

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV PROCESNÍ A ZPRACOVATELSKÉ TECHNIK

**DISTRIBUCE ROZPUŠTĚNÉHO CO₂ V PIVNÍM
SUDU**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2016

Bc. JIŘÍ BOJAS

Vysoká škola:
Ústav:

ČVUT v Praze
12118

Fakulta: strojní
Akademický rok: 2015/2016

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

pro **Bc. Jiří Bojas**
program N2301 Strojní inženýrství
obor 3909T012 Procesní technika

název česky:

Distribuce rozpuštěného CO₂ v pivním sudu

název anglicky:

Distribution of dissolved CO₂ in beer barrel

Zásady pro vypracování

Zadání:

Vypracujte literární rešerši se zaměřením na zdroje CO₂ při výrobě piva, měření koncentrace rozpuštěného CO₂ v pivu, řešení výčepních zařízení, vliv CO₂ na chuť piva a kvalitu pěny. Na základě poznatků z rešerše:

- Navrhněte, sestavte a ověřte funkci přístroje umožňujícího měřit koncentraci rozpuštěného CO₂ v kapalině.
- Navrhněte, sestavte a ověřte funkci experimentálního zařízení umožňujícího zjišťovat časový průběh koncentrace rozpuštěného CO₂ v pivním sudu v závislosti na hnacím tlaku.
- Proveďte teoretickou simulaci distribuce rozpuštěného CO₂ v čase v sudu v závislosti na hnacím tlaku a experimentálně ověřte.
- Experimentálně ověřte, zda tlak hnacího plynu ovlivňuje stabilitu pivní pěny při výčepu.

Rozsah grafických prací: Dle potřeby.

Rozsah průvodní zprávy: Úvod, rešerše, teoretická část, experimentální část, diskuse výsledků, závěr.

Seznam odborné literatury: dle doporučení vedoucího práce a vlastní rešerše.

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Rašek Šulc, Ph.D.

Konzultant diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: 30. října 2015

Termín odevzdání diplomové práce: 15. ledna 2016

prof. Ing. Tomáš Jirout, Ph.D.
vedoucí ústavu



prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
děkan fakulty

V Praze dne 29. října 2015

Neodevzdá-li student bakalářskou nebo diplomovou práci v určeném termínu, tuto skutečnost předem písemně zdůvodnil a omluva byla děkanem uznána, stanoví děkan studentovi náhradní termín odevzdání bakalářské nebo diplomové práce. Pokud se však student řádně neomluvil nebo omluva nebyla děkanem uznána, může si student zapsat bakalářskou nebo diplomovou práci podruhé.

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Zadání diplomové práce převzal dne:

30. 10. 2015

Bc. Jiří Bojas

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Praze dne 14. ledna 2016

.....

Jiří Bojas

Poděkování

Rád bych zejména poděkoval vedoucímu bakalářské práce Doc. Ing. Radku Šulcovi, Ph.D. Za jeho cenné rady, trpělivost, vedení, podporu a flexibilitu odpovědí na mé dotazy. Dále bych rád poděkoval pivovaru Hubertus za poskytnuté vzorky piva a v neposlední řadě rodině a za podporu během dosavadního studia.

Anotační list

Jméno autora:	Jiří
Příjmení autora:	Bojas
Název práce česky:	Distribuce rozpuštěného CO ₂ v pivním sudu
Název práce anglicky:	Distribution of dissolved CO ₂ in beer barrel
Rozsah práce:	počet stran: 114 počet obrázků: 64 počet tabulek: 13 počet příloh: 3
Akademický rok:	2015/2016
Jazyk práce:	Český
Ústav:	Ústav procesní a zpracovatelské techniky
Studijní program:	N2301 Strojní inženýrství
Vedoucí práce:	Doc. Ing. Radek Šulc, Ph.D.
Oponent:	
Konzultant práce:	
Zadavatel:	ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav procesní a zpracovatelské techniky.
Anotace česky:	Tato práce vznikla za účelem průzkumu faktorů ovlivňujících rozpustnost plynu v pivu a následného chování piva při čepování. V rámci práce byla vypracována rešerše, která se zabývá rozpustností CO ₂ v pivu včetně způsobů jeho stanovení. Pomocí těchto teoretických znalostí byl

následně navržený a sestrojený přístroj umožňující měření v kapalinách, dále měřicí zařízení, které je schopné stanovit kinetiku sycení a koncentraci CO₂ v sudovém pivu. V závěru práce proběhlo hodnocení stability načepované pěny v závislosti na koncentraci rozpuštěného oxidu uhličitého.

Anotace anglicky:

The aim of this work is to investigate factors that influence solubility of CO₂ in the beer, and the further behaviour of the draught beer. In this work was made a research to ascertain possibilities of measuring the dissolved CO₂ in the beer; subsequently, was designed and fabricated the device which measures the dissolved CO₂ in liquids and the device that is capable to determine the kinetic of carbonation in the beer barrel. At the end of the work is a valuation of stability of the beer foam of dependency to the content of dissolved CO₂ in the beer.

Klíčová slova:

stabilita pивní pěny, měření rozpuštěného CO₂ v kapalinách, kinetika sycení piva,

Využití:

Získané výsledky poslouží k vhodnější volbě typu a tlaku hnacího plynu pro čepování sudových piv.

OBSAH

I. Úvod.....	- 9 -
II. Rešeršní část práce.....	- 11 -
1 Technologický postup výroby piva.....	- 11 -
2 Oxid uhličitý – CO₂.....	- 17 -
2.1 Tvorba a zpracování oxidu uhličitého v pivovarském závodě.....	- 17 -
3 Rozpustnost plynu v kapalině.....	- 19 -
3.1 Fázová rovnováha, Henryho zákon.....	- 22 -
4 Metody měření koncentrace rozpuštěného CO₂ v pivu	- 24 -
4.1 Závislost pH na obsahu rozpuštěného CO ₂	- 24 -
4.2 Manometrické metody	- 24 -
4.3 Expanzní metody.....	- 25 -
4.4 Vodivostní metody	- 27 -
4.5 Titrační a vážkové metody	- 28 -
5 Cesta piva do sklenice.....	- 29 -
5.1 Lahvové pivo.....	- 30 -
5.2 Tankové pivo.....	- 30 -
5.3 Sudové pivo.....	- 30 -
5.3.1 Tlačné plyny	- 31 -
5.3.2 Chlazení sudového piva	- 33 -
5.4 Vzniky a úbytek pěny.....	- 33 -
III. Souhrn rešerše a formulace cílů práce a vlastních hypotéz.....	- 35 -
IV. Vlastní část práce	- 37 -
6 Vliv tlaku na tvorbu bublin v pivním potrubí	- 37 -
7 Vliv tlaku a složení hnacího plynu	- 40 -
7.1 Stacionární stav	- 40 -

7.2	Tlaková ztráta a minimální tlak plynu pro průtočné a objemové chlazení	- 44 -
8	Distribuce rozpouštěného CO₂ v sudu	- 64 -
8.1	Simulace nestacionární difúze CO ₂ do piva.....	- 64 -
8.2	Měření koncentrace rozpouštěného CO ₂	- 72 -
8.2.1	Měření koncentrace CO ₂ v pivu dle pH.....	- 72 -
8.2.2	Návrh manometrického přístroje a zkušební měření.	- 73 -
8.3	Návrh experimentální zařízení.	- 83 -
8.4	Měření na experimentálním zařízení.....	- 84 -
9	Stabilita pивní pěny.	- 90 -
9.1	Úbytku pěny v závislosti na čistotě a teplotě sklenice.....	- 90 -
9.2	Stabilita pивní pěny v závislosti na koncentraci CO ₂	- 97 -
10	Závěry a doporučení.....	- 103 -
	Seznam použitých značek a symbolů	- 106 -
	Seznam použité literatury.....	- 110 -
	Přílohy	- 113 -

I. Úvod

Dle archeologů vzniklo první pivo náhodným zkvašením zrna, do kterého při skladování natekla voda, a z původního neštěstí vznikl kvašením příjemný opojný nápoj. Existují důkazy, že se cíleně již před 6000 lety vařilo pivo ve starověkém Sumeru (území dnešního Iráku). Tehdy bylo vaření piva od současnosti naprosto odlišné. Sloužilo nejprve jako potravina v podobě hustých kaší nebo polévek. Mezi důležité milníky na našem území patří založení prvního pivovaru roku 993 v Břevnovském klášteře a v roce 1516 vypracování "záruky čistoty" k zajištění kvality produkce piva, která předepisovala, že se má pivo obsahovat pouze **vodu, slad, chmel a kvasnice** [1].

Od té doby prošla výroba piva několika vývojovými stádii a rozšířila se po celém světě. V současnosti nabízí společnosti širokou škálu typických i speciálních piv. Od nealkoholických ovocných přes piva až s 12% alkoholu. Na světě se eviduje něco přes 15 000 pivovarů s celkovým počtem kolem 50 000 druhů piv. V současnosti je toto číslo ještě vyšší, jelikož strmě stoupá výstavba nových pivovarů [4].

