

Univerza v Ljubljani
Fakulteta za *matematiko in fiziko*



Oddelek za fiziko

Seminar I_a - 1. letnik, II stopnja

Penjenje temnega piva

Avtor: Tilen Brecelj

Mentor: prof. dr. Rudolf Podgornik

Ljubljana, november 2012

Povzetek

Seminar opisuje penjenje temnega piva, v katerem sta raztopljena dušik in ogljikov dioksid ter ga primerja s penjenjem ostalih gaziranih pijač, ki vsebujejo le raztopljen ogljikov dioksid. Z nekaj osnovnimi fizikalnimi zakoni kot so Henryjev, Laplaceov in prvi Fickov zakon, je pojasnjen mehanizem tvorjenja plinskih mehurčkov v gaziranih pijačah in temnem pivu, ki ga je k penjenju potrebno spodbuditi. Matematični model penjenja je na koncu primerjan še z eksperimentalnimi rezultati iz opazovanj.

Kazalo

1	Uvod	2
2	Fizikalno ozadje	2
2.1	Henryjev zakon	2
2.2	Laplaceov zakon	3
2.3	Prvi Fickov zakon	3
2.4	Kritični radij	4
3	Penjenje gaziranih pijač	4
4	Penjenje temnega piva	8
5	Tvorba mehurčkov v temnem pivu	9
6	Eksparimentalni rezultati	11
7	Zaključek	13
	Literatura	14

1 Uvod

V seminarju bom opisal penjenje temnega piva, v katerem sta raztopljena ogljikov dioksid in dušik, ter ga primerjal s penjenjem ostalih pijač, kot so brezalkoholne gazirane pijače, penine in svetlo pivo, ki vsebujejo le raztopljen ogljikov dioksid. Raztopljen dušik poda temnemu pivu lastnosti, ki so zanimive tako za uživalce piva, kot tudi za fizike. Dušikovi mehurčki so namreč manjši od mehurčkov ogljikovega dioksida, zaradi česar tvorijo bolj kremasto in gostejšo peno, ki na tekočini zdrži več časa in poda pivu svojevrsten okus. Poleg tega dušik z vodo ne reagira, kot se to zgodi z raztopljenim ogljikovim dioksidom, ki z vodo tvori ogljikovo kislino H_2CO_3 in poda pijačam kislno-grenek priokus. Za fizike pa je temno pivo zanimivo, ker je topnost dušika v vodi približno 55-krat manjša od topnosti ogljikovega dioksida, zaradi česar so fizikalne lastnosti mehurčkov in pene, ki se se nabira na pijači, različni. Ko omenjam temno pivo, pijačo, pridobljeno iz vode, hmelja, praženega slada ali ješprena in kvasovk, se ne nanašam le na piva temne, skoraj črne barve in močnega okusa, temveč na vse vrste piva, ki vsebujejo raztopljen dušik, ta pa so večinoma oz. skoraj v celoti temna. Opozoriti velja še, da z izrazom *penjenje* ne opisujem le nastajanje pene na površju tekočine, temveč tudi tvorbo plinastih mehurčkov v tekočini.

2 Fizikalno ozadje

Ena bistvenih razlik med penjenjem pijač z raztopljenim ogljikovim dioksidom, kot so peneča vina, svetla piva in gazirane pijače ter penjenjem temnega piva, ki vsebuje predvsem raztopljen dušik je ta, da se prvi penijo spontano, temno pivo pa je k penjenju potrebno spodbuditi. Teoretično in eksperimentalno je bilo potrjeno, da je mehanizem penjenja v obeh primerih enak, vendar se temno pivo peni mnogo prepočasi, da bi se lahko na njenem vrhu ustvarila pena. Ravno zaradi tako počasnega izločanja plinov je temno pivo idealno za preučevanje izločanja plinov iz tekočine in tvorbe plinastih mehurčkov.

2.1 Henryjev zakon

Prvi fizikalni zakon, s katerim si bomo pomagali razložiti raztapljanje plinov v tekočini je Henryjev zakon, ki nam podaja zvezo med koncentracijo raztopljenega plina ter njegovim parcialnim tlakom v raztopinah z majhno koncentracijo topljenca, kar zadosti našim potrebam pri obravnavi penjenja pijač. Matematično ga zapišemo kot

$$c = H(T)P, \tag{1}$$

kjer je c koncentracija raztopljenega plina v raztopini z enotami mol/m^3 , P je parcialni tlak plina, ki je v ravnovesju z raztopino, $H(T)$ pa je Henryjev koeficient, ki je funkcija temperature. Velja zveza

$$H(T) = H_0 \exp \left[-c \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right], \tag{2}$$

