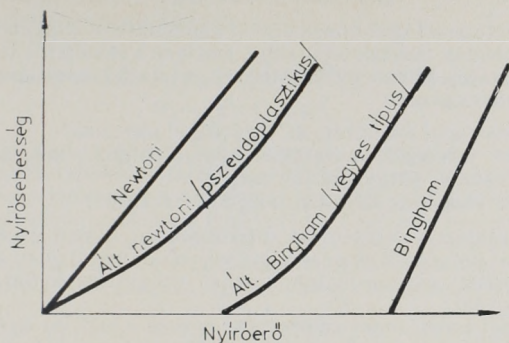
összefüggés görbéivel jellemzi.

A 8. ábra lehetőséget adhat az élelmiszerek olyan csoportosítására, rendszerezésére, ahol az egyes élelmiszereket az azokat legjobban megközelítő reológia<sup>t</sup> modellhez soroljuk. (pl. viszkozus, viszkoeasztikus, viszkoplasztikus stb.). Ezen az elméleti reológián alapuló rendszerezés mellett egyes kutatók, így pl. Matz bizonyos gyakorlati csoportokat is kialakított a következők szerint:



7. ábra





8. ábra

- folyékony élelmiszerek (pl. gyümölcslevek, tejszírtmények, stb.)
- sejtszövetes szerkezetű élelmiszerek (gyümölcsök, főzelékek)
- gélszerkezetű élelmiszerek (zselék, dzsemmek, sajtok, stb.)
- rostos szerkezetek (pl. hús, hústermékek)
- plasztikus anyagok (pl. vaj, margarin, zsír)
- rideg anyagok (pl. karamella, keksz, csokoládé)
- komplex rendszerek (pl. sütőipari termékek, stb.)

#### 4. A reológiai sajátságok jellemzése

Az előzőekben elmondottakból kitűnik, hogy az egyes anyagok objektív reológiai jellemzése a deformáló feszültség és a deformálódás közötti összefüggés megadásával történhet. Amennyiben sikerült az anyag reológiai sajátságait jól megközelítő reológiai modell felállítása, akkor az adott ideális reológiai alapegyenletében szereplő állandók (nyírórugalmassági modulusz, viszkozitás, határ-feszültség, relaxációs idő, stb.) számszerű megadása is elegendő a vizsgált anyag reológiai sajátságainak leírásához.

A gyakorlatban sokszor kerül sor olyan reológiai szempontból bonyolult anyagok vizsgálatára, amelyeknél sem a reológiai alapegyenletet, sem abszolút fizikai egységekben kifejezett reológiai állandókat nem tudtak, ill. tudnak megadni. Ilyen esetekben elterjedt a reológiai tulajdonságok empirikus mértékegységekben történő kifejezése.

Bár ezek az empirikus számadatok bizonyos gyakorlati összehasonlító jellegű vizsgálatoknál eredményesen felhasználhatók, alkalmazásuk sok hátránnyal jár. Az így megadott eredmények nemzetközi, sőt sokszor országon belüli szinten sem hasonlíthatók össze, nem számíthatók át, nem alkalmasak különböző szállító (szivattyúk) formázó (hengerlés, dagasztás, préselés) és egyéb (keverő, hőcserélő, töltő) berendezések méretezéséhez szükséges számítások végzéséhez.

Mindezek miatt a korszerű reológiában, beleértve az élelmiszerreológiai vizsgálatokat is, arra törekszünk, hogy az empirikus egységeket adó módszerek minél szűkebb térre szoruljanak vissza és a reológiai sajátságokat lehetőleg minden esetben, abszolút fizikai egységekben, reológiai állandókban fejezzük ki.