V České republice stoupl za poslední tři roky počet pivovarů takřka na dvojnásobek. Na konci roku 2011 bylo na našem území 163 pivovarských podniků, a to převážně minipivovarů a roce 2014 to bylo dokonce kolem 300. Minipivovary, které se v České republice těší stále větší oblibě, lákají spotřebitele na rozmanitou nabídku produktů, díky nimž mohou konkurovat velkým firmám. Zatímco velké pivovary nemohou ze dne na den přijít na trh s novým produktem (z technologického i existenčního důvodu), malé pivovary mohou pružněji reagovat na poptávku zákazníka [2]. S výstavbou nových pivovarů přibývá i několikanásobné množství druhů a typů piv. Tento trend stále pokračuje, a to i přes celkově nižší spotřebu piva oproti minulosti. Nicméně v České republice se vypije stále nejvíce piva (na jednoho obyvatele) na světě [2].

Od roku 2009 v Česku trvale ubývá hospod a restaurací. Hlavním důvodem je ekonomická krize, která donutila hosty šetřit a konzumovat nápoje a jídlo častěji doma. Odhaduje se, že v roce 2011 bylo v Česku 30 300 restauračních podniků, což je klesající trend započatý právě v roce 2009. Aktuálně je v Česku kolem 29 000 restauračních zařízení, z toho s čepovaným pivem asi 25 000. Prezident Asociace hotelů a restaurací Václav Stárek zastává názor, že důvodů poklesu je více. „Naše hospody jsou kvalitou velmi nevyvážené, některé jsou velmi kvalitní, na druhé straně je množství těch, které nabízejí **nízkou kvalitu** a dlouhodobě nemohou přežít,“ uvedl [6].

Restaurační podniky, vědomy oblíbenosti piva, se snaží svojí pivní nabídkou zaujmout a nabízejí i několik typů čepovaných piv najednou. Mimo tankového piva se jedná především o piva sudová. Hnací silou pro čepování ze sudu je stlačený plyn přiváděný nad hladinu piva. Doporučený tlačný plyn je **oxid uhličitý** (CO₂) nebo směs CO₂ s jiným plynem. Oproti tankovému pivu, které nepřichází do kontaktu se stlačeným vzduchem, je chuť a chování piva sudového ovlivněno nastaveným tlakem a typem používaného stlačeného plynu, který se za určitých podmínek v pivu více či méně rozpouští. Pivo přesycené působí nepříznivě na zažívání, může způsobit nežádoucí pěnivost atd., naopak nedosycené pivo ztrácí říz a plnost pěny při načepování. [21]

Dle slov Lukáše Svobody (mistr světa v čepování plzeňského piva) vyžaduje každé pivo jiné nastavení, tedy **jiný typ a tlak plynné směsi**. Nastavení ovlivní především koncentraci plynů rozpuštěných v pivu, které je silně závislé na tlaku, teplotě a typu plynu. Restaurace a výčepy používají i pro desítku různých druhů piv stejný tlak a směs plynu, aniž by zohledňovaly například teplotu sudu, která se může v různých situacích lišit až o desítky stupňů. Tato problematika není v odborné literatuře dostatečně popsána.

Mimo výčepní podniky je sudové pivo, především v letních měsících, konzumováno na stovkách festivalů a soukromých akcích, kde je sud vystaven vysokým teplotám a vhodné nastavení piva přispívá ke krátkým frontám, vyššímu zisku a spokojenosti zákazníků.

Tato práce vznikla za účelem průzkumu faktorů ovlivňujících rozpustnost plynu v pivu a následného chování piva při čepování. V rámci práce byla vypracována rešerše, která se zabývá rozpustností CO₂ v pivu včetně způsobů jeho stanovení. Pomocí těchto teoretických znalostí byl následně navržený a sestrojený přístroj umožňující měření CO₂ v kapalinách, dále měřicí zařízení, které je schopné stanovit kinetiku sycení a koncentraci CO₂ v sudovém pivu. V závěru práce proběhlo hodnocení stability načepované pěny v závislosti na koncentraci rozpuštěného oxidu uhličitého.

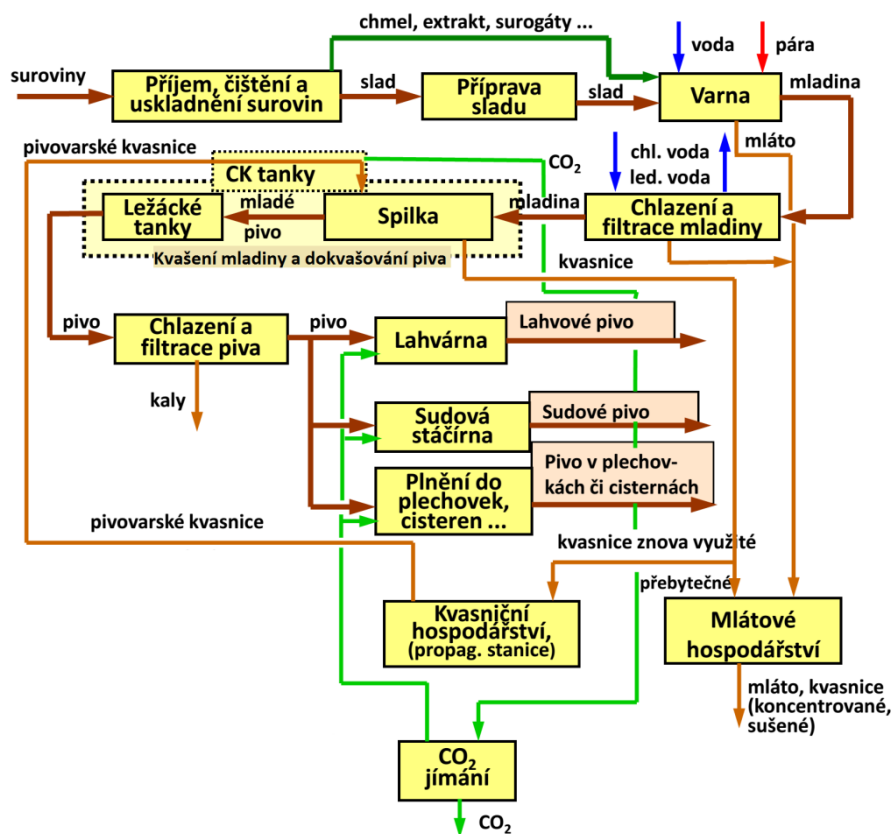
Pivo bude ještě dlouho velmi oblíbeným produktem. Je třeba se však zamyslet, jak jej dopravit do sklenice ke konzumentovi v té nejvyšší kvalitě, což je mimo jiné, jedna z hlavních motivací této práce.

II. Rešeršní část práce

1 Technologický postup výroby piva.

Z hlediska fyzikální chemie je pivo koloidní disperze jednotlivých složek extraktu v kapalném disperzním prostředí. Skládá ze 4 hlavních surovin, kterými jsou: **voda, slad, chmel a pivovarské kvasnice**. Na trhu se dnes setkáváme s obrovskou škálou značek a druhů piv a i přes stejné základní ingredience lze tvrdit, že každé se chová a chutná jinak. Záleží především na kvantitě a kvalitě ingrediencí, použité technologii a v neposlední řadě na schopnosti sládků, který má za pivo určitou zodpovědnost.

Dále v této kapitole je zkráceně popsána technologie výroby piva. Dle schématu na Obr. 1.1 je proces přeměny surovin v pivo následující:



Obr. 1.1

Blokové schéma výrobní linky na výrobu piva [7]¹

¹ originální schéma upraveno po dohodě s autorem.

1. Příjem, čištění a uskladnění surovin.

Suroviny (slad, chmel) jsou pomocí šnekových nebo pneumatických dopravníků postupně transportovány do zařízení, ve kterých se odstraní prach a jiné nečistoty. Po vyčištění jsou uskladněny v zásobnících.

2. Příprava sladu.

Ječmen → Slad

Slad se vyrábí ze sladovnického ječmene a vyžaduje před vařením zvláštní péči, jeho příprava probíhá následovně:

a) Máčení ječmene.

Máčení probíhá 3–4 dny. Po tu dobu je do vrstvy přiváděn vzduch, jelikož i během máčení musí zrno dýchat. Tímto procesem se aktivuje činnost enzymů, vyluhují se barviva a třísloviny.

b) Klíčení ječmene.

Po máčení dochází ke klíčení, které trvá přibližně 7 dní. Klíčení končí takzvaným „rozluštěním zrna“ (vytvoří se kořínek a lístek), při němž se odbourá celulóza buněčných blan (hydrolyzuje).

c) Hvozdění sladu (ječmene)

V poslední fázi příprav sladu dochází k hvozdění, jinými slovy k sušení ječmene. Při hvozdění se dokončí enzymatické procesy potřebné pro chuť, vůni a kvalitu piva a ve vhodný okamžik se tyto procesy přeruší.

Pro některá tmavá piva je slad sušen při vyšší teplotě a slad částečně karamelizuje.

3. Varna. (Obr. 1.2)

Slad + voda + chmel → sladina → mladina

Do varny jsou dopraveny předem upravené 3 základní suroviny: rozdrčený sladový šrot, voda a chmel nebo chmelový extrakt, jejímž výstupem je mladina. Procesy ve varně se dají rozdělit do 4 pod procesů, které probíhají ve čtyřech po sobě jdoucích zařízeních:

a) Vystírání ve vystírací kádi.

Cílem vystírání je dobře smíchat sladový šrot s vodou a oživit aktivitu enzymů, která byla ukončena při hvozdnění. Výběr surovin, jejich dávky a použitý technologický postup jsou prvním předpokladem pro docílení složení sladiny, které je důležité pro určitý typ piva.

b) Rmutování ve rmutovací pánvi.