kjer je H_0 Henryjeva konstanta, ki je za vsak plin drugačna in podaja linearno zvezo med njegovo koncentracijo in tlakom pri temperaturi $T_0 = 298K$, T pa absolutna temperatura. Henryjeva konstanta znaša za ogljikov dioksid $H_0(CO_2) = 3.4 \times 10^{-2}$ mol l/atm, za dušik pa $H_0(N_2) = 6.1 \times 10^{-4}$ mol l/atm, kjer atm označuje atmosfero, ki znaša 1.0197×10^5 Pa. Vidimo, da je topnost dušika približno 55-krat manjša pri danem parcialnem tlaku, od topnosti ogljikovega dioksida v neki raztopini. Vendar pa se zaradi lažjega eksperimentalnega opazovanja tvorbe plinastih mehurčkov v tekočinah in lažjega modeliranja tega pojava, obravnava sisteme pri konstantni temperaturi, zaradi česar lahko obravnavamo tudi Henrijev koeficient kot konstanto. Zato se bomo od slej nanjo tako tudi nanašali.

2.2 Laplaceov zakon

Drugi fizikalni zakon, ki nam pomaga razumeti tvorbo mehurčkov plina v raztopini je Laplaceov zakon. Ta pravi, da je tlačna razlika Δp med notranjostjo mehurčka in okolico, ki nastane zaradi ukrivljanja površine mehurčka

$$\Delta p = \gamma(R_1^{-1} + R_2^{-1}), \quad (3)$$

kjer je γ površinska napetost plinastega mehurčka, R_1 in R_2 pa sta glavna krivinska radija površine. Če imamo opravka s pravilno kroglico, kar lahko predpostavimo pri mehurčku plina z radijem r , je $R_1 = R_2 = r$. Tako lahko zapišemo tlak v mehurčku P_B kot

$$P_B = P_0 + \frac{2\gamma}{r}, \quad (4)$$

kjer je P_0 tlak zunaj mehurčka.

2.3 Prvi Fickov zakon

Za razumevanje difuzije raztopljenega plina v raztopini je ključen prvi Fickov zakon ali difuzijski zakon. Ta pravi, da je tok raztopljenega plina Q sorazmeren gradientu koncentracije raztopljenega plina c , s sorazmernostno konstanto D . matematično ga zapišemo kot

$$Q = -D \nabla c. \quad (5)$$

Minus smo zapisali zato, ker je $D > 0$, tok pa teče iz območja z večjo, na območje z manjšo koncentracijo raztopljenega plina.

2.4 Kritični radij

Sedaj poznamo tri temeljne zakone, ki opisujejo nastanek plinastih mehurčkov v raztopini, s katerimi si lahko pomagamo priti do ocene, kdaj in v kakšnih pogojih bodo nastajali mehurčki ter kakšni bodo. Ko obravnavamo pijačo, iz katere se izločajo plinasti mehurčki, lahko privzamemo, da imamo opravka s prenasičeno raztopino nekega plina. Koncentracijo plina podaja Henryjev zakon $c = HP$, tlak raztopljenega plina, ki je v ravnovesju z raztopino, pa je večji od zunanega zračnega tlaka: $P > P_0$. Zaradi prvega Fickovega zakona o difuziji pričakujemo, da je koncentracija raztopljenega plina na površini mehurčka v ravnovesju s koncentracijo plina v mehurčku

$$c_B = HP_B = H\left(P_0 + \frac{2\gamma}{r}\right). \quad (6)$$

Da pa bi se mehurček povečal, mora biti koncentracija raztopljenega plina v tekočini večja od koncentracije plina v mehurčku: $c > c_B$. Za to pa ni dovolj, da je raztopina prenasičena in da je tlak plina v raztopini večji od zunanega tlaka, temveč mora biti zadoščen še en pogoj; mehurčkov radij mora presežati neko mejno vrednost r_c , ki se glasi

$$r_c = \frac{2\gamma}{P - P_0} \quad (7)$$

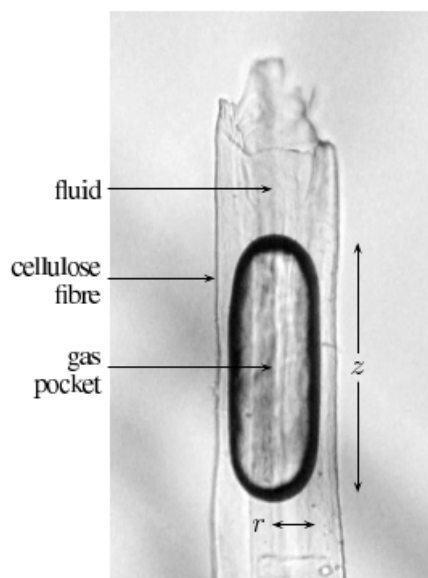
(P je tlak plina v raztopini). Mehurčkom, katerih radij presega to vrednost pravimo post-kritični mehurčki in so nujno potrebni, da se raztopina lahko peni. Kako pride do njihovega nastanka si bomo pogledali v nadaljevanju.

