

RAZTAPLJANJE CO₂ V EMBALIRANI VODI ALI BREZALKOHOLNI PIJAČI IN S TEM POVEZANE MOŽNE POŠKODBE

PROBLEMS ASSOCIATED WITH THE DISSOLUTION OF CO₂ IN THE CASE OF BOTTLED WATER AND NON-ALCOHOLIC BEVERAGES

Darko Drev^{1,2}, Mitja Peček^{1,2}, Jože Panjan²

¹Inštitut za vode Republike Slovenije, Univerza v Ljubljani, Hajdrihova 28c, 1000 Ljubljana, Slovenija
²Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Jamova 2, 1000 Ljubljana, Slovenija

Prijem rokopisa – received: 2008-06-05; sprejem za objavo – accepted for publication: 2008-08-13

Pri vodi in brezalkoholni pijači, ki ima raztopljen ogljikov dioksid, lahko nastane pri odpiranju plastenke ali steklenice poškodba. Ta poškodba je lahko posledica izmeta zamaška in pijače v obraz, pa tudi eksplozije steklenice. To se lahko zgodi, če je v vodi prevelik tlak raztopljenega CO₂ in je tudi zamašek pokvarjen. Eksplozija steklenice lahko nastane pri nekvalitetnem materialu. Pravilno izdelan zamašek bi moral med odpiranjem v steklenici postopno zmanjševati tlak. Če se to ne zgodi in je v plastenki velik tlak CO₂, lahko pride do izmeta zamaška v obraz ter tudi burnega iztoka tekočine iz plastenke. Takšni primeri niso samo teoretični, temveč se dogajajo tudi v praksi. Eksplozija steklenice nastane predvsem takrat, kadar so v steklu prekomerne napetosti kot posledica nehomogenosti materiala in neustrezne izdelave.

Ključne besede: brezalkoholne pijače, ogljikov dioksid, CO₂, plastenke, tlak, poškodbe

In the case of bottled water or bottled non-alcoholic beverages that contain dissolved carbon dioxide, opening the (glass or plastic) bottle can prove dangerous to the person opening it. Unscrewing the bottle cap can cause the cap or the contained liquid to be ejected away from the bottle with sufficiently high speed to cause physical harm to a person, or the entire bottle can explode. A properly functioning cap reduces bottle pressure slowly and continuously during the bottle opening process. The ejection of the cap and contained liquid is caused by exceedingly high pressure in the bottle, while both the ejection effect or the explosion of the bottle is caused by a malfunction of the bottle cap due to insufficient homogeneity of the materials used or inadequate processes applied in the production of the cap.

Key words: non-alcoholic beverages, carbon dioxide, CO₂, plastic bottle, problems

1 UVOD

Pri izbiri materiala za embaliranje vode in brezalkoholnih pijač niso pomembne samo tiste njegove lastnosti, ki zagotavljajo higiensko neoporečnost, temveč tudi druge lastnosti, kot so na primer: možnost enostavne manipulacije, nizka cena, možnost reciklaže itd. [Spellman, 1999], [Havelaer, 2003]. Glede higienske neoporečnosti lahko prištejemo steklo med kemijsko in fizikalno najprimernejše materiale za embaliranje pijač. Glavna pomanjkljivost steklene embalaže je lomljivost in s tem povezane težave pri transportu in ravnanju z njo [Nölle, 1997]. V zadnjih dvajsetih letih se zato embalira vedno več vode in brezalkoholnih pijač v plastenke [Drev, 2005]. Med polimernimi materiali se za najmanjše plastenke največ uporablja od 250 ml do 2,5 l polietilentereftalat (PET), pri večjih posodah pa tudi polietilen (PE), polivinilklorid (PVC), polistiren (PS), polipropilen (PP) itd. Razlog za to je enostavno delo in nizka cena embalaže. Pri embalirani vodi in brezalkoholnih pijačah pa ne smemo pozabiti na zamaške. Ti so pogosto izdelani iz drugačnega materiala kot steklenice oziroma plastenke. Pri steklenicah so navadno kovinski zamaški s polimernimi ali plutovinastimi tesnili, pri plastenkah pa gre navadno za podoben material kot pri plastenki ali pa za katerega izmed

standardnih termoplastov (PE, PP, PVC). V tem članku se omejujemo le na problematiko možnih poškodb pri odpiranju steklenic ali plastenk. Velika težava pa nastane, če steklenico ali plastenko raznese v navzočnosti ljudi. Pri tem so lahko posledice eksplozije steklenice mnogo hujše kot pri plastenki. Drobcji stekla lahko poškodujejo ljudi na večji razdalji in mnogo huje, kot je to možno pri plastenki. Eksplozije steklenic ali plastenk, v katerih je embalirana gazirana pijača, so posledica prevelikega tlaka CO₂ v posodi ter tudi napak in s tem povezanih strižnih napetosti v materialu. Pri steklu, ki je krhko, so lahko včasih te strižne napetosti tako velike, da se lahko razleti steklenica tudi brez povečanega tlaka CO₂ v notranjosti. Pri plastični embalaži pa to ni mogoče. Strižne napetosti so posledica različnih raztezkov in skrčkov v materialu, ki nastanejo zaradi nehomogenosti materiala, temperaturne razlike, migracijskih procesov itd.

