

I. OSNOVNA ŠKOLA VARAŽDIN

Seminarski rad za Državni turnir mladih prirodoslovaca

ŠKROBNA ČUDOVIŠTA

Učenik:

**Bruno Golik , 8.c razred
prof.**

Mentorica:

Slavica Novotni,

U Varaždinu 15. ožujka 2015.

1 Sažetak

Kada sam odlučio riješiti zadatak 17. koji glasi: „Vodena suspenzija škroba postavljena je na glasni zvučnik. Istražite i opišite nastala škrobna čudovišta.“ najprije sam pretražio web stranice i nastojao naučiti što više o škrobu, vodenim suspenzijama škroba i pojmovima koji su nužni za opis nastanka škrobnih čudovišta. Naučeno sam napisao u poglavlju „Teorijski uvod“.

Zatim sam nabavio pribor potreban za izvođenje eksperimenata i napravio probnu koncentriranu suspenziju škroba i ispitao kako se ponaša kada je polako miješam ili brzo rukom udarim: bio sam veoma iznenađen kada se ruka odbila od njene površine kao da sam udario kamen! Zatim sam eksperimentirao sa suspenzijama različitog masenog udjela škroba i pri različitim frekvencijama zvuka i sve dokumentirao video snimkama. Uočio sam da najneobičnija čudovišta nastaju pri frekvenciji zvuka od oko 20 Hz i gustoj suspenziji u kojoj je udio škroba bio oko 60%. Pri frekvenciji od 10 Hz nastajale su deformacije površine suspenzije u obliku valova i isto se događalo pri većim frekvencijama, npr. iznad 60 Hz. Što je bila veća frekvencija zvuka morao sam koristiti veće amplitude na generatoru frekvencija i pojačalu da bih dobio čudovišta, ali ako bih previše pojačao signal dogodilo bi se da dijelovi suspenzije budu izbačeni s površine suspenzije i završe na stolu. Detaljan opis eksperimenata i diskusija rezultata je u poglavlju „Eksperimentalni dio“.

U poglavlju „Teorijska objašnjenja“ opisujem mehanizme zaslužne za nastajanje škrobnih čudovišta, a na kraju je „Popis korištenih izvora informacija i slika“.

2 Teorijski uvod

Općenito o tekućinama

U teoriji se tekućine dijele na idealne i realne. Idealne tekućine su tekućine u kojima nema trenja među česticama, potpuno su nestlačive i gustoća im ne ovisi o vanjskim uvjetima, npr. o temperaturi i tlaku. U realnim tekućinama postoji trenje među česticama, gustoća im se može mijenjati s obzirom na temperaturu i tlak i nisu nestlačive. U praksi postoje samo realne tekućine, a one se dijele na njutnovske i nenjutnovske. U njutnovskim tekućinama koeficijent viskoznosti ne ovisi o tlaku, a u nenjutnovskim tekućinama koeficijent viskoznosti ovisi o tlaku.

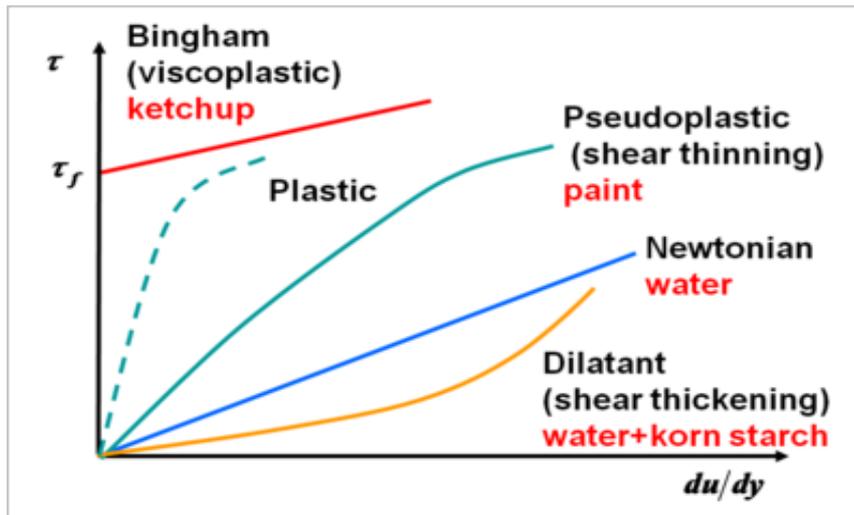
O viskoznosti

Zbog međumolekulskih sila (kohezivnih sila) u tekućinama postoji otpor pomicanju jednog sloja molekula u odnosu na drugi sloj i tu silu zovemo silom viskoznog (unutarnjeg) trenja F_v . Sila viskoznog trenja je proporcionalna ploštini S sloja tekućine kojeg pomičemo brzinom v i brzini pomicanja v , a obrnuto je proporcionalna udaljenosti y između dviju ploha. $\frac{\Delta v}{\Delta y}$ zovemo poprečni pad ili gradijent brzine, a koeficijent proporcionalnosti η zovemo koeficijent unutarnjeg trenja ili dinamička viskoznost i mjerimo je u paskalsekundama (Pas).

$$F_v = - S \frac{\Delta v}{\Delta y}$$

U svim tekućinama se koeficijent viskoznosti smanjuje s temperaturom jer termičko gibanje smanjuje privlačne međumolekulske sile.