3 Penjenje gaziranih pijač

Kot zgled penjenja pijač z raztopljenim ogljikovim dioksidom bomo obravnavali penjenje penečih vin. V njih je namreč penjenje najbolj raziskano, zaradi enakih mehanizmov pa lahko ugotovitve in rezultate raziskav apliciramo na katerokoli pijačo z raztopljenim ogljikovim dioksidom.

Spontano nastajanje mehurčkov v raztopinah ogljikovega dioksida je zelo malo verjeten proces. Kot smo videli v prejšnjem poglavju, morajo imeti plinasti mehurčki nek minimalen radij, da se bodo večali. Nastanek takih mehurčkov pa je pri tlakih manjših od 100 atmosfer zelo malo verjeten. Ker imamo pri gaziranih pijačah opravka z mnogo manjšimi tlaki (peneča vina so pod tlakom cca. 6 atmosfer), mehanizem spontanega nastajanja mehurčkov ne pride v poštev. Raziskave so pokazale, da se mehurčki v gaziranih pijačah tvorijo v t.i. plinastih žepkih, v katere prehajajo plini iz tekočine z difuzijo [1]. Tako se večajo do neke mejne velikosti, ko se od njih odcepi mehurček in splava na površje. Če ima žepček še vedno post-kritično velikost, se bo še naprej večal in s ponavljanjem opisanega postopka tvoril "verigo" mehurčkov, ki jih lahko opazimo v gaziranih pijačah. Dolgo je veljalo, da plinasti žepki nastanejo na nepravilnostih oz. motnjah na steklu. Vendar je podrobna analiza steklenih korarcev pokazala, da so te nepravilnosti premajhne, da bi se v njih lahko tvorili

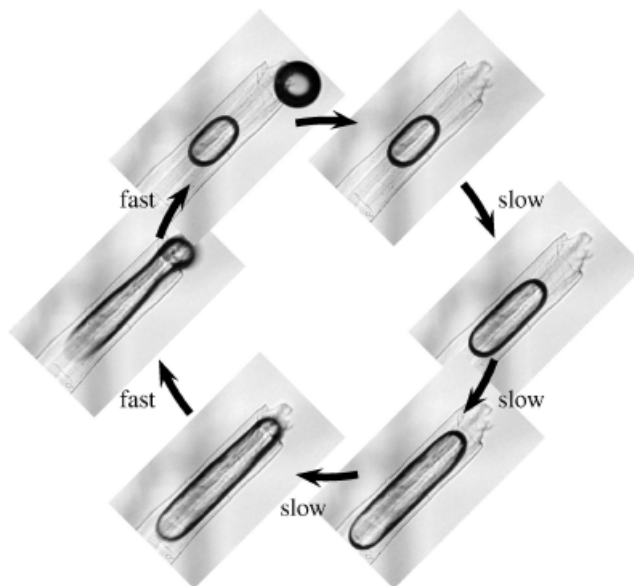
plinasti žepki postkritične velikosti. Mikroskopska opazovanja območij tvorjenja “verig“ mehurčkov so privedla do ugotovitve, da mehurčki izhajajo iz celuloznih vlaken, ki so na kozarce prispela bodisi iz krp z brisanjem kozarcev ali kot prašni delci iz zraka. V njih se namreč lahko tvorijo plinasti žepki postkritične velikosti, iz katerih preko prej opisanega mehanizma izhajajo mehurčki (slika 1). Kot dokaz, da so celulozna vlakna glavni krivec za penjenje gaziranih pijač služi eksperiment, pri katerem je bilo peneče vino nalito v kozarec, opran z raztopino kromove kisline, ki raztopi celulozna vlakna in ostale organske snovi. V tem kozarcu ni bilo opaziti plinastih mehurčkov [1].



Slika 1: Plinski žepek z radijem r in višino z ter tekočina v votlem celuloznem vlaknu. Vir: [1]

Kot zanimivost lahko omenim, da lahko nepravilnosti na steklu vseeno tvorijo mehurčke. Obstajajo namreč posebni kozarci za peneča vina, ki imajo na steklu nalašč narejene mo-
tnje, ki so dovolj velike, da povzročajo penjenje.