Cílem rmutování je za působení tepla rozštěpit a převést optimální podíl extraktu surovin (sladu) do roztoku. Při rmutování působí děje mechanické, chemické fyzikální a enzymové. Štěpení škrobu na zkvasitelné sacharidy působením amylolytických enzymů je nejvýznamnějším procesem rmutování.

c) Sedimentace a filtrace sladiny ve scezovací kádi.

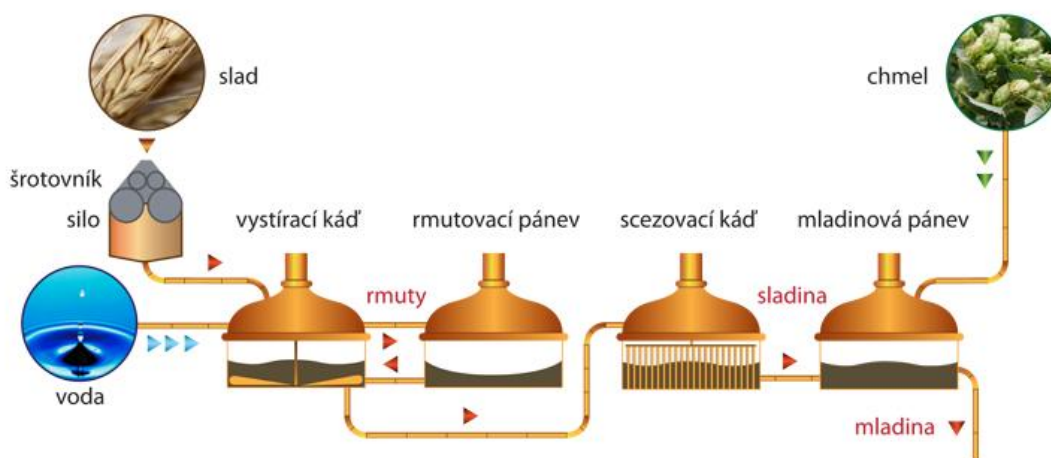
Po odrmutování následuje při přípravě mladiny proces scezování. Je to fyzikální proces filtrace, při kterém se nejprve oddělí predek (roztok obsahující extraktivní látky sladu) od zbytků sladového šrotu neboli mláta. Cílem scezování je získat čistou sladinu a maximální množství extraktu přivedeného v surovinách.

d) Vaření sladiny s chmelem v mladinové pánvi - chmelovar.

Chmel + sladina → mladina

Při vaření sladiny s chmelem probíhá řada fyzikálních, chemických a biochemických reakcí za působení mechanické energie a tepla, jejichž výsledek se projevuje ve složení mladiny a velmi ovlivňuje další průběh technologie a vlastnosti piva. Tento proces je velmi variabilní vzhledem k široké škále používaných surovin, technologií i různých technologických postupů. Hlavní cíle chmelovaru jsou odpařit přebytečnou vodu

odpovídající vyráběnému pivu, inaktivovat enzymy z předchozích procesů a zajistit tak požadované složení sacharidů.



Obr. 1.2

Schéma varny [9]

4. Chlazení a filtrace mladiny.

Vyrobena mladina se musí před zkvašením ochladit na zákvasnou teplotu. Při ochlazování se současně provzdušní (sytí kyslíkem) a vyloučí se z ní hrubé a jemné kaly. Rozpouštění kyslíku v mladině zajišťuje vhodné podmínky pro pomnožení kvasinek, průběh kvasného procesu a stupeň prokvašení piva. Hrubé kaly o velikosti 30 – 40 μm se odstraňují sedimentací, rotační sedimentací (vířivé kádě), odstřediváním a filtrací. Jemné kaly se, vzhledem k menšímu rozměru částic (0,5 – 1 μm), separují obtížněji. Část jemných kalů je z mladiny odstraněna při odlučování hrubých kalů a další separace probíhá v odstředivkách, filtrech a flotaci.

5. Kvašení mladiny a dokvašování piva.

Kvašení mladiny, jejímž produktem je mladé pivo, je fermentační proces využívající kvasinky, které zajišťují kvašení. Podle druhu použitých kmenů kvasinek probíhá buď **spodní kvašení** s kvasinkami *Saccharomyces cerevisiae uvarum*, které sedají kde dnu, nebo **svrchní kvašení** s kvasinkami *Saccharomyces cerevisiae*, které jsou

vyplavovány do tzv. deky na hladinu. Tento kmen pivovarských kvasinek byl speciálně po staletí vyšlechtěn.

Fermentace mladiny probíhá ve dvou stupních. První fáze se nazývá **hlavní kvašení**, při kterém se pomnoží mikroorganismus (pivovarské kvasinky) v řízeném procesu na potřebnou koncentraci a zakvasí většinou část využitelných látek z mladiny. V této fázi vznikají jako hlavní produkty kvašení **alkohol**, **oxid uhličitý** a biomasa. Druhá fáze fermentace je **dokvašování a ležení piva**, které probíhá vždy pod mírným tlakem, kdy dokvašuje zbylý extrakt, pivo se číří a sytí oxidem uhličitým.

Kvašení mladiny probíhá v tzv. **spilkách**, viz Obr. 1.3 a následné dokvašení v ležáckých tancích nebo probíhá kvašení a dokvašování v uzavřených velkoobjemových nádobách, z nichž jsou nejrozšířenější **cylindrokónické tanky**.



Obr. 1.3

Kvašení mladiny ve spilkách (pivovar Hubertus Kácov) [archiv autora]

6. Stáčení piva.

Před samotným stáčením probíhá dodatečné chlazení a filtrace piva. Především u malých pivovarů je filtrace mnohdy vynechána, jelikož se jedná o nákladnou technologii, nicméně právě nefiltrovaná piva jsou některými pivaři vyhledávaná. V této fázi probíhá také pasterace, která prodlužuje trvanlivost piva. Pasteruje se buď pivo před plněním, po stočení do obalu, nebo se pivo nepasterizuje. Nepasterizovaná piva (někdy přezdívána jako živá) lépe chutnají, ale mají kratší životnost. Filtraci a pasterizaci lze částečně nahradit

nákladnou membránovou filtrací, která navýší trvanlivost piva, ale pasteraci plně nenahrazuje.

Tato závěrečná ošetření piva se volí v závislosti na požadovaném typu piva a na požadované trvanlivosti. Pivo, **shodného typu**, stáčené do tanků, sudů a lahví, se liší **pouze ošetřením**. Neliší se obsah **oxidu uhličitého, předchozí technologie ani složení**. Při stáčení je kladen důraz na šetrné zacházení. Sudy jsou proto nejprve naplněny plynem oxidem uhličitým, dusíkem nebo jejich kombinací, o tlaku nižším o několik *kPa* než je v tancích. Pivo je tak do sudu dopravováno velmi pomalu za nízké teploty, aniž by docházelo k nežádoucímu proudění, které by mělo za následek například únik CO₂.

Konzumenti vyžadují čirost, stabilitu pěny, barvy a organoleptické vlastnosti² až do data spotřeby garantované výrobcem. V současnosti jsou požadovány u lahvového piva garance více než jeden rok a dva a více měsíců u piva sudového. Pivo v tancích je chlazené v celém objemu a je u něj zajištěn odbyt v krátkém čase, je tedy vždy, na rozdíl od sudů a lahví, nepasterizované. To je jeden z hlavních rozdílů mezi, jinak stejným, tankovým sudovým a lahvovým pivem. Na toto téma se také soustředí kapitola 5, ve které je závěrečná cesta piva do sklenice detailně popsána. [7], [8]

² **Organoleptické vlastnosti** jsou charakteristiky, které lze hodnotit lidskými smysly. Organoleptika je smyslové posuzování, které využívá hlavní smyslové vjemy k hodnocení vlastností (vzhled, vůně, chuť, teplota atd.) [30]

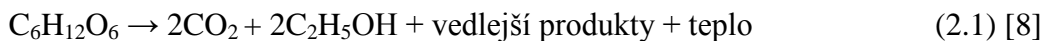
2 Oxid uhličitý – CO₂

Oxid uhličitý je bezbarvý plyn bez chuti a zápachu, který při vyšších koncentracích může mít v ústech slabě nakyslou chuť. Je těžší než vzduch a molekula je tvořena jedním atomem uhlíku a dvěma atomy kyslíku. [8]

Pivo oxid uhličitý přirozeně obsahuje, ten vzniká při kvašení a je tímto plynem nasyceno na vhodnou koncentraci, stanovenou pivovarem. CO₂ poskytuje dlouhodobou ochranu proti oxidační degeneraci a účinně zabraňuje růstu aerobních mikroorganismů. Bublínky oxidu uhličitého způsobují v ústech štiplavý pocit, který je v pivovarské terminologii označován jako **říz**. Tento jev spočívá zejména v působení CO₂ na trojklaný nerv. Přítomné bublinky ožíví tzv. mechanoreceptory (buňky citlivé na mechanické podráždění), které aktivují receptory bolesti. Mimo jiné je také prokázáno, že obsah CO₂ ovlivňuje **vnímání, například hořkost a sladkost** [10]. Čím více je oxidu uhličitého rozpuštěno v pivu, tím je více hořké. Dle Lukáše Svobody (mistr světa v čepování plzeňského piva) chutná jinak například pivo velmi nasycené nebo úplně bez bublin, to lze mimo jiné ovlivnit stylem čepování nebo nalévání piva do sklenice. Kromě oxidu uhličitého může přijít pivo při čepování do kontaktu také s dusíkem a kyslíkem, které můžou spolu s CO₂, ovlivnit chuť a kvalitu pивní pěny.