U nenjutnovskim tekućinama viskoznost ovisi i o tlaku, odnosno napetosti. U većini nenjutnovskih tekućina se viskoznost smanjuje s povećanjem posmične napetosti τ (pseudoplastični fluidi), a rjeđe viskoznost raste s povišenjem posmične napetosti (dilatanti).



Slika 1: Nagib tangente na krivulju u odabranoj točki predstavlja viskoznost

Suspenzija škroba je dilatant i vrlo je interesantna jer joj u određenim uvjetima povećanjem tlaka viskoznost naglo toliko poraste da se ponaša kao čvrsto tijelo, ali kada se tlak smanji ona je opet tekućina.

O napreznjima i deformacijama

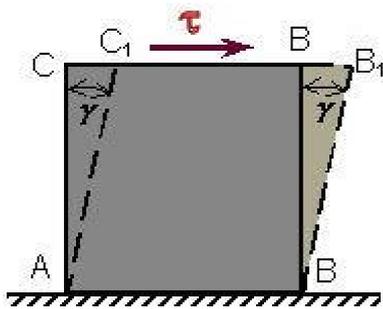
Kada je sila uzrok promjene oblika tijela definiramo:

- normalnu napetost $\sigma = F_n/S$ koja uzrokuje linearnu deformaciju ϵ (F_n je sila okomita na plohu S), a u tri dimenzije dobije se volumna deformacija;
- tangencijalnu ili posmičnu napetost $\tau = F_t/S$ koje uzrokuje kutnu ili posmičnu deformaciju γ (F_t je sila tangencijalna plohi S).

Napetost mjerimo u paskalima (Pa), a posmik u radjanima (rad).

Brzinu posmika $\dot{\gamma}$ izražavamo u $\text{rad/s} = \text{s}^{-1}$ i ta veličina odgovara gradijentu brzine u tekućinama nastalom zbog viskoznog trenja, pa možemo pisati da je $\tau = \eta \cdot \dot{\gamma}$.

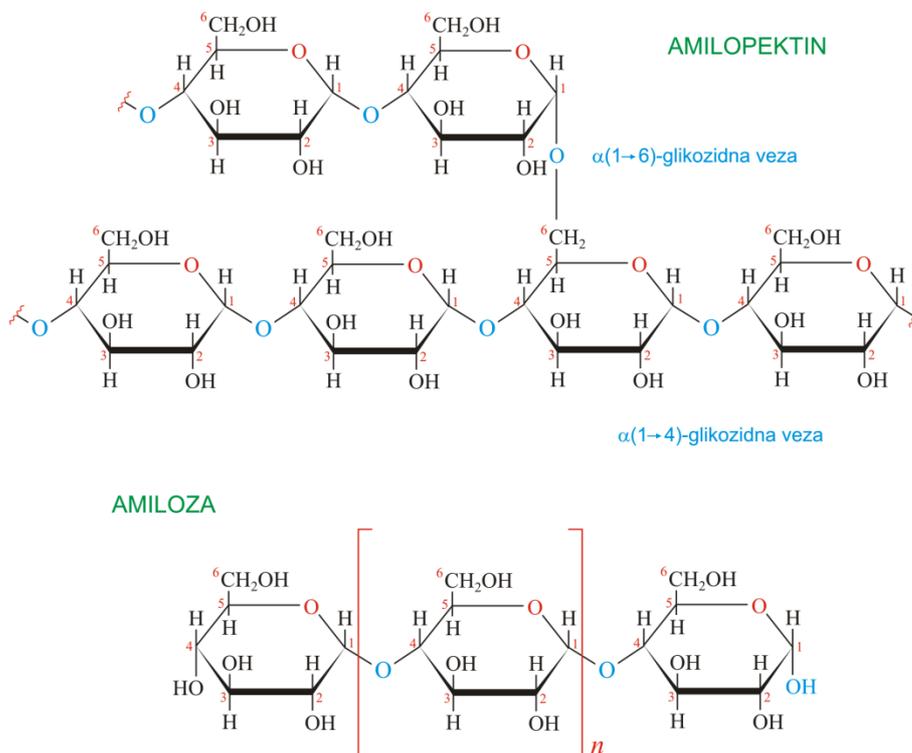
Proučavanjem deformacija i toka tvari pod utjecajem primijenjene napetosti bavi se reologija.