Slika 2 nam lepo prikazuje proces tvorjenja mehurčkov v celuloznih vlaknah. Na zgornji desni sliki vidimo cilindričen plinasti žepek v vlaknu, ki na slikah v smeri puščic zaradi difuzije plinov iz raztopine v plinasti žepek počasi narašča. Ko zračni žepek doseže konec vlakna, postane nestabilen in mehurček se od žepka odcepi, kar je prikazano na zgornji levi sliki. Tu imamo opravka z dvema časovnim skalama: prva opisuje časovno obdobje rasti plinastega žepka (ta narašča eksponentno s časom) in je daljša, druga pa opisuje odcepitev mehurčka od plinastega žepka in je mnogo krajša.



Slika 2: Naraščanje plinastega žepka v celuloznem vlaknu. Zgornja desna sličica prikazuje plinasti žepček v vlaknu, ki v smeri puščic zaradi difuzije plinov iz raztopine v plinasti žepček počasi narašča, dokler ne doseže konca vlakna, postane nestabilen in se od njega odcepi mehurček, kot prikazuje zgornja leva sličica. Vir: [1]

Poglejmo si, kako bi izgledal preprost matematični model opisanih mehanizmov nastajanja plinastih žepkov v celuloznih vlaknih. Zapišimo spremembo ogljikovega dioksida N_1 (v molih) v plinastem žepku s pomočjo tokov ogljikovega dioksida iz raztopine preko stene celuloznega vlakna Q_W in tokov ogljikovega dioksida preko sferičnih kapic na koncih plinastih žepkov Q_{SC} kot

$$\frac{dN_1}{dt} = 4\pi r^2 Q_{SC} + 2\pi r z Q_W. \quad (8)$$

Tu smo z r označili polmer cilindričnega plinastega mehurčka, z z pa njegovo višino. Za lažjo predstavo opisanih tokov si pogledajmo sliko 3. Da teče difuzijski tok ogljikovega dioksida iz raztopine v plinasti žepček, mora biti koncentracija raztopljenega ogljikovega dioksida v tekočini večja od koncentracije ogljikovega dioksida v žepku. Razdaljo, na kateri preide koncentracija ogljikovega dioksida v plinastem žepku c_B v koncentracijo raztopine c_1 označimo z λ . Tako lahko zapišemo gostoto toka ogljikovega dioksida iz raztopine v plinasti žepček na sferičnih kapicah s pomočjo enačb 1 in 5 kot

$$Q_{SC} = D_1 \frac{(c_1 - c_B)}{\lambda} = \frac{D_1 H_1}{\lambda} (P_1 - P_B) \quad (9)$$

(z indeksom 1 so označene količine v raztopini). Ocenimo sedaj še difuzijski tok ogljikovega dioksida v plinasti žepček preko celulozne stene. Tok lahko teče skozi steno zaradi njene poroznosti (luknjičavosti). Uporabimo isto difuzijsko razdaljo λ kot prej, difuzijsko konstanto pa tokrat zapišemo kot $D_{1\perp} \approx 0.2D_1$ [1]. Tako zapišemo Q_W kot

$$Q_W = D_{1\perp} \frac{(c_1 - c_B)}{\lambda} = \frac{D_{1\perp} H_1}{\lambda} (P_1 - P_B). \quad (10)$$

Upoštevajoč splošno plinsko enačbo, ki se glasi

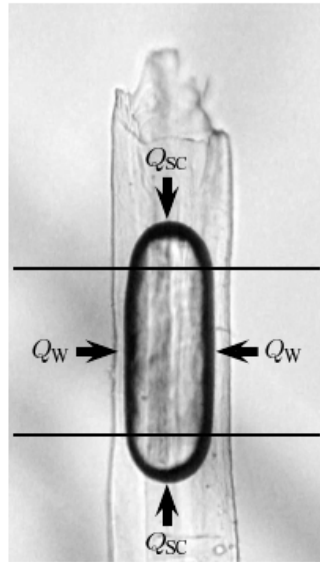
$$P_B \pi r^2 z = N_1 RT, \quad (11)$$

kjer sta R splošna plinska konstanta in T absolutna temperatura, lahko nadomestimo N_1 iz enačbe 8 z višino plinastega žepka z iz enačbe 11, da dobimo, kako se višina žepka spreminja s časom. Ko v enačbo 8 vnesemo še izraza za gostoti toka ogljikovega dioksida Q_W in Q_{SC} in jo pointegriramo, dobimo zvezo med višino zračnega žepka in časom

$$z = \left(z_0 + \frac{2D_1}{D_{1\perp}} r \right) \exp\left(\frac{t}{\tau}\right) - \frac{2D_1}{D_{1\perp}} r, \quad (12)$$

$$\tau = \frac{r \lambda P_B}{2RT H_1 D_{1\perp} (P_1 - P_B)}. \quad (13)$$

Tu je z_0 začetna višina plinastega žepka, τ pa karakteristični čas rasti plinastih žepkov. Izkaže se, da je τ hkrati tudi dobra ocena časa, potrebnega za nastanek mehurčka [1]. Ko v enačbo 13 vstavimo še vrednosti parametrov iz tabele na sliki 4, ki tu nastopajo, dobimo, da sta karakteristična časa tvorbe mehurčkov za penino $\tau = 0.04$ s, za pivo z raztopljenim ogljikovim dioksidom pa $\tau = 0.08$ s.