2.1 Tvorba a zpracování oxidu uhličitého v pivovarském závodě.

Kvašení je anaerobní proces, který získává kvasničným buňkám energii oxidací sacharidů bez přístupu kyslíku. Hlavními kvasnými produkty látkové přeměny jsou ethanol a **oxid uhličitý** vznikající podle souhrnné rovnice (2.1), kde C₆H₁₂O₆ je zkvasitelná hexoza. [8]

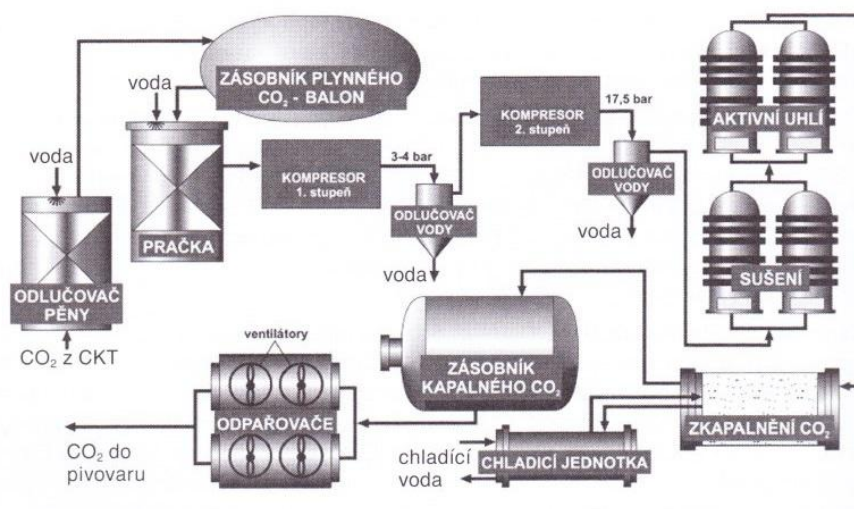


Množství vzniklého oxidu uhličitého lze vypočítat podle Ballongova vzorce (viz [8]). Teoreticky se vytvoří z 1kg zkvašeného extraktu 0,49kg CO₂. V mladém pivu zůstává asi 0,2 až 0,3 kg CO₂ 1 hl. Oxid uhličitý se při kvašení částečně rozpouští v kvasícím médiu podle Henryho zákona (viz kap.3) Při kvašení vzniká přebytek CO₂, který je odebírán a po odečtení ztrát lze z vyprodukovaného CO₂ využít přibližně 2 až 2,5 kg na 1 hl piva. [8].

V počátcích hlavního kvašení a dokvašování uniká z piva CO_2 . Ležácké tanky jsou vybaveny škrťacími ventily, které slouží ke vzniku přetlaku v nádobě potřebného pro nasycení piva oxidem uhličitým. Nejprve jsou ventily otevřené, aby se z piva dostaly pachy a část CO_2 . Následně se ventil uzavře a přetlak se zvyšuje až na cca 80 kPa, což zajistí absorpci plynu v pivu na **koncentraci zvolenou pivovarem**. Tato koncentrace se pohybuje kolem **3 - 5 g CO_2 /l**. [7]

Pivovary se snaží zvolenou koncentrací CO_2 v pivu udržet konstantní. Hodnotu koncentrace může ale ovlivňovat roční období, kdy není ve sklepech dodržena konstantní teplota, nebo typ ležáckých tanků. Například pivo ve vertikálních tancích je ve spodních částech více syceno vzhledem k vyššímu hydrostatickému tlaku.

Jímání a komprese oxidu uhličitého (viz schéma na Obr. 2.1) je ekonomicky výhodné především u kvasných nádob větších rozměrů a CK tanků. Kvasný vyčištěný oxid uhličitý lze dále použít a je z ekologického pohledu příznivější. Přímou v pivovarském závodě je dále využíván k předplnění ležáckých tanků, při stáčení sudů a lahví a jako hnací plyn při čepování piva, kdy plní současně ochrannou funkci proti oxidaci. Dále může pivovar CO_2 prodávat například nápojovému průmyslu pro sycené nealkoholické nápoje [8].



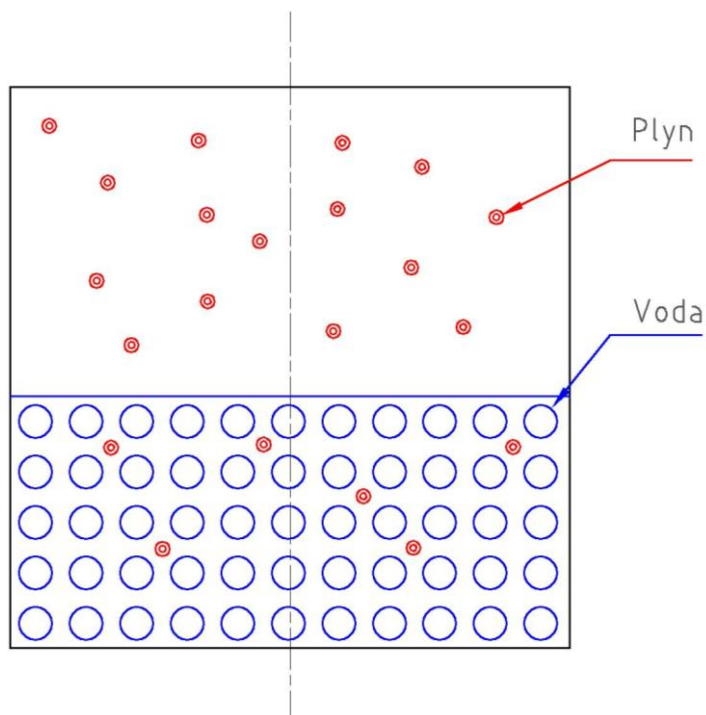
Obr. 2.1

Schéma stanice pro jímání oxidu uhličitého [8]

3 Rozpustnost plynu v kapalině

Podobně jako některé pevné látky se i plyny rozpouští v kapalinách. Tento fyzikálně chemický jev ocení v přírodě například ryby, které stejně jako lidé potřebují k životu kyslík. Ryby jej extrahují z vody pomocí žáber a lidé ze vzduchu plicemi.

Na obrázku Obr. 3.1 je schematicky znázorněna kapalina, v tomto případě voda, jako větší modré molekuly a plyn jako menší červené. V reálném případě by některé molekuly vody vyplňovaly také prostor nad hladinou a tvořily by vodní páry. Pro zjednodušení vodní páru zanedbáme. Na obrázku je vidět, že se některé molekuly plynu absorbovaly do kapaliny a tvoří tak směs kapaliny s plynem. Důležité je nyní si uvědomit, jak molekuly plynu našly cestu do kapaliny a co rozpustnost ovlivňuje.

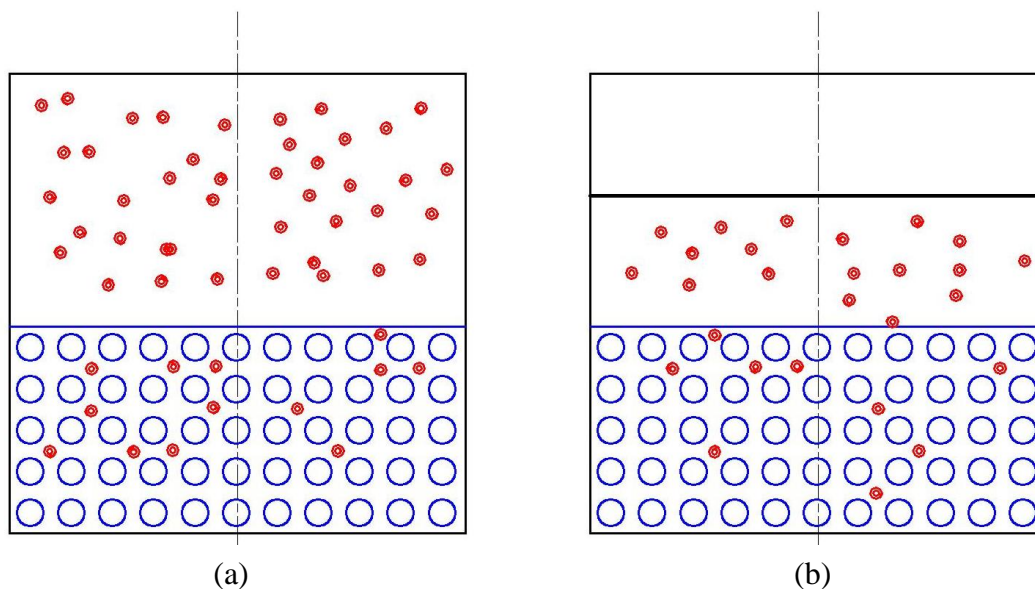


Obr. 3.1

Rozpustnost plynu v kapalině [vlastní tvorba]

V případě prostoru vyplněného pouze čistým plynem, jsou mezimolekulární síly zanedbatelné a částice se kromě srážek navzájem neovlivňují. Naopak síly mezi plynnou a kapalnou částicí jsou významné, a jestliže jsou dostatečně silné, můžou molekuly vody při vzájemné srážce plyn zachytit. Jelikož se molekuly plynu pohybují náhodně a chaoticky, může k těmto kolizím docházet. Rozpustnost plynu v kapalině bude tudíž ovlivněna