Slika 2: Posmično naprezanje τ i posmična deformacija γ

O škrobu

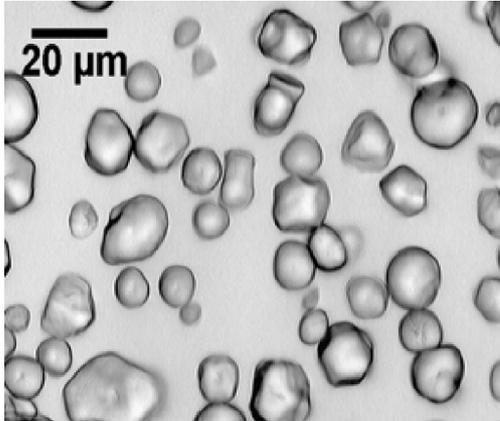
Škrob je polisaharid s općom formulom $(C_6H_{10}O_5)_n$ i sadržava dva građom različita polisaharida: amilozu koja je lančasti polimer i amilopektin koji je razgranati polimer. Amiloza je topiva u vodi, a amilopektin je netopiv u vodi. Amiloza sadrži između 500 i 6000 glukoznih jedinica povezanih $\alpha(1\rightarrow4)$ -glikozidnim vezama, a amilopektin može sadržavati između 3×10^5 i 3×10^6 glukoznih jedinica povezanih $\alpha(1\rightarrow4)$ i $\alpha(1\rightarrow6)$ -glikozidnim vezama.



Slika 3: Škrob - E. Generalić

Škrob je građen od granula koje su netopive u vodi, ali je izrazito hidrofilan.

Udio amiloze i amilopektina, veličina i oblik granula škroba i druga svojstva ovise i botaničkom porijeklu škroba, npr. granule kukuruznog škroba su promjera između $5 \mu\text{m}$ i $25 \mu\text{m}$ i poligonalnog su oblika, dok su granule krumpirovog škroba promjera $15 \mu\text{m}$ do $100 \mu\text{m}$ i ovalnog su oblika. U kukuruznom škrobu udio amiloze je oko 25%, a amilopektina oko 75%.



Slika 4: Mikrograf granula kukuruznog škroba

O zvuku

Zvuk je longitudinalni mehanički val što znači da se sredstvom kojim se rasprostire zvuk širi poremećaj u obliku zgušnjenja i razrjeđenja čestica zbog čega je na mjestu zgušnjenja tlak viši nego kad kroz sredstvo ne putuje zvučni val, a u područjima gdje su razrjeđenja je tlak niži. Ta promjena tlaka Δp u nekoj točki sredstva je periodična je i u matematičkom zapisu je možemo opisati kao funkciju sinus:

$$\Delta p(t) = \Delta p_{max} \sin \omega t$$

Titranje čestica izvora vala opisujemo jednačbom:

$$y(t) = A \sin \omega t,$$

gdje je y pomak čestice iz ravnotežnog položaja, A je amplituda, a kružna frekvencija $\omega = 2\pi/T = 2\pi f$, T je vrijeme jednog titraja, a f je frekvencija i mjerimo je hercima (Hz).

Energija čestice mase m koja titra je proporcionalna kvadratu amplitude titranja (A) i kružne frekvencije (ω) titranja čestice.

$$E = \frac{mA^2\omega^2}{2}$$

Intenzitet zvuka iskazuje koliko energije E prenese zvučni val u jednoj sekundi kroz plohu ploštine 1 m^2 okomitu na smjer širenja vala i izražavamo ga u W/m^2 . Time je intenzitet proporcionalan energiji zvuka (E), a obrnuto proporcionalan ploštini (S) kroz koju zvuk prolazi i vremenu (t):

$$I = \frac{E}{St}$$

Intenzitet zvuka će se smanjivati s udaljenosti r od izvora jer će se energija zvuka prenositi kroz veću sfernu plohu S i intenzitet zvuka je obrnuto proporcionalan kvadratu udaljenosti od izvora jer je plošina sfere $S = 4r^2\pi$.

$$I \sim \frac{1}{r^2}$$

Time će tijelo koje je bliže izvoru zvuka dobiti više energije dok će isto takvo tijelo dalje od izvora zvuka dobiti manje energije. Intenzitet zvuka se dodatno smanjuje jer se dio početne energije zvuka izgubi zbog trenja između čestica medija.

Izvor zvučnih valova u širem smislu može biti svako tijelo koje titra, a mi smo koristili glasni zvučnik. Bitno svojstvo zvučnika kao izvora zvuka je njegova impedancija (R) koju izražavamo u ohmima (Ω), a snaga (P) će ovisiti o naponu (U) na zvučniku kao

$$P = U^2/R.$$

3. Eksperimentalni dio

Pribor

Za izvođenja eksperimenta pripremio sam ovaj pribor: generator frekvencija, pojačalo GRUNDIG, zvučnik AUDAX impedancije 8Ω , voltmetar, stalak za kameru, kamera IXUS 115 HS (120fps), kamera CASIO EX-F1 (300 fps), prozirna folija, ljepljiva traka, kukuruzni škrob „Gusnel“ Podravka, voda, plastična čaša, menzura, plastična žlica, drvena kuhača, škare, 2 staklene zdjelice, plastelin i digitalna vaga (s točnošću 1 gram).