2 TEORETIČNI DEL

2.1 Raztapljanje ogljikovega dioksida v vodi

Maksimalna količina CO₂, ki se lahko raztopi v koka-koli ali vodi, je določena s Henryjevim zakonom (slika 1). Ta zakon pravi, da je pri dani temperaturi količina

plina, ki se raztopi v tekočini, premo sorazmerna njegovemu parcialnemu tlaku (slika 1).

$$n_i = K_i p_i \quad (1)$$

Tu pomenijo:

n_i [mol/m³] – količina plina, ki se raztopi v tekočini

K_i [mol Pa⁻¹m⁻³] – konstanta Henryjevega zakona

p_i [Pa] – parcialni tlak plina

V tabelah 1 in 2 so prikazane Henryjeve konstante in konstante C za glavne sestavine zraka.

Tabela 1: Henryjeve konstante za vodo in pline pri 298 K (de.wikipedia.org/wiki)

Table 1: Henry's constants for the solubility of some gases in water at 298 K

Enačba:	$k_{H,cp} = \frac{C_{voda}}{p_{plin}}$	$k_{H,cp} = \frac{p_{plin}}{C_{voda}}$	$k_{H,px} = \frac{p_{plin}}{x_{voda}}$	$k_{H,cc} = \frac{C_{voda}}{p_{plin}}$
Enota:	$\frac{\text{mol}_{plin}}{1 \cdot \text{bar}}$	$\frac{1 \cdot \text{bar}}{\text{mol}_{plin}}$	$\frac{\text{bar} \cdot \text{mol}_{plin}}{\text{mol}_{plin}}$	[brez dimenzije]
O ₂	1,3·10 ⁻³	769,23	4,259·10 ⁴	3,180·10 ⁻²
H ₂	7,8·10 ⁻⁴	1282,05	7,099·10 ⁴	1,907·10 ⁻²
CO ₂	3,4·10 ⁻²	29,41	0,163·10 ⁴	0,8317
N ₂	6,1·10 ⁻⁴	1639,34	9,077·10 ⁴	1,492·10 ⁻²
He	3,7·10 ⁻⁴	2702,7	14,97·10 ⁴	9,051·10 ⁻³
Ne	4,5·10 ⁻⁴	2222,22	12,30·10 ⁴	1,101·10 ⁻²
Ar	1,4·10 ⁻³	714,28	3,955·10 ⁴	3,425·10 ⁻²
CO	9,5·10 ⁻⁴	1052,63	5,828·10 ⁴	2,324·10 ⁻²

Henryjeva konstanta je odvisna od temperature:

$$C = \frac{\Delta_{solv}H}{R} = \frac{-d \ln(K_i)}{d(1/T)} \quad (2)$$

Tu pomenijo:

$\Delta_{solv}H$ [J/mol] – entalpija

R [J/molK] – plinska konstanta

C [K] – konstanta

T [K] – temperatura

Tabela 2: Konstante C za različne pline

Table 2: Constants C for different gases

plin	O ₂	H ₂	CO ₂	N ₂	He	Ne	Ar
C /K	1700	500	2400	1300	230	490	1300

Ugotavljamo, da se pri dvakrat povečanem tlaku pri isti temperaturi dvakrat poveča količina raztopljenega plina. Seveda pa velja tudi nasprotno: če se tlak zmanjša, se zmanjša količina plina, ki je lahko raztopljena v tekočini in ta plin se iz tekočine izloči.

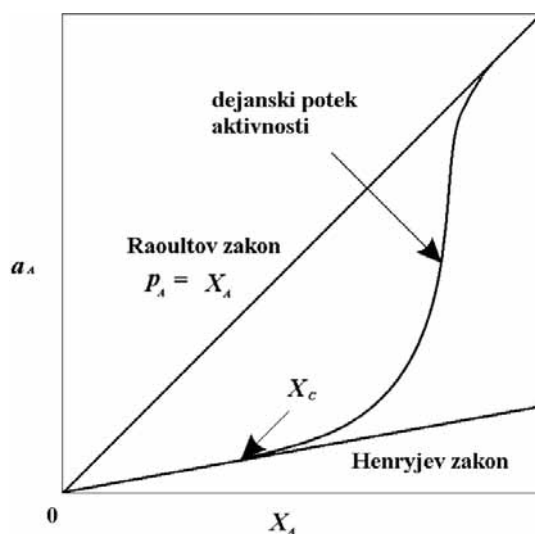
Plinska enačba za parcialni tlak posameznega plina:

$$p_i = (m_i/M_i) RV/T \quad (3)$$

Če plinsko enačbo za parcialni tlak združimo z Daltonovim zakonom, dobimo:

$$p = p_1 + p_2 + \dots + p_n = (m_1/M_1 + m_2/M_2 + \dots + m_n/M_n) \cdot RV/T \quad (4)$$

$$x_i = m_i/m \quad (5)$$



Slika 1: Prikaz topnosti plina CO₂ v vodi po Henryjevem zakonu in primerjava topnosti za idealne raztopine po Raoulovem zakonu²