## 5. Módszertani kérdések

Az élelmiszerek reológiai vizsgálatával kapcsolatban általában a következő lényegesebb problémák szoktak felmerülni, amelyek különösen a reológia elméletében kevésbé járatos kisebb gyakorlati tapasztalattal rendelkező kutatóknál okoznak nagy nehézségeket:

1. Milyen reológiai jellemzőt, ill. sajátságot mérjünk?
2. Az adott jellemzőt, sajátságot milyen módon, milyen mérőműszer alkalmazásával határozhatjuk meg?
3. A kapott vizsgálati adatokat hogyan értékeljük?

A következőkben szeretném az intézetünkben hosszú évek óta végzett élelmiszerreológiai kutatások és gyakorlati tapasztalatok alapján a fenti kérdéseket, részben elméleti megfontolások, részben néhány gyakorlati példa segítségével megválaszolni.

1. A reológiai testek (mint említettem) és ezek között az élelmiszerek igen jelentős része a szilárd és folyékony aynagok között foglal helyet. Ennek megfelelően mindkettőnek a jellegzetes tulajdonságaival kisebb vagy nagyobb mértékben rendelkeznek. Reológiai sajátságaik közül elsősorban a viszkozitás (plaszticitás), pontosabban a konzisztencia a leglényegesebb, ezzel jellemezhetők a legjobban. A reológiaiában elfogadott definíció szerint konzisztencia alatt az anyagok azon tulajdonságát értjük, *hogy tartós alakváltozással szemben a nyirófeszültség-nyirósebesség összefüggés útján jellemezhető ellenállást fejtenek ki*. A konzisztencia görbéken az adott anyagra ható nyirófeszültség és nyirósebesség közötti összefüggést adjuk meg. Az élelmiszeriparban előforduló anyagok típus-konzisztencia görbéit a 8. ábra mutatja be. Az ideális newtoni, ill. Bingham-testként viselkedő anyagok száma kevés, a két másik típus gyakori.

Általában tehát az élelmiszerek reológiai vizsgálatánál konzisztencia (viszkozitás, plaszticitás) mérésére van szükség. Kiegészítő adatként szerepelhet a folyáshatár, szilárd testekhez közelálló anyagoknál a rugalmasság (rugalmassági modulusz, rugalmas alakváltozás, relatív rugalmasság), esetleg valamilyen kombinált reológiai jellemző (relaxációs idő).

2. A reológiai mérések elvégzésére szolgáló műszerek száma állandóan nő, elterjedtségük egyre szélesebb. Ugyanakkor sok az olyan műszer, amely a vizsgálati eredményeket nem abszolút fizikai egységekben, fizikai állandókban adja meg, hanem empirikus mérőszámokkal. Az előzőekben elmondottak alapján kívánatos, hogy az abszolút fizikai egységeket adó reológiai vizsgálati módszerek, ill. műszerek minél nagyobb szerephez jussanak, tehát ezeket lehet előnyben részesíteni. Ezek nemcsak azért előnyösebbek, mivel pontosabb a reológiai jellemzés hanem azért is, mivel az abszolút egységek alkalmazhatósága sokkal nagyobb.

Ami konkrétan a felhasználható készülékeket illeti, kis- és közepes viszkozitású anyagok (főleg folyékony élelmiszerek és félkésztermékek) vizsgálatára *kapilláris viszkoziméterek* alkalmasak. A mérési alapelvet tekintve azonos *kapilláris plasztométerek* már nagyobb viszkozitású anyagok vizsgálatánál is eredményesen alkalmazhatók.