Slika 3: Slika prikazuje plinasti žep v celuloznem vlaknu. Z vodoravnima puščicama je označena smer difuzijskih tokov ogljikovega dioksida preko celulozних sten Q_W , z navpičnima puščicama pa smer difuzijskih tokov ogljikovega dioksida preko sferičnih kopic na koncih plinastih žepkov Q_{SC} . Vir: [1]

Parameter	Value
r	$6.00 \times 10^{-6} \text{ m}$
λ	$14.00 \times 10^{-6} \text{ m}$
γ	$47.00 \times 10^{-3} \text{ N m}^{-1}$
D_1	$1.40 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$
D_2	$2.00 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$
H_1	$3.4 \times 10^{-4} \text{ mol m}^{-1} \text{ N}^{-1}$
H_2	$6.1 \times 10^{-6} \text{ mol m}^{-1} \text{ N}^{-1}$
T	293 K
P_0	$1.00 \times 10^5 \text{ Pa}$
Champagne	
P_1	$6.40 \times 10^5 \text{ Pa}$
Carbonated Beer	
P_1	$3.80 \times 10^5 \text{ Pa}$
Stout Beer	
P_1	$0.80 \times 10^5 \text{ Pa}$
P_2	$3.00 \times 10^5 \text{ Pa}$

Slika 4: Tabela vrednosti parametrov, uporabljenih pri različnih izračunih, opisanih v seminarju. Vir: [1]

4 Penjenje temnega piva

Če je v pivu poleg ogljikovega dioksida raztopljen še dušik, bo to imelo drugačne lastnosti kot ostale pijače, v katerih je raztopljen le ogljikov dioksid. Nekaj sem jih naštel že v uvodu in vplivajo na okusu piva. Sedaj pa si pogledjmo še vpliv dušika na fizikalne lastnosti mehurčkov v pivu. Zaradi manjše topnosti dušika od ogljikovega dioksida v vodi, so dušikovi mehurčki manjši, kar se pozna v strukturi pene. Ta je v primerjavi s peno iz ogljikovega dioksida dlje časovno obstojna, gostejša in kompaktnjša. Mehurčki v peni namreč počijo, ker iz njih prehaja plin v zrak, zaradi česar se manjšajo, in zato, ker njihova tekočinska lupina počasi hlapi, dokler ni pretenka in počí. V majhnih mehurčkih so ti pojavi počasnejši kot v velikih, zato so manjši mehurčki obstojnejši. Majhnost mehurčkov pa privede do še enega zanimivega pojava - tonjenja mehurčkov. Pri tem igra pomembno vlogo oblika kozarca; ta se mora od dna proti vrhu širiti. Ko se mehurčki zaradi vzgona vzpenjajo navpično proti gladini, se zaradi oblike kozarca hkrati oddaljujejo od njegovih sten. Zato je gostota tekočine ob robovih kozarca večja od gostote tekočine pri središču kozarca, kjer je več mehurčkov. Zaradi tega



Slika 5: Tonjenje mehurčkov ob robu kozarca piva "v valovih". Vir [11]

začne ob robovih pivo tonit, v središču pa se vzpenjat. Hkrati pa v sredini kozarca vzpenjajoči se mehurčki potiskajo pivo navzgor, kar dodatno ojači tok kroženja piva. Tako sila upora piva na majhne dušikove mehurčke ob robu kozarca prevladuje nad silo vzgona, zaradi česar mehurčki tonejo [13],[12]. Ker pa je tok mehurčkov proti dnu kozarca nestabilen, se to dogaja v "valovih", kot prikazuje slika 5.