Figure 1: Solubility of the gas CO₂ in water according to the Henry's law and comparison of the solubility to ideal solutions according to the Raoult's law²

Iz Daltonovega zakona tako dobimo enačbo za parcialni tlak posameznega plina:

$$p_i = (x_i/M_i) M_{zmesi} p \quad (6)$$

Tu pomenijo:

p [Pa] = tlak zmesi plinov v celoti

p_i [Pa] = parcialni tlak posameznega plina

x_i [mol/mol] = masni delež posameznega plina v zmesi

M_i [g/mol] = molska masa plina (masa enega kilo mola plina)

M_{zmesi} [g/mol] = molska masa zmesi

V termodinamiki ne govorimo o koncentracijah, temveč o aktivnostih določene komponente. Tudi v našem primeru je aktivnost CO₂ nekoliko drugačna od koncentracije in je podana z naslednjo enačbo:

$$a_A = \frac{p_A}{p_A^0} \quad (7)$$

Tu pomenijo:

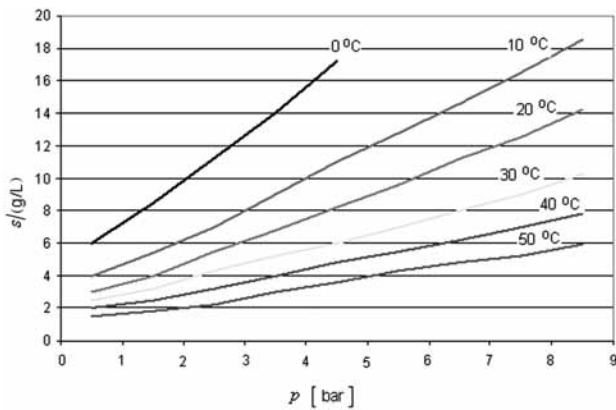
a_A = aktivnost plina

p_A = parcialni tlak realnega plina

p_A^0 = parcialni tlak idealnega plina

V idealni raztopini velja, da je parcialni tlak linearno sorazmeren deležu komponente v raztopini. Čim večji je njen delež, tem višji je parcialni tlak.

Ogljikov dioksid se raztaplja v vodi po Henryjevem zakonu v odvisnosti od temperature in tlaka (tabeli 3, 4). S slike 2 je razvidno, da se pri enakem tlaku polnjenja raztopi različna količina CO₂ pri različnih temperaturah. Če je bila na primer pozimi v polnilnici temperatura samo 10 °C, poleti pa 30 °C, je lahko nastala pri pritisku polnjenja 3 bar približno 100-odstotna razlika v količini raztopljenega CO₂. Zato je pomembno, da so polnilnice tudi zaradi teh razlogov klimatizirane.



Slika 2: Odvisnost topnosti CO₂ v vodi od tlaka in temperature v okolici

Figure 2: Dependence of the CO₂ solubility in water on pressure and temperature

V primeru, da je bila gazirana brezalkoholna pijača polnjena pozimi pri relativno nizki temperaturi (na primer 10 °C), brezalkoholno pijačo pa odpira oseba poleti v naravi, kjer nima hladilnika ali hladilne torbe, bo lahko temperaturna razlika vsaj 20 °C. Ta razlika pa povzroča sproščanje CO₂ in s tem znatno povečan tlak.

Tabela 3: Topnost CO₂ v odvisnosti od parcialnega pritiska CO₂ pri 1 bar¹⁶

Table 3: Solubility of CO₂ at a partial pressure for CO₂ of 1 bar abs¹⁶

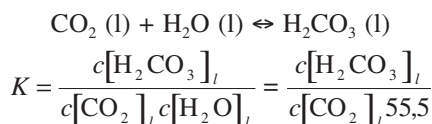
T/°C	0	10	20	30	40	50	80	100
Topnost CO ₂ v vodi [s/cm ³ /g]	1,8	1,3	0,88	0,65	0,52	0,43	0,29	0,26

Disociacijska konstanta ogljikove kisline je odvisna od temperature (Lide, 1991).

Tabela 4: Odvisnost disociacijske konstante ogljikove kisline (K_{1A}) od temperature

Table 4: Dissociation constant (K_{1A}) of carbonic acid at various temperatures

Temperatura T/°C	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
K _{1A} · 10 ⁷	2,64	3,04	3,4	3,1	4,6	4,5	4,1	4,0	5,4	5,3	5,9



Tu pomenijo:

(l) = tekočina (liquid)

K = ravnotežna konstanta

$$K_r = 55,5 \cdot K = \frac{c[\text{H}_2\text{CO}_3]_l}{c[\text{CO}_2]_l} \approx 0,0017 \quad (8)$$

2.2 Migracijski procesi voda-plastenka-okolica

Plastenke so praktično neprepustne za migracijske procese snovi iz okolice v vodo in iz vode v okolico. Pri

steklenicah so ti migracijski procesi še mnogo manjši. Za pločevinke pa pogosto to ne velja v celoti. Proces raztapljanja kovinskih ionov v vodi so znatni, posebno še, če kakovost pločevine ni najboljša. Če so v vodi prisotni razni dodatki (brezalkoholne pijače), se lahko ti procesi še pospešijo.