Slika 5. Pribor za pripremu vodene suspenzije kukuruznog škroba



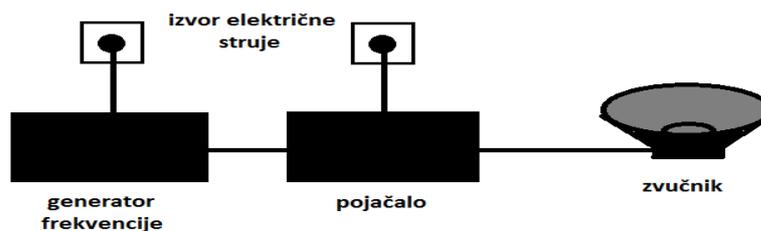
Slika 6. Kamera CASIO EX-F1



Slika 7. Generator frekvencija, pojačalo i glasni zvučnik spremni za eksperiment

Priprema aparature

Kako bih mogao započeti pokus trebao sam prvo imati sve potrebne dijelove pribora pri ruci. Tako sam na prvi stol stavio pojačalo i generator frekvencija i spojio ih međusobno, a zatim svakog zasebno u utičnicu. Na drugi stol sam stavio zvučnik s membranom okrenutom prema gore i zaštitio je od prljanja prozирnom folijom za kućanstvo tako da folija pranja uz elastičnu membranu. Foliju sam za krajeve zvučnika zalijepio ljepljivom trakom kako se ne bi zgužvala za vrijeme vibriranja membrane zvučnika.



Slika 8. Shema spajanja generatora frekvencije, pojačala i zvučnika

Kameru sam namjestio tako da snima 120 slika u sekundi, a zatim je pričvrstio za vrh stalka. Stalak sam zatim namjestio pokraj stola tako da kamera snima površinu zvučnika. Stalak nije smio dodirivati stol jer bi se zbog vibracija zvučnika kamera tresla i dobio bih manje kvalitetnu snimku.

Priprema guste suspenzije škroba

Cilj mi je bio istražiti kako nastajanje čudovišta ovisi o masenom udjelu škroba. Načinio sam probnu suspenziju od 100 grama vode i 150 grama škroba što znači da je maseni udio škroba bio $w = \text{masa škroba} / \text{masa suspenzije} = 150 \text{ g} / 250 \text{ g} = 0,6 = 60\%$.

Uočio sam da izgleda jako „gusto“, tj, jako se teško miješa, pa sam joj odredio gustoću:

$$\rho = m/V = 230 \text{ g} / 210 \text{ cm}^3 = 1,1 \text{ g/cm}^3$$

Dakle, gustoća je neznatno veća od gustoće vode, ali je viskoznost jako velika.

Odlučio sam eksperimentirati s tri različite guste suspenzije škroba koje sadržavaju redom 60%, 55% i 50% škroba. Primijetio sam da se škrobna suspenzija brzo suši u toploj učionici, a na zvučnik nije trebalo staviti onoliku masu suspenzije pa sam odlučio izmiješati suspenzije od 50 g.

U menzuru sam iz čaše ulio 20 ml vode što odgovara masi od 20 g. Zatim sam uključio digitalnu vagu i na nju stavio veću zdjelicu. Vaga je pokazivala 175 g. Ulio sam 20 g vode iz menzure u zdjelicu. Prva suspenzija škroba je trebala sadržavati 60% škroba pa sam u 20 g vode trebao dodati 30 g škroba. Ukupna masa zdjelice i vodene suspenzije škroba trebala je biti 225 g. Postepeno sam plastičnom žlicom stavljao manje količine kukuruznog škroba u vodu istovremeno miješajući drvenom kuhačom. Kad je vaga pokazala 225 g dobro sam promiješao vodenu suspenziju da postane što homogenija. Primijetio sam da se tekućina teško miješa i da se povećanjem brzine miješanja pod utjecajem sile miješanja viskoznost suspenzije povećava. Zatim sam izlio sadržaj zdjelice na foliju iznad zvučnika i uključio uređaje.

Tijek i rezultati eksperimenta

Za svaku od tri suspenzije sam htio istražiti kako nastala čudovišta ovise o frekvenciji zvuka. Namjestio sam generator frekvencije na 20 Hz. Mogao sam povećati amplitude zvuka na oba uređaja (generator frekvencije i pojačalo), pa sam u prvom pokusu povećavao amplitude dok nisam uočio da se površina suspenzije počela deformirati. Tada je na generatoru frekvencija bilo pojačanje $A_g = 4$ i na pojačalu $A_p = 4$. Snimao sam čudovište oko 2 minute.

Sa 60-postotnom suspenzijom sam izvršio snimanja za frekvencije od 20 Hz do 100 Hz i za nastajanje čudovišta sam pritom morao mijenjati pojačanja. Za vrijeme jedne snimke nisam mijenjao ni frekvenciju ni pojačanje nego sam ih mijenjao u razmacima između pojedinih snimki. Najbolja čudovišta (najveću deformaciju) sam dobio pri frekvenciji od 20 Hz do 40 Hz. Što je frekvencija bila viša deformacija suspenzije se smanjivala. Tako sam pri frekvencijama od 60 Hz do 80 Hz trebao bitno povećati pojačanje kako bi došlo do nastajanja čudovišta. Pri frekvenciji od 100 Hz sam i pri vrlo velikim pojačanjima dobio samo deformacije koje su izgledale kao stojni valovi. Kad sam završio sa snimanjem 60-postotne otopine skinuo sam prozirnu foliju sa zvučnika i zajedno sa suspenzijom bacio u kantu za smeće jer bi odlaganje u kanalizaciju moglo začepiti odvod.