Niso pa vse lastnosti raztopljenega dušika pozitivne. V pivu z raztopljenim ogljikovim dioksidom je za nastanek pene na gladini dovolj že to, da pivo nalijemo, kar pa ne drži za piva z raztopljenim dušikom. Ta je namreč k penjenju treba spodbuditi. Točena temna piva se penijo, ko izhajajo iz majhne odprtine na koncu točilne pipice, skozi katero jih potiska tlak mešanice plinov dušika (75%) in ogljikovega dioksida (25%), ki znaša cca. 2.6 bar in se nahaja v sodu s pivom. Za penjenje temnega piva v pločevinkah pa poskrbi posebna kroglica, v kateri je dušik pod enakim tlakom, kot je tlak v pločevinki; ta je višji od zračnega. Ko pločevinko odpremo, se tlak v njej izenači z zračnim, kar pa se mora zgoditi tudi s tlakom plina v kroglici. Zato začne iz kroglice skozi majhno luknjico v obliki majhnih in hitrih mehurčkov izhajati dušik. Med plavanjem mehurčkov po pivu in med nalivanjem piva v kozarec, se ti mehurčki dobro premešajo in razporedijo po tekočini in tako kot opisuje prejšnje poglavje, vežejo nase še pline, raztopljene v pivu, prenasičenim s plini. Ko ti mehurčki priplavajo na vrh, nastane značilna, gosta pena.

5 Tvorba mehurčkov v temnem pivu

Omenili smo že, da sta mehanizma nastajanja mehurčkov ogljikovega dioksida in mehurčkov dušika enaka. Poglejmo si torej, zakaj se dušikovi mehurčki ne sproščajo iz celuloznih vlaken, tako kot mehurčki ogljikovega dioksida. Za računanje obnašanja plinastega žepka iz ogljikovega dioksida in dušika v celuloznem vlaknu se poslužimo enakega postopka kot v 3. poglavju, kjer smo obravnavali plinasti žepek samo iz ogljikovega dioksida, le da tokrat v računu vpoštevamo oba plina. Naj bo P_B celoten tlak plinastega žepka, N_1 in N_2 pa količini ogljikovega dioksida in dušika v plinastem žepku. Parcialna tlaka ogljikovega dioksida P_{B1} in dušika P_{B2} v plinastem žepku lahko zapišemo kot

$$P_{B1} = \frac{N_1}{N_1 + N_2} P_B \quad (14)$$

$$P_{B2} = \frac{N_2}{N_1 + N_2} P_B. \quad (15)$$

Tako lahko po enakem postopku kot v 3. poglavju izračunamo koncentracije ogljikovega dioksida in dušika na površini žepka, tokova obeh raztopljenih plinov v žepku skozi celulozno steno in polkrožno kapico žepka in tako pridemo do enačb, ki opisujejo spreminjanje koncentracij obeh plinov v plinastih žepih s časom. Te lahko reskaliramo z

$$N_{scale} = \frac{2D_2P_B\pi r^3}{D_{2\perp}RT} \approx 3.22 \times 10^{-13} \text{mol}, \quad (16)$$

$$t_{scale} = \frac{rP_B\lambda}{2D_{2\perp}H_2P_2RT} \approx 2.73\text{s}, \quad (17)$$

kjer je difuzijska konstanta dušika skozi celulozno steno $D_{2\perp} = 0.2D_2$, P_2 tlak dušika v raztopini in H_2 Henryjev koeficient za dušik. Tako lahko enačbe spreminjanja koncentracij ogljikovega dioksida in dušika v plinskem žepku zapišemo v brezdimenzijski obliki kot

$$\epsilon \frac{dN_1}{dt} = (1 + N_1 + N_2) \left(1 - \frac{\alpha_1 N_1}{N_1 + N_2} \right), \quad (18)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = (1 + N_1 + N_2) \left(1 - \frac{\alpha_2 N_2}{N_1 + N_2} \right), \quad (19)$$

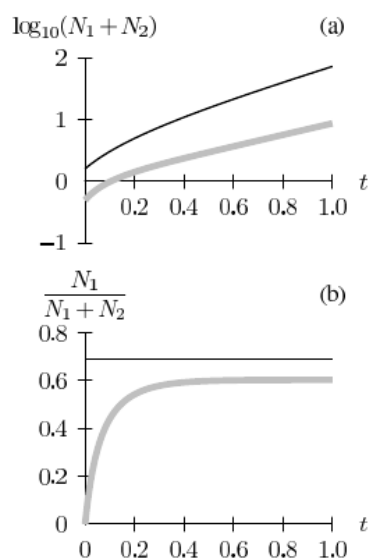
kjer so sedaj N_1 , N_2 in t brezdimenzijske spremenljivke, ϵ , α_1 in α_2 pa so