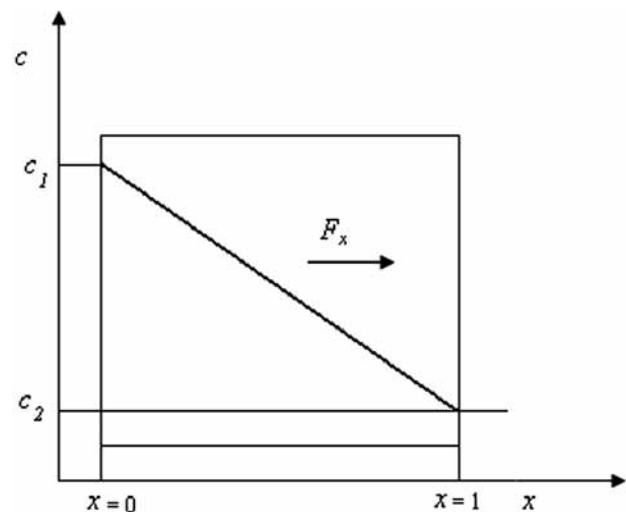
Migracijski procesi so odvisni od:

- lastnosti materiala,
- lastnosti permeatov,
- tlaka in koncentracije permeata,
- naknadne oksidacije v vodi,
- sestave atmosfere,
- drugih dejavnikov.

Pri plastenkah se pojavljajo zelo minimalni procesi prodiranja plinastih produktov iz atmosfere v tekočino (vodo, kokakolo) in iz tekočine v atmosfero (slika 3). Nobena plastika ni povsem neprepustna za pline, kot sta na primer kisik (O₂) in ogljikov dioksid (CO₂). Poleg migracijskih procesov plinastih produktov pa se lahko raztapljajo določene druge snovi iz embalaže v tekočino in obratno [Gächter,1989]. Vsi ti procesi morajo biti zelo minimalni, kar se doseže z ustrežno izbiro plastike in dovolj tesnim zamaškom. Materiali za izdelavo plastenk za živila morajo biti iz ustreznih materialov ter tudi atestirani. PET – polietilentereftalat je v osnovi zelo primeren za embaliranje živil, vendar pa ne vsak, temveč le tisti, ki je bil izdelan na ustrezen način in tudi atestiran. Na primer, PET- regenerat se ne sme več uporabljati za embaliranje živil, ker ni dovolj kemijsko stabilen.

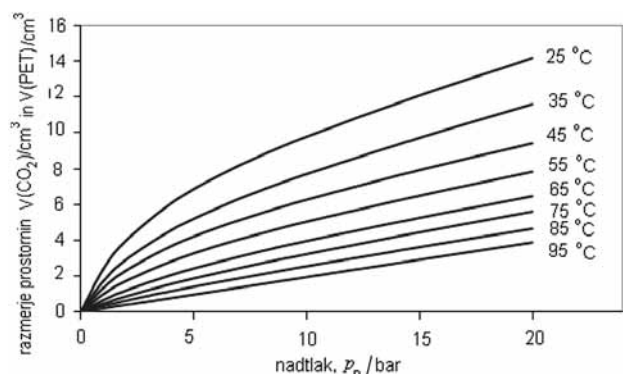
Prepustnost CO₂ skozi steno plastenke je odvisna od difuzijskega koeficienta in koncentracij CO₂ v tekočini in v zraku:

$$F_x = -D \frac{dc}{dx} = -D \frac{c_1 - c_2}{l} \quad (9)$$



Slika 3: Prikaz difuzijskega toka CO₂ skozi steno plastenke

Figure 3: Scheme of the diffusion flow of CO₂ through the plastic bottle wall



Slika 4: Topnost CO₂ v PET (59 % amorfne delu) v odvisnosti od nadtaka p_n in zunanje temperature⁹

Figure 4: Solubility of CO₂ in PET (59% of amorphous faze) in dependence of the pressure and temperature⁹

Tu pomenijo:

F_x [m s⁻¹] – tok

p_1 [Pa] – parcialni pritisk

D [m² s⁻¹] – difuzijski koeficient

c [mg/m³] – koncentracija

l [m] – debelina folije

Prepustnost PET-embalaže je odvisna od »topnosti« CO₂ v polimeru (**slika 4**). "Topnost" je odvisna od temperature, kristaliničnosti, molske mase PET ter dodatkov v plastiki. Prepustnost poveča delež amorfne oblike, nizka molekulska masa ter velika količina dodatkov. Zato je pri embaliranju vode in brezalkoholnih pijač zelo pomembno, da je material relativno čist in ima ustrezno molekulska maso. Na **sliki 5** je prikazan primer vpliva temperature na topnost CO₂ pri določeni sestavi PET. Na **sliki 6** pa je prikazana prepustnost O₂ za polimerne materiale PET za plastenke.