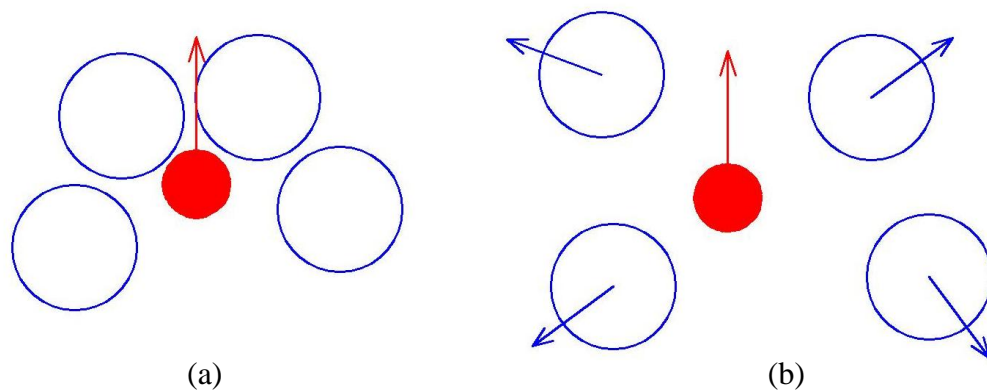
četnostní vzájemných kontaktů plynných a kapalinových molekul. V případě, že zvýšíme **koncentraci** plynu, dochází ke kolizím **častěji**, což lze docílit zvýšením koncentrace molekul plynu (Obr. 3.2 a)) nebo zmenšením objemu, což se promítne jako **zvýšení tlaku**, viz obrázek Obr. 3.2 b). [27]



Obr. 3.2

*Ovlivnění rozpustnosti zvýšením koncentrace molekul plynu (a) nebo zvýšením tlaku (b)
[vlastní tvorba]*

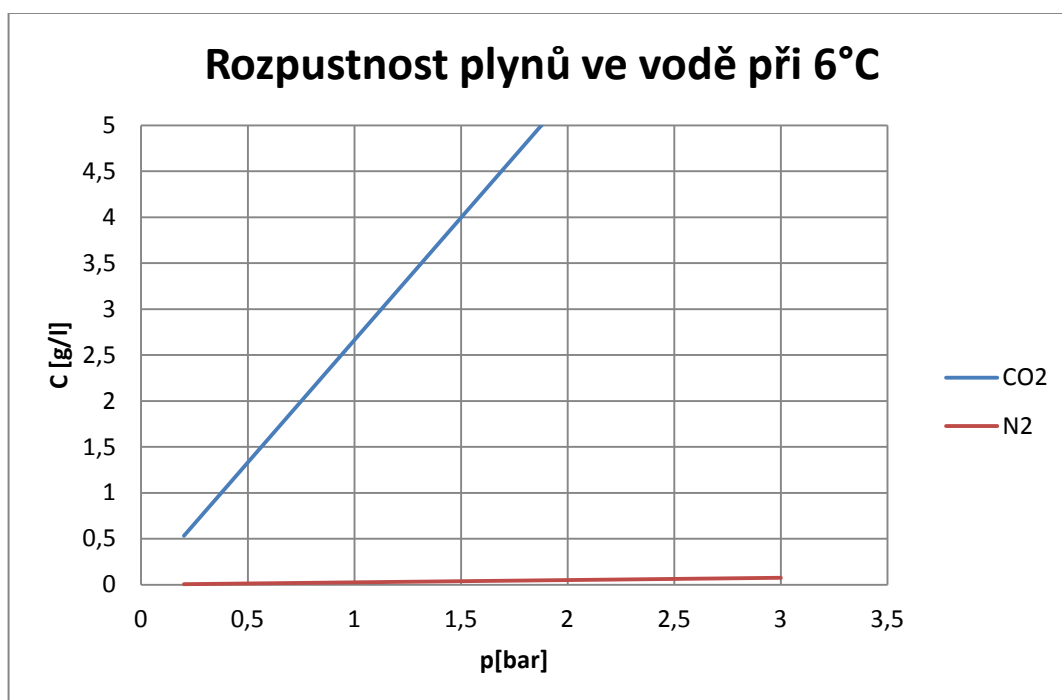
Molekula rozpuštěného plynu má tendenci opustit kapalinu, tomu brání molekuly vody. V případě vyššího tlaku a nižší teploty mají molekuly vody menší tendenci k pohybu a molekulu plynu udrží snáze (viz Obr. 3.3 a)). Naopak při vyšší teplotě dochází ke zvýšení vnitřní energie a intenzivnějšímu pohybu vodních molekul, což vede k prostoru pro únik plynu. Z těchto poznatků tedy vyplývá, že absorpce plynu je příznivě ovlivněna především **nižší teplotou a vyšším parciálním tlakem plynu**. Exsorpce plynu naopak podporuje **vyšší teplota, nižší tlak ale také rozvíření kapaliny**, jenž má za důsledek pohyb molekul vody a tedy prostor pro únik plynu (Obr. 3.3b)). Pro ilustraci je na Obr. 3.4 vyobrazena rozpustnost oxidu uhličitého a dusíku ve vodě.



Obr. 3.3

Vzájemný pohyb molekul plynu a kapaliny: a) nižší teplota a vyšší tlak

b) vyšší teplota, nižší tlak nebo případné rozvíření [vlastní tvorba]



Obr. 3.4

Rozpustnost CO₂ a N₂ ve vodě při teplotě 6 °C, v závislosti na přetlaku plynu [vlastní tvorba]. (dle literatury je rozpustnost CO₂ a N₂ ve vodě velmi podobná rozpustnosti v pivu [16,19])

3.1 Fázová rovnováha, Henryho zákon

Obsahuje-li plynná směs složku A o molové koncentraci y_A je při celkovém tlaku p parciální tlak plynné složky A dán vztahem (3.1), Obr. 3.5

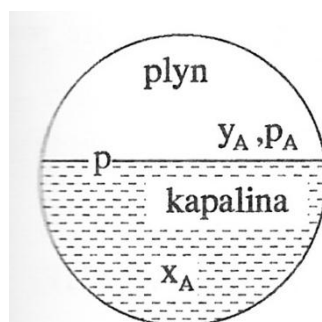
$$p_A = p \cdot y_A [Pa] \quad (3.1)$$

Vztah mezi koncentrací plynu v kapalně fázi a parciálním tlakem v plynné fázi vyjadřuje **Henryho zákon**, který říká, že koncentrace plynu rozpuštěného v kapalině je přímo úměrná parciálnímu tlaku plynu nad hladinou a má obecně tvar:

$$x_A = \frac{p_A}{H} [-] \quad (3.2)$$

Kde x_A je koncentrace plynné složky A rozpuštěné v kapalině a H je *Henryho konstanta* [bar], která je závislá na typu plynu a kapaliny a na teplotě. V literatuře lze nalézt různé tvary Henryho konstanty [$\frac{\text{mol}}{\text{kg} \cdot \text{bar}}$, $\frac{\text{ml}}{\text{bar}}$, bar ...], rovnice (3.2) poté může přejít do tvaru (5.3). [14]

$$x_A = p_A \cdot H \quad (3.3)$$



Obr. 3.5

Fázová rovnováha plyn-kapalina [14]

Na Obr. 3.6 je graficky zobrazena závislost Henryho konstanty na teplotě, popisující rozpustnost oxidu uhličitého ve vodě. Konstanty jsou stanoveny experimentálně, korelace (3.4) je jen jedna z mnoha udávaných více viz [16].

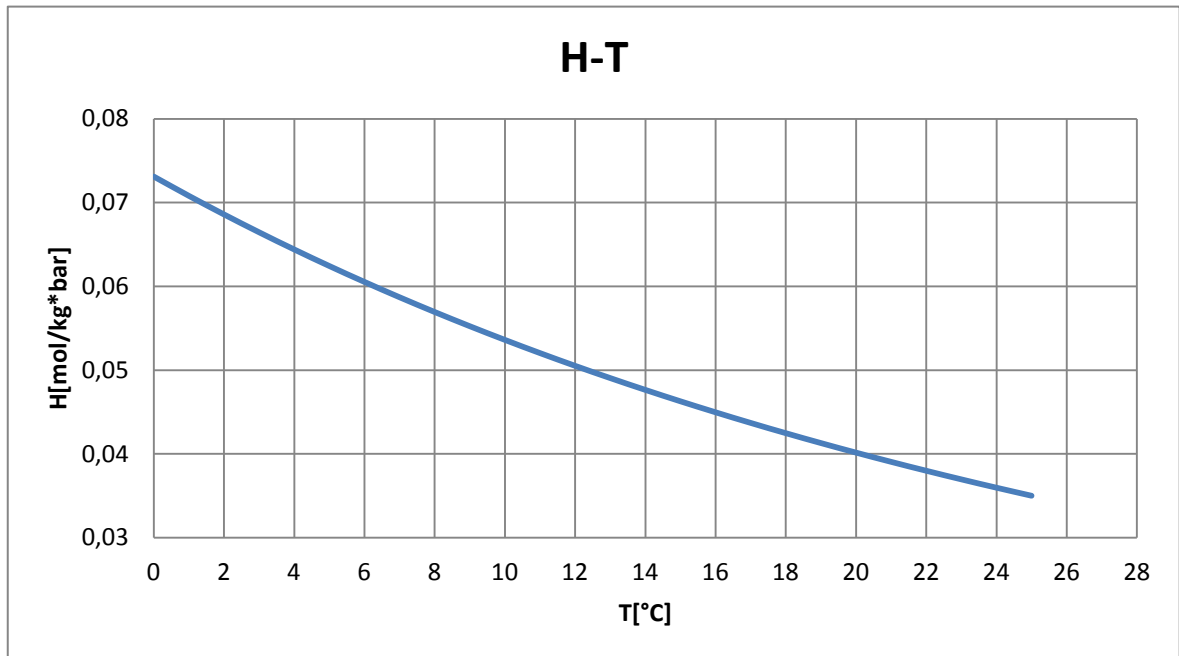
$$H(T) = H^0 \exp \left[\frac{d(\ln(H))}{d\left(\frac{1}{T}\right)} \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{298.15}\right) \right] \left[\frac{\text{mol}}{\text{kg} \cdot \text{bar}} \right] \quad (5.4) [15]$$

$$H^0 = 0.035 \left[\frac{\text{mol}}{\text{kg} \cdot \text{bar}} \right] \text{ - Henryho konstanta při } 20 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\frac{d(\ln(H))}{d\left(\frac{1}{T}\right)} = 2400 \text{ [K]} - \text{Teplotně závislá konstanta}$$

T - Teplota [K]

f



Obr. 3.6

Závislost Henryho konstanty rozpustnosti CO₂ ve vodě na teplotě [vlastní tvorba]

Dle [16, 19] lze konstanty a vztahy popisující rozpustnost plynů ve vodě aplikovat na rozpustnost plynů v pivě.