Zatim sam pripremio 55 - postotnu suspenziju škroba na isti način kao i 60 - postotnu suspenziju, naravno sa drugačijim omjerima vode i škroba (voda - 22.5 g, škrob - 27.5 g). Ta otopina je pružala značajno manji otpor miješanju, ali bi se svejedno njena površina pri većim tlakovima, npr. udaranju žlicom ponašala kao krutina. Na zvučnik sam stavio novi sloj folije i ulio suspenziju. Snimao sam ponovno pri frekvencijama od 20 Hz do 100 Hz. Ova otopina se ponašala slično kao i prethodna, najbolja čudovišta su se stvarala pri frekvencijama od 20 Hz do 40 Hz. Pri frekvencijama 60Hz do 80Hz se deformacija još vidjela, ali je bila znatno manja nego na nižim frekvencijama unatoč povećanju amplitude zvuka. Razlika između te dvije otopine bila je najveća pri 100 Hz jer su nastali jedva vidljivi stojni valovi, čak i pri velikim pojačanjima zvuka.

Pri 100 Hz sam izveo još jedan eksperiment: plastičnom sam žlicom ispitao viskoznost titrajuće suspenzije. Žlica nije mogla zaroniti nego samo ogrebat površinu zbog čega sam

zaključio da je viskoznost vrlo velika i da se površina suspenzije ponaša kao da se radi o čvrstom tijelu. No, kada sam isključio zvučnik suspenzija se žlicom mogla prelijevati kao obična tekućina.

Treću suspenziju, 50 - postotnu, sam napravio od 25 g vode i 25 g škroba. Ona je pružala samo malo veći otpor miješanju od vode, čak i pri većim brzinama miješanja. Njezino ponašanje sam snimao pri frekvencijama od 20 Hz do 60 Hz. Primijetio sam da se ponašala bitno različito od prethodne dvije suspenzije. Pri frekvencijama od 20 Hz do 30 Hz bi se događala velika deformacija, ali se moglo uočiti da čudovišta koja nastaju nemaju neobične oblike i da su više kao uzburkana tekućina. Na frekvenciji između 40 Hz i 60 Hz sam dobio prilično niske stojne valove, čak i pri vrlo velikim pojačanjima zvuka. Ponovno sa žlicom pri frekvenciji od 60 Hz ispitivao viskoznost suspenzije. Viskoznost je bila puno manja nego u prijašnjem slučaju i suspenzija se ponašala kao tekućina.

Za vrijeme izvođenja svih pokusa sam bilježio maseni udio škroba u suspenziji, frekvenciju zvuka, amplitude na generatoru A_g i pojačalu A_p , te redni broj snimke.

Rezultati su u donjoj tablici:

Maseni udio škroba w	r.br	f/Hz	A_g	A_p	Opis škrobnih čudovišta
60%	1.	20	4	4	Mala deformacija, namreškana površina poput valova
	2.	20	5	4	Velika deformacija, brzo promjenjujući oblici
	3.	40	7	4	Velika deformacija, brzo promjenjujući oblici
	4.	60	9	6	Srednja deformacija, i brzo promjenjujući oblici
	5.	80	9	6	Mala deformacija, sporo promjenjujući oblici
	6.	80	9	8	Mala deformacija, sporo promjenjujući oblici
	7.	100	9	12	Srednja deformacija, stojni valovi
55%	8.	20	4	4	Srednja deformacija, stojni valovi, mali oblici
	9.	20	6	4	Velika deformacija, brzo promjenjujući oblici
	10.	20	5	4	Velika deformacija, brzo promjenjujući oblici
	11.	30	5	4	Velika deformacija, brzo promjenjujući oblici
	12.	40	5	4	Srednja deformacija, sporo promjenjujući oblici
	13.	40	6	4	Velika deformacija, brzo promjenjujući oblici
	14.	50	8	4	Srednja deformacija, sporo promjenjujući oblici
	15.	60	9	6	Srednja deformacija, sporo promjenjujući oblici
	16.	80	9	8	Srednja deformacija, sporo promjenjujući oblici
	17.	100	9	8	Skoro nikakva deformacija
50%	18.	20	4	4	Velika deformacija brzo promjenjujući oblici Izgedaju tekuće
	19.	20	6	6	Velika deformacija brzo promjenjujući oblici Izgedaju tekuće
	20.	30	6	7	Velika deformacija brzo promjenjujući oblici izgedaju tekuće
	21.	40	6	7	Mala deformacija, mali stojni valovi
	22.	60	6	8	Mala deformacija, mali stojni valovi