Tabela 5: Prepustnost PET plastike za pline¹⁵

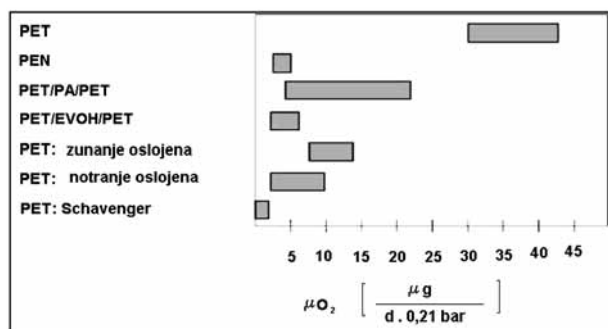
Table 5: Permeability of a PET layer plastics for gases¹⁵

Material	μCO_2 [cm ³ mm/(m ² d bar)]	μO_2 [cm ³ mm/(m ² d bar)]
PET	16	4
OPET	8	2
PEN	2	0,5
PVDE oslojen	0,05	0,03
EVOH	0,05	0,01
SiO ₂	0,01	0,002

V **tabeli 3** je prikazana prepustnost plastenke za CO₂ in O₂ in nekaterih drugih materialov, ki se uporabljajo za embaliranje pijač. Iz vseh navedenih podatkov je razvidno, da so PET-plastenke praktično neprepustne za CO₂ in druge pline. Zato ostanejo v plastenki še dolgo časa prevelike koncentracije CO₂, ki so bile vnesene pri polnjenju. To povzroča potencialno nevarnost poškodb.

2.3 Vpliv pH vrednosti na količino plinastega ogljikovika in s tem tudi na pritisk v plastenki

V kisli vodi in gaziranih brezalkoholnih pijačah sta v ravnotežju raztopljeni in plinasti CO₂ :

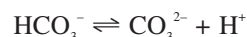


Slika 5: Prikaz prepustnosti O₂ za PET plastenke¹²

Figure 5: Permeability of PET plastic bottles for oxygen¹²



$$K_{a1} = \frac{c[\text{H}^+] \cdot c[\text{HCO}_3^-]}{c[\text{H}_2\text{CO}_3]} = 4,3 \cdot 10^{-7} \quad (10)$$



$$K_{a2} = \frac{c[\text{H}^+] \cdot c[\text{CO}_3^{2-}]}{c[\text{HCO}_3^-]} = 6 \cdot 10^{-11} \quad (11)$$

$$K_{a1} = \frac{x \cdot c[\text{HCO}_3^-]}{c[\text{H}_2\text{CO}_3]}$$

$$\left(\approx \frac{x \cdot c[\text{HCO}_3^-]}{c[\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{CO}_3]} \approx \frac{x \cdot c[\text{HCO}_3^-]}{c[\text{CO}_2]_l} \right) \quad (12)$$

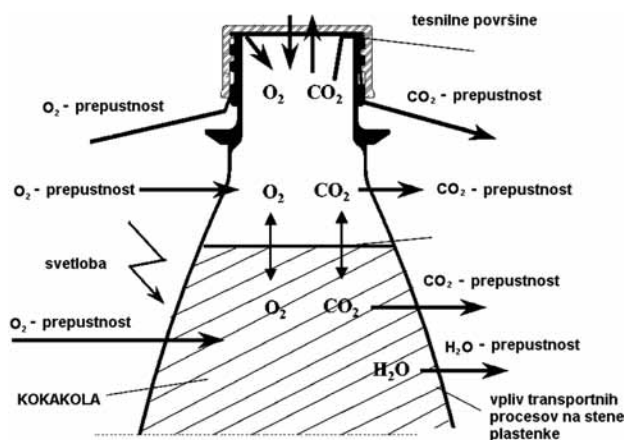
$$K_{a2} = \frac{x \cdot c[\text{CO}_3^{2-}]}{c[\text{HCO}_3^-]} \quad (13)$$

Tu pomenijo:

x [mol/L] = $c[\text{H}^+]$

K_{a1} [mol/L] = konstanta razpada H₂CO₃

K_{a2} [mol/L] = konstanta razpada HCO₃⁻



Slika 6: Prikaz migracijskih procesov v plastenki z brezalkoholno pijačo⁹

Figure 6: Migration processes in soft drink plastic bottle⁹

Kot je razvidno iz ravnotežne reakcije, je vsebnost plinastega CO₂ odvisna delno tudi od kemije in ne samo od Henryjevega zakona o topnosti CO₂ v vodi. Določene raztopljene snovi vplivajo na pH-vrednost, ta pa na ravnotežje plinastega in raztopljenega CO₂.

Ker se lahko s časom spreminja sestava raztopljenih snovi v vodi, se spreminja tudi pH-vrednost. S tem se spreminja tudi razmerje med topnih in plinastim CO₂.

Koncentraciji vodikovih c[H⁺] ali hidroksilnih ionov c[OH⁻] sta povezani preko konstante disociacije vode, zato je pH-vrednost merilo za koncentracijo vodikovih c[H⁺] in hidroksilnih ionov c[OH⁻].