$$\epsilon = \frac{D_2 H_2 P_2}{D_1 H_1 P_1} \approx 0.096 \quad (20)$$

$$\alpha_1 = \frac{P_B}{P_1} \approx 1.45 \quad (21)$$

$$\alpha_2 = \frac{P_B}{P_2} \approx 0.39. \quad (22)$$

Ker se brezdimenzijskih enačb 18 in 19 ne da rešiti analitično, lahko dobimo rezultata na dva druga načina: s perturbacijo, ko predpostavimo, da je $\epsilon \ll 1$ (to fizikalno pomeni, da je vzpostavitev ravnovesnega stanja ogljikovega dioksida hitra) ter z numeričnim reševanjem (za začetni vrednosti koncentracij plinov sta bili izbrani za ogljikov dioksid $N_1 = 0$ in za dušik $N_2 = 0.5$). Rezultata obeh izračunov sta prikazana na sliki 6. Numerični račun nam pove, da je karakterističen čas tvorbe mehurčkov v temnem pivu $\tau = 1.28$ s, kar je 15-krat počasneje kot v pivu z raztopljenim ogljikovim dioksidom in 30-krat počasneje kot v penečih vinih [1]. H temu pa moramo prišteti še dejstvo, da so mehurčki v temnem pivu manjši do mehurčkov v ostalih vrstah piva in jih je potrebno veliko več za nastanek enake količine pene. Sedaj razumemo, zakaj samodejno penjenje temnega piva ni dovolj za nastanek pene in ga je k temu potrebno spodbuditi z dodatnimi mehanizmi.

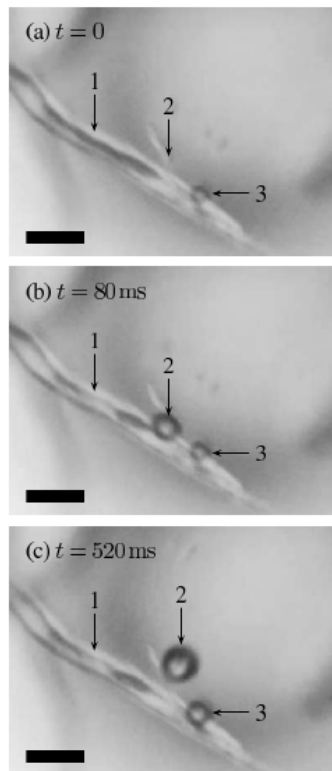


Slika 6: Perturbacijska (črna črta) in numerična (siva črta) rešitev brezdimenzijskih enačb 18 in 19. Na grafu (a) je prikazana rast plinastega žepka v odvisnosti od časa, na grafu (b) pa delež ogljikovega dioksida v plinastem žepku v odvisnosti od časa. (Perturbacijska rešitev predpostavlja, da je koncentracija ogljikovega dioksida v plinastem žepku v ravnovesju z njegovo koncentracijo v raztopini in precenjuje hitrost rasti žepka). Vir: [1]

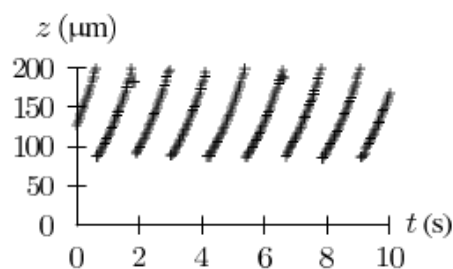
6 Eksparimentalni rezultati

Da dobimo temno pivo nasičeno s plini, moramo pločevinko odpreti zelo počasi, da se tlaka v potopljeni kroglici, napolnjeni z dušikom in pločevinki, izenačita čimbolj enakomerno. Tako se namreč iz kroglice ne bo nenadoma sprostilo veliko plina in povzročilo izločanja plina iz piva, po prej opisanem mehanizmu, temveč se bo plin sproščal počasi in po poti do gladine bodo zračni mehurčki nase vezali le malo plina. To naredimo tako, da na pločevinko nanesimo malo lepljive, mehke mase, kot je plastelin, in skozi jo naredimo z buciko majhno luknjico skozi pločevinko. Tako se bo pritisk v pločevinki izenačeval z zračnim vsaj kakšno minuto. Nato lahko pločevinko normalno odpremo in pivo počasi nalijemo v kozarec, na gladini pa ne bomo opazili pene. Če na ta način pivo vlijemo v plitko posodo, v kateri se nahajajo celulozna vlakna, (teh je veliko v laboratorijskem filtrirnem papirju ali v filtrirnem papirju za kavo), lahko v njih že s preprostim mikroskopom opazujemo tvorbo mehurčkov. To je prikazano na sličicah s slike 7, ki so zaporedoma posnete preko preprostega mikroskopa.

Dolžine plinastih žepkov z lahko tudi merimo in jih narišemo kot funkcije časa. To prikazuje graf na sliki 8, na katerem lahko vidimo, da dolžina plinastih žepkov sprva narašča do kritične meje, nato pa se v mnogo krajšem časovnem intervalu od žepka loči mehurček. To se dogaja zaporedoma, velikosti odcepljenih mehurčkov pa so približno enake.