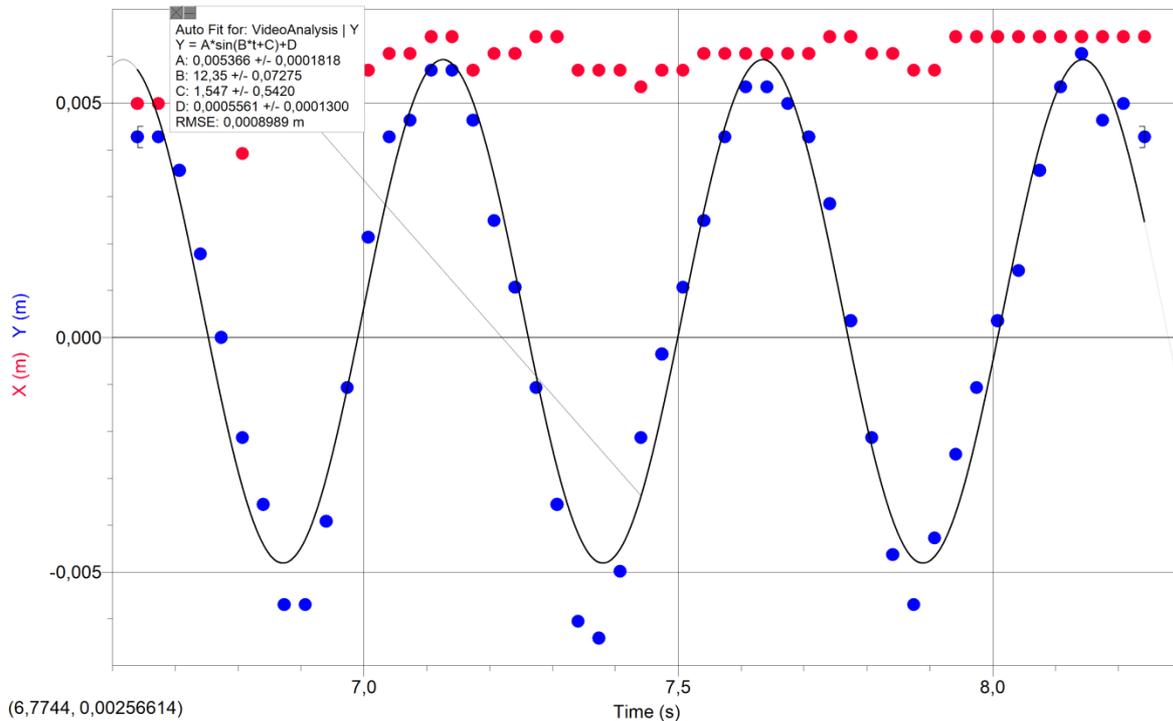
--	--	--	--	--	--

Tablica 1. Kratki opis čudovišta za tri različite koncentracije škroba pri različitim frekvencijama i pojačanjima zvuka potrebnim za nastajanje čudovišta

Analiza video snimki

Kada sam napravio snimke htio sama ih analizirati uz pomoć računalne aplikacije Logger Pro 3.8.2. Naučio sam koristiti aplikaciju za analizu video snimke gibanja odabrane točke, ali sam morao odustati jer je bilo nemoguće pratiti titranje određene točke kada je došla u donji dio putanje i „utopila“ se u suspenziji. Stoga sam odlučio napraviti nekoliko snimki tako da stavim malu oznaku od plavog plastelina na površinu suspenzije.

Za snimanje sam pripremio 55%-tnu suspenziju škroba i stavio na njenu površinu komadić plastelina. Upravo smo nabavili kameru CASIO EX-F1 i odbrao sam snimanje s 300 slika u sekundi. Namjestio sam generator frekvencija na 20 Hz i gotovo istovremeno uključio kameru i generator. Analizirao sam gibanje plave oznake tijekom 2 sekunde i dobio ovaj graf:



Slika 9. Ovisnost položaja označene točke čudovišta o vremenu (plave točke) i ovisnost brzine gibanja označene točke o vremenu (crvene točke). U gornjem lijevom kutu je rezultat fitiranja dobivene krivulje sa sinusoidom $y(t) = A \sin(B \cdot t + C) + D$.

f_{zvuka} / Hz	A_σ	A_n	f_{oznake} / Hz	A_{oznake} / mm
20	4	2	≈ 2	4,6
20	4	3	≈ 2	5,4
20	4	4	≈ 2	7,5
20	4	5	≈ 2	5,7
40	4	4	≈ 2.6	2,7

Vidimo da je amplituda titranja označene točke $A = 5,4$ mm, a kružna frekvencija $\omega = B = 12,35 \text{ s}^{-1}$. Prema tome je frekvencija titranja $f = \omega/2\pi \approx 2$ Hz, a period $0,5$ s.

Rezultati analize još nekoliko načinjenih snimki su u donjoj tablici.