Za konstanto disociacije velja naslednja formula:

$$\frac{c[\text{H}^+] \cdot c[\text{OH}^-]}{c[\text{H}_2\text{O}]} = K_{\text{H}_2\text{O}} = 1,8 \cdot 10^{-16} \quad (14)$$

$$c[\text{H}_2\text{O}] = \frac{1\text{L}}{M_{\text{H}_2\text{O}}} = \frac{1000 \text{ g/L}}{18 \text{ g/L}} = 55,5 \text{ mol/L}$$

$$c[\text{H}_2\text{O}] \cdot 1,8 \cdot 10^{-16} = 55,5 \cdot 1,8 \cdot 10^{-16} = 1 \cdot 10^{-14} = K_w \quad (15)$$

$$\lg c[\text{H}^+] + \lg c[\text{OH}^-] = -14 \quad (16)$$

$$\text{pH} = -\lg c[\text{H}^+] \quad (17)$$

Tu pomenijo:

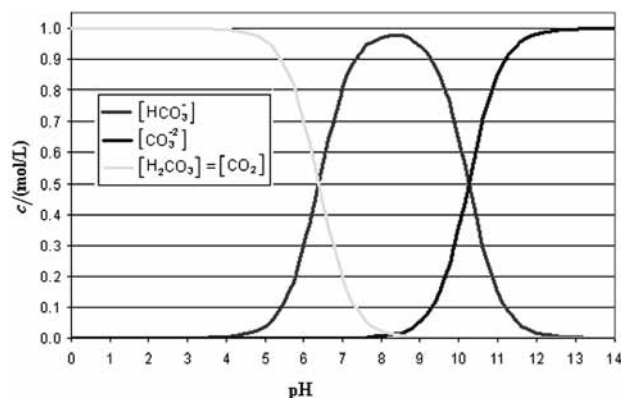
$K_{\text{H}_2\text{O}}$ [mol/L] = konstanta razpada vode

K_w [(mol/L)²] = ionski produkt vode

Na podlagi zgoraj navedenih reakcij in enačb lahko izračunamo ravnotežje med CO₂ in pH vrednostjo kot je prikazano na **sliki 7**.

Iz navedenega je razvidno, da se z zmanjšanjem pH-vrednosti poveča količina plinastega CO₂. To pa se lahko zgodi zaradi kemičnih reakcij raztopljenih substanc v brezalkoholni pijači. Te reakcije so navadno zanemarljive, saj mora ostati nespremenjena kakovost ustekleničenih brezalkoholnih pijač.

CO₂ pa nastaja tudi pri biokemijskih procesih razgradnje raztopljenih organskih snovi v vodi oziroma brezalkoholni pijači. Za to so potrebne bakterije in ustrezni pogoji. Pri embalirani vodi in brezalkoholnih



Slika 7: Ravnotežje CO₂ – pH-vrednost ⁷

Figure 7: pH-CO₂ equilibria ⁷

pijačah mora biti zagotovljena sterilnost embalaže in pijače, zato so takšne reakcije malo verjetne. Vendar pa jih ne moremo v celoti izključiti, posebno še pri sadnih sokovih, kjer je velika količina hraniva za razvoj bakterij.

3 PRAKTIČNI DEL

3.1 Primer sproščanja CO₂ zaradi dviga temperatur in dodajanja topila v gazirano brezalkoholno pijačo

a) Povečanje tlaka zaradi dviga temperature

- Pri preiskavi gazirane mineralne vode je bila izmerjena količina 3,8 mg CO₂/l.
- Iz grafikona na **sliki 2** je razvidno, da se z dvigom temperature od 15 °C na 40 °C poveča tlak CO₂ iz 1 bar na približno 4 bar.
- 3 bar nadtlaka lahko povzroči burno sprostitev brezalkoholne pijače tako kot je prikazano na **sliki 8**.
- Pri steklenicah z velikimi napetostmi v materialu pa lahko nastane celo eksplozija steklenice. Steklenice za brezalkoholne pijače so navadno preizkušene na tlak 7 bar.

b) Sproščanje CO₂ zaradi raztapljanja drugih snovi, ki dvigujejo pH vrednost

3.2 Izračun pH vrednosti za gazirano mineralno vodo pred dodatkom NaHCO₃ in po njem:

- raztopili smo 1 g NaHCO₃ v 1 L gazirane mineralne vode;
- v gazirani mineralni vodi je bila izmerjena vsebnost CO₂; 3,8 mg/L = 0,086 mol/L in 7,7 mg HCO₃⁻/L = 0,126 mol HCO₃⁻/L;
- pufer H₂CO₃ in NaHCO₃ ima pH = 6,4;
- izračun pH-vrednosti pred dodatkom NaHCO₃:

$$\text{pH} = 6,4 + \lg \frac{c[\text{HCO}_3^-]}{c[\text{CO}_2]} = 6,4 + \lg \frac{0,126 \text{ mol/L}}{0,086 \text{ mol/L}} = 6,4 + 0,16 = 6,56$$