A kapilláris viszkoziméterek csak newtoni, a kapilláris plasztométerek esetleg Bingham testek viszkozitásának meghatározására alkalmasak. Nem newtoni anyagoknál a reológiai jellemzés csak több mérés alapján felvett konzisztenciagörbével végezhető el. Utóbbiból grafikusán közelítő viszkozitás érték adható meg a nagy nyirófeszültséghez tartozó tartományra és extrapolálható a határfeszültség. Ugyanis a *Buckingham-Reiner* egyenlet:

$$\eta_{pl} = \frac{P_k}{V} \left[ 1 - \frac{4\tau_h}{3P_k} + \frac{1}{3} \left( \frac{\tau_h}{P_k} \right)^4 \right]$$

ahol:  $\eta_{pl}$  plasztikus viszkozitás  
 $P_k$  és  $V$  konzisztencia varabilisok  
 $\tau_h$  határfeszültség

nagy nyírófeszültségeknél (nagy  $P_k$  érték) az alábbi alakra egyszerűsíthető:

$$P_k = V \cdot \eta_{pl} + 4/3 \tau_h.$$

A *rotációs viszkoziméterek* az univerzális reológiai mérőkészülékek közé tartoznak egyrészt rendkívül széles mérés határak, másrészt annak következtében, hogy módot nyújtanak a viszkozitás abszolút egységekben történő kifejezésére. Ez utóbbival kapcsolatban megjegyzem, hogy nagyon sok olyan viszkoziméter van forgalomban, amelyeknél az elméleti megfontolásokban feltételezett zavartalan lamináris áramlási viszonyok nem valósulnak meg. Newton ui. az alapvető egyenletek felállításánál végtelen hosszú forgó hengert tételezett fel, a henger végében fellépő zavaró turbulens áramlás kiküszöbölésére. Így az abszolút viszkozitás számítása is csak közelítéssel, ill. elhanyagolásokkal végezhető el. A meghatározható jellemző adat ilyen típusú viszkozimétereknél a határfeszültség (folyáshatár) viszkozitás, plasztikus viszkozitás.

A vizsgálatok során felvilágosítást kaphatunk szerkezeti viszkozitás esetleges tényéről, továbbá az anyag tixotrop tulajdonságairól. A rotációs viszkoziméterekkel azonos elven működő *rotációs plasztométerek* mérőtere úgy van, kialakítva, hogy kvázi szilárd anyagok is könnyen betölthetők legyenek. Alkalmazásuk fontos előfeltétele, hogy a vizsgálandó anyag adhéziója a forgó, ill. állórész felületén nagyobb legyen, mint az anyag részecskéi közötti kohézió. Ellenkező esetben *csúszás* következik be az érintkező felületen, ami a vizsgálati eredményt meghamisítja, és sok esetben a mérés reprodukálhatóságát lehetetlenné teszi. A meghatározható paraméterek a rotációs viszkozimétereknél ismertekkel azonosak. Abszolút jellemzők és elméleti mérések szempontjából első sorban a kis nyílású koaxiális rotációs viszkoziméterek, valamint a széles nyílású kúpos (cone and plate) viszkoziméterek a legalkalmasabbak.

A Stokes-törvény alapján kifejlesztett *esőgolyós viszkoziméterek* (pl. Höppler-viszkoziméter) kis- és közepes viszkozitású homogén, szuszpendált részecskéket nem tartalmazó anyagoknál nagy pontosságú mérést tesznek lehetővé. Nagyobb viszkozitású anyagoknál esőgolyóhoz kapcsolódó rúd segítségével mérlegszerkezeten keresztül biztosítható a nehézségi erőnél nagyobb erőhatás, ami a golyó süllyedésének megfelelő sebességét ilyenkor is lehetővé teszi (pl. Höppler-reoviszkoziméter).

A *penetrométerek* igen sokoldalúan alkalmazhatható, egyszerű, könnyen kezelhető, gyors mérést biztosító készülékek. Mind laboratóriumi minőségellenőrzésre, mind gyors gyártásközi mérésekre jól használhatók. Legtöbbször a nyomótest bemerülését, a *penetrációt* mérik, egyes esetekben a zérus süllyedési sebességhez tartozó bemerülés alapján a határfeszültséget (folyáshatárt) is számítják. A viszkozitás számítására ajánlott különböző összefüggések kevésse megbízhatóak. A meghatározott körülmények között mért penetráció – bár empirikus mértékszám – a gyakorlatban összehasonlító vizsgálatok számára jól felhasználható, különösen akkor, ha előzőleg rotációs plasztométerrel felvettük a konzisztenciagörbét, és ennek alapján választottuk meg a legjellemzőbb adatokat szolgáló mérési körülményeket.