Slika 7: Zaporedje sličic celuloznega vlakna posnetih s pomočjo mikroskopa. Na slikah je z 1 označen plinasti žepek, ujet v celuloznem vlaknu, z 2 je označen plinasti mehurček, ki nastane, ko zraste žepek do odprtine v celuloznem vlaknu in s 3 plinasti mehurček, ki raste, medtem ko je pripet na celulozno vlakno. S črno ploščico je označena skala in znaša $50 \mu\text{m}$. Na sličici (a) je plinasti žepek (1) dosegel odprtino celuloznega vlakna, na sliki 2 se je začel tvoriti plinasti mehurček (2), na sliki 3 pa se je plinasti mehurček (2) odcepil od vlakna. Vir: [1]



Slika 8: Graf prikazuje velikost plinastih žepkov z v odvisnosti od časa. Dolžina plinastih žepkov sprva narašča do kritične meje, nato pa se v mnogo krajšem časovnem intervalu od žepka loči mehurček, plinasti žepek pa se zmanjša. Vir: [1]

Preučevanje tvorbe plinastih mehurčkov je v temnem pivu veliko lažje kot v ostalih pijačah z raztopljenim ogljikovim dioksidom. Mehurčki v slednjih so namreč veliko večji

od mehurčkov dušika, zaradi česar ob odcepu premešajo tekočino ob celuloznem vlaknu in ga premaknejo iz gorišča slike. Poleg tega večji mehurčki, ko priplavajo na gladino in pridejo v stik z zrakom počijo in se v obliki majhnih kapljic razpršijo in umažejo sprednjo lečo objektiva. Zaradi teh pojavov je opazovanje mehurčkov ogljikovega dioksida precej oteženo.

7 Zaključek

V seminarju smo si pogledali mehanizme penjenja temnega piva z raztopljenim ogljikovim dioksidom in dušikom ter ga primerjali s penjenjem drugih pijač, ki vsebujejo le raztopljen ogljikov dioksid. Videli smo, da je zaradi manjše topnosti dušika v vodi velikost mehurčkov in struktura pene v temnem pivu drugačna od mehurčkov in pene v ostalih penečih pijačah, kar da temnemu pivu svojevrsten okus. Vendar pa je zaradi počasnejše tvorbe mehurčkov v temnem pivu le-tega potrebno h penjenju spodbuditi, naprimer s kroglicami napolnjenimi z dušikom. Ker pa je mehanizem tvorbe mehurčkov v celuloznih vlaknih enak tako za dušik, kot tudi za ogljikov dioksid, se poraja vprašanje, če morda ne bi bilo bolj smiselno prekriti notranje stene pločevinke s celuloznimi vlakni in tako nadomestiti dušikovo kroglico. Veliko je še tudi neznank o točnih mehanizmih odcepa plinskega mehurčka od plinskega žepka in celuloznega vlakna ter o območjih spremembe koncentracije raztopljenega plina, okrog plinskih mehurčkov. Odgovre na ta in druga vprašanja bomo našli z nadaljnimi raziskavami.

Literatura

- [1] W. T. Lee, M. G. Devereux: *Foaming in stout beers* (arXiv:1105.2263 [physics.chem-ph], May 2011)
- [2] <http://en.wikipedia.org/wiki/Stout>
- [3] <http://en.wikipedia.org/wiki/Beer>
- [4] http://en.wikipedia.org/wiki/Henry's_law
- [5] http://www3.ul.ie/wlee/stout_beer.html
- [6] <http://www.micromatic.com/images/products/descriptions/36387/00078-D0107Stout%20Door%20Kit.pdf>
- [7] Alenka Čopič et. al.: *KVARKADABRA V KUHINJI Znanstvene razlage kuhanja in prehrane* (Kvarkadabra - društvo za tolmačenje znanosti, 2009)
- [8] http://www3.ul.ie/wlee/stout_beer.html
- [9] http://www3.ul.ie/wlee/sinking_bubbles.html
- [10] http://www3.ul.ie/wlee/bubble_nucleation.html
- [11] <http://www.staff.ul.ie/obriens/index.html>
- [12] E. S. Benilov, C. P. Cummins, W. T. Lee: *Why do bubbles in Guinness sink?*, (arXiv:1205.5233 [physics.flu-dyn], May 2012)
- [13] <http://phys.org/news/2012-05-irish-mathematicians-guinness-video.html>

Opomba: Vsi internetni naslovi so bili dejavni novembra, 2012