4 Metody měření koncentrace rozpuštěného CO₂ v pivu

Jak již bylo zmíněno v kapitole 2, oxid uhličitý je součástí každého piva a ovlivňuje hned několik jeho vlastností. Měření oxidu uhličitého je tedy pro pivovar velice důležité. Ke stanovení koncentrace CO₂ se využívá široká škála metod, které se liší v pracnosti, přesnosti, reprodukovatelnosti, jsou různě náročné na čas a v neposlední řadě se liší finančními nároky na provoz a pořízení. Jedná se o metody chemické a fyzikální popsané níže v této kapitole.

4.1 Závislost pH na obsahu rozpuštěného CO₂

Při kontaktu oxidu uhličitého s vodou vzniká kyselina uhličitá podle reakce (4.1), která snižuje pH vody. Tato reakce je vratná a ovlivnitelná teplotou nebo parciálním tlakem CO₂. S nižším tlakem a vyšší teplotou klesá tvorba kyseliny uhličité, pH roste a tím i rozpustnost CO₂. V literatuře je možné najít závislost mezi pH a obsahem rozpuštěného plynu ve vodě a poté, v určitých mezích, stanovit přibližně obsah CO₂.



Přibližné stanovení oxidu uhličitého ve vodě přes měření pH se jeví jako nejjednodušší a nejlevnější metoda. Pivo, ve kterém se CO₂ rozpouští podobně jako ve vodě, se však chová jako takzvaný **pufr**, což je roztok, který je schopný udržovat v jistém rozmezí stabilní pH po přidání kyseliny či zásady do systému [30]. V rámci této práce proběhl experiment, který měl za cíl tuto teorii ověřit (kapitola 8.2.1).

4.2 Manometrické metody

Manometrické metody jsou založené na principu Henryho zákona (viz kapitolu 3.1), který říká, že koncentrace plynu v kapalině je přímo úměrná **parciálnímu tlaku** plynu nad hladinou. Manometrickými přístroji lze měřit odebrané vzorky z tanků nebo přímo z lahví, po uvolnění CO₂, které je realizováno mechanickým vytřepáním vzorku (lahve) nebo pomocí ultrazvuku. Následně po změření tlaku se obsah CO₂ stanoví z nomogramu, který je součástí dodávky přístroje. Ne vždy je však změřený tlak **pouze parciálním tlakem** CO₂, ale celkovým tlakem ve směsi jiných plynů. **V těchto případech, kdy je vzduch v měřicím prostoru nebo v hrdle lahve, je třeba tuto skutečnost zohlednit a provést korekci (např. Šavel [16]).**

Manometrickou metodu využívají přístroje například od firmy *Haffmans* (Obr. 4.1a), b)[18]) nebo *Zahm & Nagel*. Dražší přístroje jako je například *Haffmans c-DGM* jsou kompatibilní s připojením na PC, schopné automaticky přepočítat obsah CO_2 a následně jej zobrazit na displeji.



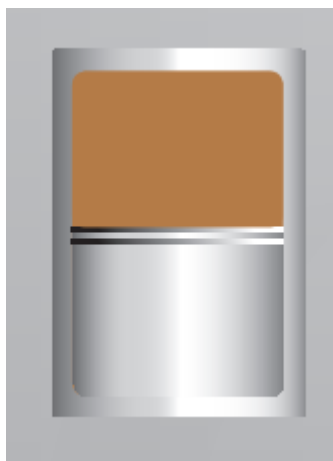
Obr. 4.1

Manometrické měřicí sondy Haffmans a) GMT b) c-DGM [18]

4.3 Expanzní metody

Expanzní metody měření obsahu CO_2 využívají techniky multinásobné objemové expanze, která eliminuje vliv ostatních rozpuštěných plynů na vlastní stanovení a je nejpřesnějším způsobem selektivního stanovení rozpuštěného CO_2 v nápojích. Dále využívají platnosti Henryho a Daltonova zákona. Na tomto principu je založeno měření analyzátoru **CarboQC** (Obr. 4.4) firmy Anton Paar. Tento přenosný přístroj měří oxid uhličitý a kyslík. Dvojitou expanzí měřicí komory se stanoví pouze obsah CO_2 , aniž by byl výsledek ovlivněn ostatními plyny. Nejprve je komora zcela zaplněna vzorkem (Obr. 4.2). V dalším kroku je zvětšen objem komory a po ustálení rovnováhy se změří aktuální

tlak a teplota (Obr. 4.3). V třetím kroku proběhne další expanze a zopakuje se měření tlaku a teploty. Metoda je založena na faktu, že rozpustnost vzduchu je v nápojích mnohem nižší než CO_2 . Vzhledem k rozdílné exsorpci plynů při expanzi, klesá parciální tlak vzduchu mnohem výrazněji než parciální tlak CO_2 . Z naměřených hodnot pro první a druhou expanzi je poté dopočítána koncentrace vzduchu a CO_2 .



Obr. 4.2[24]



Obr. 4.3 [24]

Přesnost stanovení oxidu uhličitého je dle výrobce $0,1 \text{ g/l}$. Tato metoda poskytuje velice přesné výsledky a doba měření je v řádu sekund. [10,21].



Obr. 4.4

Analyzátor rozpuštěného CO₂ v nápojích CarboQC firmy Anton Paar[23]

4.4 Vodivostní metody

Vodivostní metody jsou založeny na principu měření tepelné vodivosti plynů. Hodnota parciálního tlaku CO₂ je získávána pomocí měřicího čipu, který stanovuje tepelnou vodivost CO₂ v komoře uvnitř senzoru. Měřicí čidlo je umístěno pod difuzní semipermeabilní membránou umožňující vstup plynů. Naměřené údaje jsou pak přepočteny na koncentraci CO₂. Výkonnost senzorů pracujících na principu měření tepelné vodivosti závisí na dvou důležitých aspektech: spolehlivosti přívodu profukovacího plynu a integritě membrány propouštějící CO₂, která odděluje měřicí čip od piva. Narušení přívodu profukovacího plynu a zhoršení vlastností membrány způsobuje nepřesnosti při měření CO₂. Hlavní výhodou těchto senzorů je naprostá absence pohyblivých součástí a možnost zapojení zařízení in-line do potrubí nebo tanků. Měření tepelné vodivosti plynů stanovují obsah oxidu uhličitého např. přístroje Corning, Orbisphere nebo Mettler Toledo (Obr. 4.5). [10, 24]



Obr. 4.5

*Senzor na stanovení obsahu oxidu uhličitého v pivu, měřením tepelné vodivosti plynů
Mettler Toledo [24]*

4.5 Titrační a vážkové metody

Mezi ojediněle používané metody stanovení obsahu CO₂ v pivu lze řadit **vážkové stanovení a titrační metodu**.

Podstatou **vážkové metody** je srážení CO₂ chloridem vápenatým z podchlazeného zalkalizovaného vzorku, ze kterého byly předem odstraněny fosfáty solucí hořečnatou. Toto stanovení je velmi pracné a časově náročné. Přesnost přitom není dle [17] úplně uspokojivá. [17]

Titrační metody jsou na rozdíl od vážkové metody v praxi častěji používané a existuje několik modifikací, které zpřesňují nebo zjednodušují měření. Nejjednodušší je metoda Cannizarova, která spočívá ve smísení vzorku s přebytkem NaOH, volný nespotebovaný hydroxid se potom titruje kyselinou na fenolftalein jako indikátor. [17]

5 Cesta piva do sklenice

Pivo se servíruje převážně ve skleněných půllitrech. Tato kapitola popisuje způsoby závěrečné cesty piva do sklenice, které ovlivňují výsledný produkt.

Obrázek Obr. 5.1 zobrazuje rozdělení celkové spotřeby piva v ČR dle způsobu distribuce. Je patrné, že největší podíl zaujímá lahvové pivo, těsně následuje pivo sudové, které však dříve dosahovalo přes 60 procent. Naprosto minoritní je podíl cisternového piva (tedy tzn. tankového), jedná se ale o jedno z nejkvalitnější čepovaných piv, za což vděčí unikátnímu skladování.