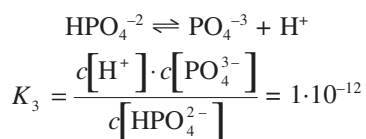
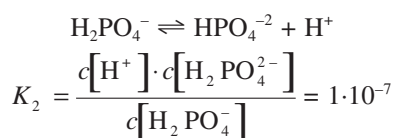
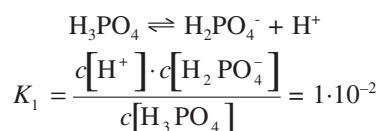
- izmerjena pH vrednost gazirane mineralne vode je bila približno 6,5;
- 1 mol H₂CO₃ = 62 g
- 1 mol CO₂ = 44 g
- 1 mol HCO₃⁻ = 61 g
- 1 mol NaHCO₃ = 84 g
- v 1 L gazirane mineralne vode smo dodali 10 g NaHCO₃ (0,12 mol);
- sprostila se je znatna količina CO₂, pri čemer se pH-vrednost ni opazno spremenila;
- izračun pH vrednosti po dodatku NaHCO₃:

$$\text{pH} = 6,4 + \lg \frac{c[\text{HCO}_3^-]}{c[\text{CO}_2]} = 6,4 + \lg \frac{(0,126 + 0,12) \text{ mol/L}}{0,086 \text{ mol/L}} = 6,4 + 0,45 = 6,85$$

- Izmerjena pH-vrednost po dodatku NaHCO₃ je bila približno 6,5, kar ni bistvena sprememba glede na prvotno stanje.

3.3 Sproščanje CO₂ zaradi dodatka NaHCO₃ v koka-kolo:

- pred dodatkom NaHCO₃ je bila izmerjena vrednost pH = 3;
- po dodatku 1 g NaHCO₃ v 1 L Coka cole je nastala burna reakcija sproščanja CO₂, približno tako kot je prikazano na sliki 8;
- po dodatku NaHCO₃ je imela Coka cola pH = 6;
- pri Coka coli je poleg ogljikove tudi znatna količina fosforne kisline. Zato je treba upoštevati poleg ravnotežnih reakcij H₃CO₃ tudi ravnotežne reakcije H₃PO₄



$$pH = -\lg c[H^+] = 3$$

$$c[H^+] = -\lg c[H^+] = 10^{-3} \text{ mol/l}$$

Izračun sproščene količine CO₂ po dodatku NaHCO₃:

$$c[H_2CO_3] = \frac{c[HCO_3^-] \cdot c[H^+]}{4,3 \cdot 10^{-7}} = \frac{[0,09 + 0,01] \cdot [0,001]}{4,3 \cdot 10^{-7}}$$

$$= \frac{10^{-4}}{4,3 \cdot 10^{-7}} = 232 \text{ mol/L}$$

$$232 \text{ mol/L CO}_2 = 4 \text{ g/L CO}_2$$

3.4 Poškodbe pri odpiranju plastenk

Oseba iz manjšega kraja na Dolenjskem, ki je odpirala dvolitrsko plastenko kokakole, je dobila zaradi tega poškodbe. Zamašek ji je vrglo v levo ličnico, hlape in tekočino pa v levo oko. V trenutku jo je močno zapeklo in na to oko ni videla nič več. Zaradi tega je morala poiskati zdravniško pomoč v bolnišnici. Na okulističnem oddelku je ostala 13 dni. Delne posledice poškodbe pa so ostale. Odškodnino za nastalo poškodbo poskuša iztožiti na sodišču.

V navedenem primeru je bil v plastenki povišan tlak CO₂ ter tudi pokvarjen zamašek. Tega ni bilo možno enostavno odpreti, temveč so bili za to potrebni dodatni napor. Zaradi tega se je v kokakolo vnašala dodatna



Slika 8: Prikaz burne ekspanzije Coka cole po odstranitvi zamaška
Figure 8: Ejection of liquid after removal of the Coca-cola bottle cap

kinetična energija, ki je sproščala vsebnost neraztopljenega CO₂. Poleg tega pa odpiranje pokvarjenega zamaška ni povzročalo postopnega sproščanja tlaka v plastenki.

Poznan je primer iz Nemčije, ko je plastenka s koka-kolo eksplodirala v rokah devetletnega otroka. Zardi poškodb, ki jih je pri tem dobil otok, je bila izplačana odškodnina 10.000 DM.

Podobno kot za navedena primera kokakole je poznano še več primerov poškodb z drugimi gaziranimi brezalkoholnimi pijačami in ustekleničeno kisló vodo.

V fazi polnjenja se je lahko raztopila dvakrat večja količina CO₂ kot pri nekoliko višji temperaturi pri enakem tlaku. Če se steklenica oziroma plastenka gazirane pijače pred odpiranjem še precej obrača, se znatni del raztopljenega CO₂ sprosti. Razlog za to je vnos kinetične energije v vodo, kar vpliva na dodatno sproščanje CO₂. Količina neraztopljenega CO₂ se tako nekajkrat poveča, kar po Henryjevem zakonu pomeni tudi zvišanje tlaka v plastenki. V takem primeru lahko pride pri odpiranju plastenke do približno takšnega pojava, kot je prikazan na **sliki 8**.