3. A reológiai vizsgálat során kapott eredmények értékelése a vizsgálat céljával szorosan összefügg. Élelmiszertudományi szempontból gyakori eset az, amikor a reológiai vizsgálat alapján minősíteni kívánunk. A reológiai jellemzők és a minőség közötti összefüggések legtöbbször stochasztikus jellegűek. Ezért gyakran van szükség nagyszámú mérés végzésére és ezek matematikai-statisztikai értékelésére. Az így kapott összefüggések igen eredményesen és megbízhatóan

használhatók, ugyanakkor tisztában kell lennünk az összefüggések szorosságával. Ilyen vonatkozásban főleg a gabonafeldolgozó iparokban, zsiradékok minősítésénél találhatók jó példák.

#### FELHASZNÁLT IRODALOM

- Lebensmittel-Einfluss der Rheologie DEHEMA Monographie. Band 77. Weinheim 1974.  
*Krönert, J.*: Handbuch der technischen Betriebskontrolle. III. Physikalische Messmethoden. Leipzig. 1959.  
*Lásztity R.*: Élelmiszerek fizikai kémiájának néhány kérdése. Szakm. jegyzet. Budapest, 1962.  
*Lásztity R.* – *Törlev D.*: Korszerű élelmiszerkémiail és ipari vizsgálati módszerek. Szakm. jegyzet. Budapest, 1966.  
*Matz, S. A.*: Food Texture, Wesport. Connecticut, 1962.  
*Macsihin Ju.*: Reologija piscsevüch produktov. Moszkva. 1970.

#### РЕОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ И ПРИНЦИПЫ ИХ ИЗМЕРЕНИЯ

*Р. Ласztity*

Автор рассматривает общие теоретические вопросы касающиеся реологии пищевых продуктов. Ознакомляет возможности систематизации сырья пищевой промышленности и продуктов питания с точки зрения реологических особенностей. В конце дает обзор о важнейших методах инструментального испытания и тенденций их развития.

#### RHEOLOGICAL PROPERTIES OF FOODS AND FUNDAMENTAL PRINCIPLES OF THEIR MEASUREMENT

*R. Lásztity*

A survey is given of the general theoretical problems related to the rheology of foods. Possibilities of the systematization of the raw materials of the food industry and of foods the aspect of their rheological properties are discussed. The most important instrumental methods of investigation and the trends of their developments are surveyed.

#### RHEOLOGISCHE EIGENSCHAFTEN VON LEBENSMITTELN UND GRUNDPRINZIPIEN IHRER MESSUNG

*R. Lásztity*

Nach einer Übersicht über die allgemeinen theoretischen Problemen betreffs der Rheologie von Lebensmitteln werden die Möglichkeiten der systematischen Gliederung der Rohmaterialien der Lebensmittelindustrie und der Lebensmittel vom Standpunkt der rheologischen Eigenschaften besprochen. Schliesslich werden die wichtigsten instrumentalen Untersuchungsmethoden und ihre Entwicklungstendenzen besprochen.

#### LES CARACTÉRISTIQUES RHÉOLOGIQUES DES DENRÉES ALIMENTAIRES ET LES PRINCIPES FONDAMENTAUX DE LEUR MESURE

*R. Lásztity*

L'auteur passe en revue les problèmes théoriques généraux relatifs à la rhéologie des denrées alimentaires. Il décrit les possibilités de systématiser les matières premières des industries alimentaires ainsi que les denrées à partir de leur caractéristiques rhéologiques. Enfin, il passe en revue les méthodes instrumentales de mesure de plus grande portée ainsi que les tendances du développement.