Obr. 5.1

Procentuální rozdělení spotřeby piva dle způsobu distribuce [12]

Koncentrace oxidu uhličitého je prakticky stejná (pro stejný typ piva) jak u piva lahvového, sudového nebo tankového a z piva uniká při nalévání a čepování. Dříve bylo zmíněno, že obsah CO_2 ovlivňuje řízk a hořkost piva, která je tudíž závislá na množství uniklého plynu a tedy na stylu čepování a nalévání. Čím méně CO_2 unikne, tím větší řízk je pociťován.

Sládky se snaží, aby mělo pivo po naplnění do sklenice "ideální" chuť. Podle toho pivo sytí a vzdělávají výčepní personál a veřejnost, jak s pivem zacházet. Pojem "ideální chuť" je samozřejmě relativní a proto se názory na styl čepování, nalévání a koncentraci

CO₂ liší. Nemění se přitom však fakt, že chuť piva je vždy výrazně ovlivněna konečným zacházením.

Těsně před samotným načepováním nebo nalitím piva by měla vždy předcházet řádná údržba püllitru. Nejde jen o hygienické hledisko, ale především o to, aby byla pěna hustá, bez velkých bublin a aby držela co nejdéle svůj tvar, který mimo jiné brání nežádoucí oxidaci piva pod ní. Pěna extrémně závisí na čistotě skla, které by mělo být vždy řádně odmaštěné a vypláchnuté. I jednou vyčištěný püllitr musí být před načepováním opakovaně vypláchnutý vodou, aby se zevnitř na skle netvořily bubliny, které vznikají při interakci s prachem a jinými nečistotami a indikují špatně vypláchnuté sklo. V neposlední řadě by měl být püllitr vychlazen, aby nedocházelo k rychlému ohřátí piva a exsorpci CO₂.

5.1 Lahvové pivo

Prostor nad pivem je po stočení do lahve vyplněn ochrannou atmosférou CO₂. Z piva teoreticky v průběhu skladování neuniká ani se neabsorbuje oxid uhličitý. Dle doporučení by se vychlazené lahvové pivo mělo nalít do sklenice tak aby řádně vypěnilo a vytvořilo tak pěnu, přičemž část CO₂ z piva uniká.

5.2 Tankové pivo

Jak již bylo v úvodu zmíněno, pivo tankové je nabízeno naprosto minimálně v porovnání s ostatní nabídkou. Jedná se však o nejlepší technický systém pro čepování piva, který se postupně rozšiřuje. Zástavba tanků do restaurací a hospod začala počátkem 90. let. Distribuce a skladování piva ve větším množství než v klasických sudech přináší úsporu nákladů, a to jak pivovaru, tak i majitelům restaurací.

Technologie tvoří systém nerezových tanků o objemu 5 hl či 10 hl, ve kterých je pivo uloženo v nepropustném polypropylenovém vaku. Používáním tohoto systému nepřichází pivo při čepování vůbec do kontaktu se vzduchem nebo tlačným plynem, což má pozitivní vliv na kvalitu a trvanlivost piva, které je v tancích vždy nepasterizované. Nezbytnou podmínkou pro instalaci tankoven je určitá hodnota minimální výtoče, při níž je zavedení tankoven vhodné. [1]

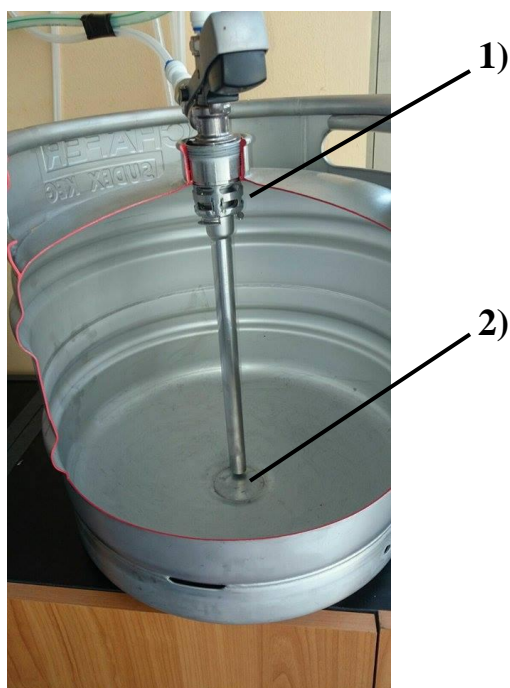
5.3 Sudové pivo

Při prodeji sudového piva bývá obtížné zachovat jeho stálou chuť a kvalitu po celou dobu naražení, jelikož je ovlivňováno několika faktory. Pivo, které je uvařené v pivovaru,

má vždy přibližně stejnou kvalitu, ta se ale právě během skladování a především po naražení může výrazně zhoršit. Významnou roli hraje skladování, sanitace, ošetření sklenice, které bylo popsáno výše a samotná distribuce piva, tedy doprava piva ze sudu do sklenice.

5.3.1 Tlačné plyny

Dopravu piva ze sudu zajišťuje stlačený plyn přiváděný nad hladinu (Obr. 5.2 1)), který tlačí pivo **ve spodní části sudu do pivní trubice** (Obr. 5.2 2)) a dále pivním potrubím až do výčepního kohoutu. Tlaková energie musí překonat třecí a místní ztráty a zaručit průtok. Pivo je tedy v přímém kontaktu s plynem, který se více či méně rozpouští v závislosti na podmínkách (tlak, teplota, typ plynu). Jak již bylo popsáno výše, různé plyny o určitém tlaku mohou ovlivnit výslednou chuť a chování piva a také platí, že se pro různé typy piv hodí jiný plyn o jiném nastavení tlaku. Mimo jiné to potvrzuje studie *Vliv tlačného média na obsah plynů v pivu a sensorické vlastnosti piva* [21], která porovnávala 4 typy tlačného média u 2 druhů piv. **Z experimentu vyplývá vliv různého chování jednotlivých tlačných plynů na kondici, složení a sensorické vlastnosti piva.**



Obr. 5.2

Řez pivním sudem 1) vstup plynu nad hladinu, 2) pivní trubice [archiv autora]

Běžně používané plyny při čepování jsou: **vzduch, dusík, čistý potravinářský oxid uhličitý nebo směsi CO₂ s dusíkem**. Mezi naprosté výjimky lze řadit některá anglická, speciálně čepovaná, piva. Místo hnacího plynu používají při čepování systém podobný pístovému čerpadlu, kde je pivo nasáváno do válce podtlakem vytvořeným pístem a následně "přetlačeno" do sklenice. Při tomto způsobu čepování nepřichází pivo do kontaktu s hnacím plynem, ale absolutně ztrácí říz v důsledku nízkého nasycení CO₂.

Nejhorší volbou je použití **čistého vzduchu**, jedná se však stále o používaný levný plyn, jelikož pořízení vzduchového kompresoru se z ekonomického hlediska vyplatí. Vzduch obsahuje kyslík, který způsobuje oxidaci piva, ve kterém vzniká prostředí příznivé pro množení mikroorganismů. Pivo dále ztrácí říz, jelikož může docházet k exsorpci CO₂. U vzduchových kompresorů může nadále docházet ke znečištění piva z prostředí kompresoru, které nejsou vždy určeny k potravinářským účelům. Určité omezení používání vzduchu jako tlačného média nastalo v roce 2006, kdy byl vydán "Kodex péče o pivo v gastronomii", který vzduch nedoporučuje. Toto doporučení neplatí v případě, kdy je sud vytočen v krátké době, cca do 3 hodin, pak lze použít pro čepování piva potravinářský kompresor. [21]

Hlavní předností použití **čistého dusíku** je zamezení oxidace piva, mimo to nemůže dojít k přesycení plynem, jelikož se dusík v pivu rozpouští několikanásobně méně než CO₂ viz Obr. 3.4. Některé publikace ([19], [21]) dokonce uvádějí, že dusík zlepšuje kvalitu pěny a může ovlivnit i říz piva. Nevýhodou použití čistého dusíku je, že může docházet k nežádoucímu úniku CO₂, především když je sud vystaven vyšším teplotám.

Jako logické řešení se nabízí použití **čistého oxidu uhličitého**, který je nedílnou součástí takřka každého piva, zamezuje oxidaci a při správném nastavení tlaku nedochází k úniku oxidu uhličitého. Při malé výtoči, nízké teplotě a vysokém tlaku však může docházet k nežádoucímu dodatečnému rozpouštění CO₂, jenž má za následek přesycení piva. [21]

Směs technických plynů (CO₂ a N₂) kombinuje výhody dusíku a oxidu uhličitého. Jedná se o inertní plyn, který výrazně neovlivňuje chuť piva a lze upravovat poměr plynu podle druhu piva nebo přání zákazníka. Standardně jsou plyny dodávány o koncentracích 20%_{hm}. CO₂ 80%_{hm}. N₂, nebo v poměru 1:1. Tyto směsi jsou v současnosti považovány za nejvíce univerzální a vyhovují požadavkům na standardní kvalitu piva. [21] Nevýhodou těchto směsí je jejich vyšší cena.