Tablica 2. Rezultati za frekvenciju f_{oznake} i amplitudu A_{oznake} titranja oznake na čudovištu za različita pojačanja pojačala A_p i različite frekvencije zvuka f_{zvuka}

Vidimo da čestice čudovišta titranju nekom svojom frekvencijom koja nije jednaka frekvenciji titranja membrane zvučnika i koja se malo mijenja s frekvencijom zvuka. Amplituda titranja čestica čudovišta pri određenoj frekvenciji zvuka je jako ovisila o pojačanju pojačala, a pri istom pojačanju je pri većim frekvencijama zvuka bila puno manja. To objašnjavamo time što je za istu snagu dovedenog električnog signala na zvučnik amplituda titranja membrane obrnuto proporcionalna frekvenciji zvuka, pa je i amplituda titranja čestica čudovišta manja. Inače, da je frekvencija titranja čestica suspenzije bitno manja od frekvencije zvuka bilo očigledno i bez mjerenja.

4. Teorijsko objašnjenje mehanizama nastanka čudovišta

Kada sam počeo proučavati škrob pomislio sam da će objašnjenje povećanja viskoznosti pod utjecajem tlaka i posmične napetosti biti u razgranatoj strukturi amilopektina i da dolazi do „kvačenja“ tih molekula iz pojedinih granula kada su zbijene pod utjecajem tlaka i zato sam puno pisao o građi škroba. Sada znam da postoje tri mehanizma i nekoliko sila povezanih s porastom viskoznosti u tekućinama pa ću ih ukratko opisati.

Već sam napisao da suspenziju škroba ubrajamo u nenjutnovske fluide dilatante što znači da u njima posmična napetost potrebna za izazivanje određenog posmika nije proporcionalna brzini smicanja kao što je to kod njutnovskih fluida već kod određene brzine smicanja raste puno brže, što znači da viskoznost naglo raste, a time raste i gubitak energije. To svojstvo je jako važno jer omogućuje proizvodnju odjeće koja disipacijom energije štiti od uboda, metaka, opasnih sportskih aktivnosti i sličnog.

Na engleskom se kaže da je nastupilo „Discontinuous Shear Thickening“ (DST) ili u prijevodu „diskontinuirano zgušnjavanje smicanjem“ gdje se zgušnjavanje odnosi na povećanje viskoznosti. Zbog jednostavnosti ću i ja tu promjenu stanja zvati DST.

Još 30-tih godina prošlog stoljeća su uočene takve promjene stanja kod brojnih koloidnih i nekolooidnih suspenzija i pokazalo se da se javljaju kod suspenzija gusto pakiranih tvrdih čestica koje se ne privlače, ali se ne događa kod suspenzija tvrdih čestica koje se privlače ili kod složenih fluida koje se sastoje od mekih čestica (pjene, emulzije). Znanstvenici su se fokusirali na mikrostrukuralne promjene i pod utjecajem smicanja i kada je tehnologija dovoljno napredovala uočena su tri različita mehanizma pri DST:

- Prvi mehanizam je formiranje hidroklastera, tj. grupiranje čestica izloženih posmičnoj napetosti u velike klastere (nakupine) i takvo pregrupiranje čestica je dovodilo do povećanja

sile potrebne za pomicanje čestica (Brady and Bosis 1985.). No, taj mehanizam je uočen i kod smicanjem uzrokovanog smanjenja viskoznosti (shear thinning) u manje gustim suspenzijama, pa je zaključeno da on može biti „okidač“ za DST zbog formiranja „granula“.

- Drugi mehanizam je prijelaz iz uređenih slojeva pri manjim brzinama smicanja u neuređene strukture pri većim brzinama što također dovodi do povećanja sila potrebnih za pomicanje čestica (Hofman, 1974.). No, ni taj mehanizam nije nužan uvjet za DST.

- Treći mehanizam je dilatancija što znači da se zbog posmične napetosti povećava volumen određenog „pakiranja“ čestica koji u interakciji s graničnim plohamo dodatno povećava napetost u smjeru suprotnom od granice (Brown nad Jaeger, 2012.).

Istraživanja su pokazala da potrebna napetost za DST jako ovisi o veličini čestica i najmanja je napetost potrebna za čestice veličine oko 10 μm. Upravo zato možemo takve pojave proučavati na suspenzijama kukuruznog škroba čije su granule veličine 5 – 25 μm. Najveća veličina čestica kod kojih je uočen DST je oko 1 mm.

Minimalna posmična napetost potrebna za DST je ona koja je dovoljno velika da premaši sve lokalne barijere relativnom smicanju čestica jedna pored druge. Te barijere su prisutne zbog privlačenja čestica uzrokovanih raznim silama, npr. površinskom napetošću između granule i tekućine, a kod velikih granula treba svladati i težinu granule. U tipičnim suspenzijama je veoma važna napetost površine između tekućine i zraka.