4 SKLEPI

Količina raztopljenega CO₂ v vodi ali brezalkoholni pijači ni pomembna samo zaradi zdravstvenih in kulinarčnih zahtev, temveč lahko vpliva tudi na poškodbe uporabnikov. Te so sicer zelo redke, vendar pa jih ne smemo zanemariti. V članku smo analizirali

vzroke poškodb in se v konkretnih primerih omejili le na poškodbe, ki lahko nastanejo zaradi prevelike količine CO₂ pri odpiranju plastenk. Obravnavali pa smo problem bistveno širše, tj. z vidika nastajanja prekomerne količine plinastega CO₂ v ustekleničeni pijači. Količina raztopljenega in plinastega ogljikovega dioksida je v glavnem definirana z osnovnimi plinskimi zakoni (Henryjev zakon), kar se pogosto pozablja. Tudi vrsta in količina raztopljenih snovi imata določen vpliv na topnost oziroma sproščanje CO₂. Veliko bolj problematično pa je nastajanje CO₂ pri biokemijskih procesih (alkoholno vretje, itd.), kar povzroča še večjo nevarnost poškodb pri odpiranju steklenic. Prekomerna količina CO₂ pa ni nevarna le pri odpiranju steklenic, temveč tudi med hranjenjem. Če je tlak tako velik, da ga embalaža več ne zdrži, nastane eksplozija. Eksplozije plastenk niso tako problematične kot eksplozije steklenic, saj je steklo krhko in trdo. Drobcji stekla lahko zletijo v zrak ter povzročijo precejšnje poškodbe navzočih ljudi.

Varnejše odpiranje steklenic in plastenk morajo omogočiti tudi zamaški. Neustrezni zamaški so ena izmed velikih hib, ki jih lahko ugotovimo potrošniki v vsakdanjem življenju. Pri plastenki mora biti izdelan zamašek tako, da zagotavlja popolno zaprtje vsebine, dokler ga ne začnemo odvijati. Ko začnemo odpirati plastenko, mora priti do enostavnega razdvajanja fiksne delca (če obstaja) od zamaška z navojem. Navojni del bi moral biti narejen tako, da se pri odvijanju postopno sprošča tlak. Odpiranje steklenic s kovinskim pokrovom ni problematično, če uporabljamo ustrezno odpiralo. Pri dvigovanju pokrovčka se tlak postopno izenačuje. Bistveno večji problem pa so ustekleničene pijače z zamaški.

5 LITERATURA

¹ Brydson, J. A., *Plastics Materials*, Butterworth Heinemann, 1999

² Dean, J. A., *Lange's Handbook of Chemistry*, McGraw, Inc., 1992

³ Drev, D., *Problematika embalarane vode*. V: Roš, Milenko (ur.). *Zbornik referatov*. Ljubljana: Slovensko društvo za zaščito voda, 2005, 128–138

⁴ Frimmel, F. H., *Wasser und Gewässer, Ein Handbuch (Gebundene Ausgabe)*, Spektrum Akademischer Verlag, 1999

⁵ Gächter, R., Müller, H., *Taschenbuch der Kunststoff – Additive*, Hanser Verlag, Wien, 1989

⁶ Havelaer, A. H., Melse, J. M., *Quantifying public health risk in the WHO Guidelines for Drinking – Water Quality*, RIVM report 73401022/2003, 2003

⁷ Lide, D. R., *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, 71 ed. Boca Raton, Ann Arbor, Boston: CRC Press, 1991

⁸ Jolly, W. L., *Modern Inorganic Chemistry (2nd Edn.)*. New York: McGraw-Hill, 1991

⁹ Müller, K., *O₂ – Durchlässigkeit von Kunststoffflaschen und Verschlüssen – Messung und Modellierung der Stofftransportvorgänge*, PhD Thesis, Technische Universität München, 2003

¹⁰ Mette, M., *Ein Beitrag zur Gasdurchlässigkeit Permeabler Getränkeflaschen unter dem Aspekt der Haltbarkeit des Füllgutes-Teil 1*, *Brauindustrie*, 3 (2003), 150–153

¹¹ Nölle, G., *Technik der Glasherstellung*, Wiley VCH Verlag, (1997)

¹² Orzinski, M., *Untersuchung der Permeation von anorganische Gasen und organische Verbindungen durch barriereverbessere Kunststoffflaschen und ihre messtechnische Erfassung*, PhD Thesis, Technische Universität Berlin, D83, 2007

¹³ Preeti, C., *Multi-component transport of gases and vapors in poly(ethylene terephthalate)*, PhD Thesis, Georgia Institute of Technology, 2006

¹⁴ *Pravilnik o preskušanju izdelkov in snovi, ki prihajajo v stik z živili*, (Uradni list RS, 131/039)

¹⁵ Palzer, G., *Establishment of a standard test procedure for PET bottle materials with respect to chemical inertness behavior including the preparation of a certified PET reference material*, PhD Thesis, Technische Universität München, 2001

¹⁶ *Physical and engineering data*, January 1978 ed. The Hague: Shell Internationale Petroleum Maatschappij BV, 1978

¹⁷ Spellman, F. R., *The drinking water handbook*, CRC PRESS, 1999

¹⁸ Uredba Evropskega parlamenta in Sveta, 27. oktober 2004 o materialih in izdelkih, namenjenih za stik z živili, in o razveljavitvi direktiv 80/590/EGS in 89/109/EGS

¹⁹ Uredba o izvajanju Uredbe Evropskega parlamenta in Sveta ES o materialih in izdelkih, namenjenih za stik z živili in o razveljavitvi direktiv 80/590/EGS in 89/109/EGS, (Uradni list RS, 53/05, 66/06)

²⁰ Witt G., *Taschenbuch der Fertigungstechnik*, Hanser, 2005