Potrebno je uočiti i da u nenjutnovskim fluidima može postojati razlika u lokalnoj napetosti i globalnoj napetosti na razini čitave suspenzije jer u njima čestice najčešće nisu u stanju termičke ravnoteže već pokazuju određenu histerezu. Tako je i u vodenim suspenzijama škroba i najnovija istraživanja pokazuju da se formiranje stabilnih struktura (kao što su izboji i rupe) u vertikalno vibrirajućim suspenzijama događaju upravo zbog histereze (Deegan, 2010). Radi se o tome da se brzina smicanja ne mijenja jednako brzo pri povećanju napetosti i pri vraćanju u početno stanje, tj, pri smanjenju napetosti za isti iznos.

Moje objašnjenje nastanka čudovišta

Pri vertikalnim vibracijama vodene suspenzije škroba za vrijeme izloženosti zvučnim valovima javljale su se dvije vrste oblika: „ograci“ koji su se uzdizali uvis i ispod kojih su bile šupljine, a pri većim frekvencijama zvuka uočio sam i nekoliko malih udubina.

Na tu pojavu utječe nekoliko sila i svojstva. Sila kojom zvučni val djeluje na suspenziju je periodična, nema konstantni ni iznos ni smjer: $F_z = F_{max} \sin \omega_z t$.

Pošto je zvučnik bio okrenut prema gore iznos sile kojom zvučni val djeluje treba ili dodati ili oduzeti od iznosa sile gravitacije ovisno o trenutnom stanju titranja. To znači da je napetost kada sila zvuka ima smjer prema dolje veća od napetosti kada ona djeluje prema dolje zbog u međudjelovanja s graničnim plohamo.

Površinska napetost također utječe na cijeli proces. Na čestice koje su na samoj granici tekućine (u ovom slučaju između vodene suspenzije škroba i zraka ili folije) susjedne čestice djeluju privlačnom silom prema unutrašnjosti tekućine i one su u stanju više energije. Čestice će nastojati ući u stanje niže energije što u ovom slučaju znači da će tekućina nastojati minimizirati površinu kojom graniči s okolinom. Čestice će također nastojati ući u stanje

većeg nereda (veće entropije) što znači da se nastoje udaljiti međusobno. Te dvije sile su suprotnih smjerova i njihova rezultanta biti će površinska napetost koja je u vodi vrlo velika.

Za stvaranje oblika je također važan faktor viskoznog trenja koji će se naglo povećati pri brzom povećanju napetosti i histereza faktora viskoznog trenja što znači da će se viskoznost sporije smanjivati nego što je rasla s promjenom napetosti u suspenziji. Stoga čudovišta imaju ogranke koji rastu u visinu povlačeći za sobom od zvučnika udaljenije i manje viskozne dijelove suspenzije. Može se dogoditi da se ogranak nagne za preveliki kut i padne. Primijetio sam kako ogranak pada sporo, to se događa jer mu se viskoznost polako smanjuje i poprima svojstva tekućine. U trenutku takvog nagiba i udaljenosti od membrane na njega sila zvučnika ima bitno manji učinak i prevlada gravitacija.

Važna je i frekvencija zvuka jer se tom frekvencijom mijenja i iznos i smjer zvučne sile, a time i napetost što je presudno za histerezu i stvaranje oblika.

Rupe koje nastanu pri uzdizanju ogranaka se ne popunjavanju suspenzijom (kao što bi se dogodilo u uobičajenim tekućinama zbog površinske napetosti koja nastoji minimizirati površinu) zato što se rubovi udubine ponašaju kao krutine zbog visoke viskoznosti i tako ne dopuštaju okolnim molekulama da se uliju u udubinu. No, kada isključimo zvučnik površina suspenzije postane vodoravna i poprima svojstva obične tekućine.

Popis korištenih izvora informacija i slika

Vladimir Paar, FIZIKA 3, udžbenik za treći razred gimnazije, Školska knjiga, Zagreb, 2009.

Velimir Kruz, TEHNIČKA FIZIKA, za tehničke škole, Školska knjiga, Zagreb, 1972.

Stanley H. Pine, ORGANSKA KEMIJA, Školska knjiga, Zagreb, 1994.

<http://journals.aps.org/pre/abstract/10.1103/PhysRevE.81.036319> - pristupljeno 19.2. 2015.

<http://upload.wikimedia.org/wikiversity/en/thumb/4/4b/Rheological-fluids-1.png/400px-Rheological-fluids-1.png> - pristupljeno 14.3. 2015. (slika 1.)

http://rgn.hr/~lfrgic/nids_lfrgic/PDF_Print_Tehnicka%20mehanika_Geoloz/Print_PDF_G/Print_11_Naprezanja%20i%20deformacije_G.pdf - pristupljeno 18.2 (slika 2.)

<http://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/0709/0709.3171.pdf> - pristupljeno 18. 2. 2015. (slika 4.)

<http://glossary.periodni.com/glosar.php?hr=polisaharid> - pristupljeno 18.2. 2015. (slika 3.)

<http://www.formatex.org/microscopy3/pdf/pp719-725.pdf> - pristupljeno 25.2. 2015.

<http://iopscience.iop.org/0034-4885/77/4/046602> - pristupljeno 19.2. 2015.