5.3.2 Chlazení sudového piva

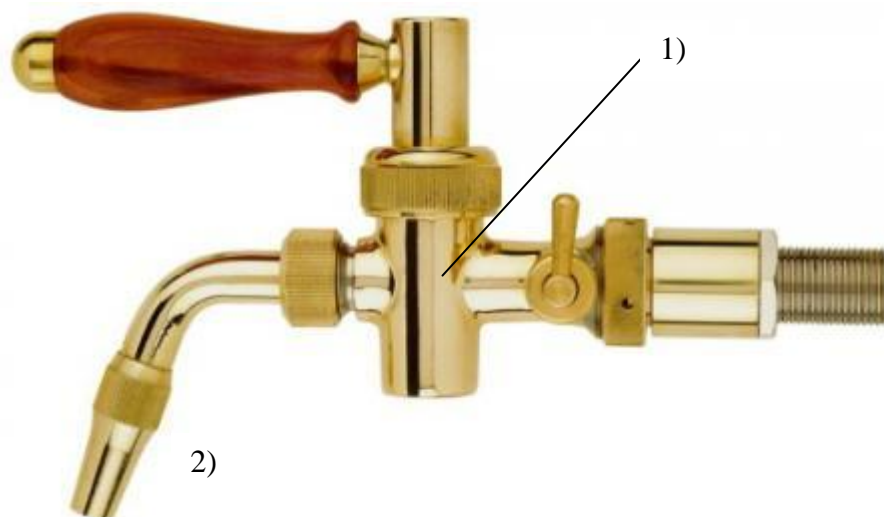
Sudové pivo je nejčastěji chlazeno průtokovým chladičem, umístěným těsně před výčepním kohoutem, přičemž **sud je vystaven pokojové teplotě**. Méně často se setkáváme s případy, kdy je **sud chlazen celý** a pivo je vedeno izolovaným potrubím až k výčepnímu kohoutu. Chlazen může být například v lednici pro zvýšení trvanlivosti nebo v chladicím boxu v společně s tankovým pivem (sudové pivo může být nabízeno jako alternativa k pivu tankovému a většinou se jedná o nějaký pivní speciál). V předchozích kapitolách je popsáno, jak teplota ovlivňuje rozpustnost plynu v kapalině. Je tedy zřejmé, že v případě stejného tlaku plynu se v obou alternativách bude plyn rozpouštět jinak.

5.4 Vzniky a úbytek pěny

Pěna vzniká náhlým uvolněním velkého množství CO_2 z piva. Plyn může být z piva exsorbován poklesem tlaku, zvýšením teploty, při dopadu piva do sklenice, vnějším mechanickým zásahem nebo vířením, které může vzniknout samovolně v potrubí. Právě při nalévání a čepování do sklenice je pivo vystaveno především víření, které nuceně "vyžene" plyn ven z kapaliny (viz kapitolu 3). Únik plynu posléze napomáhá vytvoření a udržení pěny. Literatura uvádí, že déle skladované pivo pod tlakem může přispět k lepší konzistenci a stabilitě pěny.[20] Podle inženýra Pavla Průchy (Plzeňský Prazdroj), by měla pěna vznikat až ve výčepním kohoutu, aby byla pěna hustá. Nejrozšířenější kohouty jsou s kulovým ventilem Obr. 5.3 a výčepní kohout se sedlovým ventilem Obr. 7.5. Pěna ve výčepním kohoutu s kulovým ventilem, vzniká přímo v kulovém kohoutu, ve kterém dochází k víření a mechanické exsorpci CO_2 v závislosti na poloze otevření kohoutu, a následně je zjemněna několika kovovými sítka. Kovová síťka nejsou standardně dodávaná, jedná se doporučení Lukáše Svobody. Takto vytvořená pěna by měla mít krémový charakter, měla by chránit pivo před oxidací a bublinky pěny by měly být co nejmenší (viz Obr. 5.4). Na obrázku je mimo jiné vidět, že na stěně nezůstávají bublinky, což svědčí o čistotě skla. Pivo by mělo být čepované po stěně sklenice, nejlépe pod vytvořenou pěnu, která pivo chrání před oxidací.

Dle praktických zkušeností sládků a výčepních mistrů může vyšší tlak eliminovat nežádoucí pění vznikající na trase mezi sudem a výčepním kohoutem, nebo pění, které se vyskytuje krátce po transportu sudu.

Stabilita pивní pěny závisí na způsobu čepování, typu piva, na čistotě a teplotě pивní sklenice, jak bylo popsáno výše a je také dokumentováno experimentem v dalších kapitolách. Dále se v této práci budeme zabývat, zda je úbytek pěny závislý na koncentraci CO_2 rozpuštěného v pivu.



Obr. 5.3

Výčepní kohout s kulovým ventilem[22]: 1) kulový kohout, 2) kovová sítko



Obr. 5.4

Ukázkově načepované tankové pivo Pilsner Urquell v restauraci Konvikt [archív autora].

III. Souhrn rešerše a formulace cílů práce a vlastních hypotéz.

V této kapitole jsou shrnuty důležité poznatky a vlastní hypotézy, které upřesňují cíle práce.

- Dle praktických zkušeností může **vyšší** tlak hnacího plynu eliminovat nežádoucí pění vznikající na trase mezi sudem a výčepním kohoutem. Dle mého názoru vyšší tlak pozitivně působí na udržení již rozpuštěného plynu v pivu a může eliminovat vznik bublin a tedy pění vzniklé, nebo vznikající vstupem piva do pivní trubice, zúžením v pivní hlavě nebo v jiném místě, kde je pivo vystaveno napětí. Pěna také může vznikat v pivním potrubí, ve kterém vlivem ztrát klesá tlak, což vede k narušení rovnováhy a následné tvorbě bublin. Příliš vysoký tlak by však mohl pivo přesycovat, což je nežádoucí. Tato hypotéza je v další části práce vyšetřena.
- Doposud byl několikrát diskutován vliv koncentrace CO₂. Jaká koncentrace CO₂ je pro pivo při čepování nejvhodnější a kdy je pivo přesycené? Podle mého nejvhodnější koncentrace je koncentrace, na kterou je pivo syceno pivovarem a přesycené pivo je takové, ve kterém je rozpuštěné více oxidu uhličitého. Dle této úvahy by pravidlem pro nastavení tlaku plynné směsi bylo, aby výsledná rovnovážná koncentrace nepřesáhla koncentraci stanovenou pivovarem.
- Různé typy a tlaky hnacího plynu ovlivňují rozpustnost plynů v pivu a tím chuť a chování piva. Určitý tlak je potřeba pro překonání ztrát a zajištění průtoku natolik intenzivního, aby bylo možné vytvořit ve výčepním kohoutu krémovou pěnu. Rychlost proudění by však neměla přecházet do plně vyvinutého turbulentního režimu, aby nedocházelo k nežádoucímu pění v potrubí. V praxi se nejčastěji setkáváme se dvěma případy chlazení piva. Chlazení průtokovým chladičem (**průtokové chlazení**) umístěným těsně před výčepním kohoutem, přičemž **sud je vystaven pokojové teplotě**. Méně často je **sud chlazen celý (objemové chlazení)** a pivo je vedeno dlouhým (i několik výškových metrů) izolovaným potrubím až k výčepnímu kohoutu. **V případě, kdy je pivo chlazené v chladicím boxu, bývá dál od výčepního kohoutu a může jednoduše dojít k přesycení, jelikož je potřeba vyššího tlaku pro překonání ztrát a navíc se za nižších teplot plyn lépe rozpouští.** V těchto případech je tedy nutné opatrně nastavovat tlak plynu nebo

zvolit směs plynu tak, aby pivo nepřesýtila. Další kapitoly podrobněji vyšetřují, jak velký rozdíl v obsahu CO_2 může nastat při průtokovém nebo objemovém chlazení, za předpokladu splnění podmínek průtoku.

- Při kontaktu oxidu uhličitého s vodou vzniká kyselina uhličitá, která snižuje pH vody. Následně lze pH běžně dostupnými prostředky měřit a dopočítat koncentraci oxidu uhličitého. Zda lze tento postup aplikovat na pivo, i za předpokladu že se do určitých koncentrací CO_2 pivo chová jako pufr, je v dalších kapitolách experimentálně ověřeno.
- Podle literatury ([21]) a praktických zkušeností je možné v reálném čase pivo přesytit. V literatuře však není exaktně popsán časový průběh sycení v závislosti na teplotě a tlaku. Pokusil jsem se toto tvrzení ověřit v další části práce provedením teoretické simulace distribuce CO_2 v pivním sudu. Následně jsem provedl experiment průběhu sycení na speciálně navrženém a upraveném pivním sudu, který vznikl v rámci této práce, a porovnal výsledky.
- Při měření úbytku pěny je nutné dodržet určitý standard nalévání vzorku, používané jsou různé nalévací přístroje založené na mechanickém překlopení lahve do šikmé polohy. V případě sudového piva je situace složitější, jelikož záleží na tom, jak dlouho je v určité poloze kohout otevřený. Podle zkušeností doc. Brányika z Ústavu pivovarnictví a sladařství na VŠCHT může měření úbytku pěny vykazovat značné chyby (až 20 %) v závislosti na zkušenosti experimentátora. Podle mého názoru by se mohla metoda zpřesnit v případě použití kompletně vypěněného vzorku piva nalitého do vysoké sklenice, aby bylo možné sledovat úbytek v co nejdelším čase. Toho lze docílit při čepování piva na takzvaný styl "mlíko", který se vytvoří částečným otevřením kohoutu, stále ve stejné poloze, až do naplnění sklenice hustou pěnou. Dále v práci je experimentálně vyšetřena závislost úbytku pěny na čistotě a teplotě pivní sklenice. Závěrečná část práce se bude zabývat, zda je úbytek pěny závislý na koncentraci CO_2 rozpuštěném v pivu.

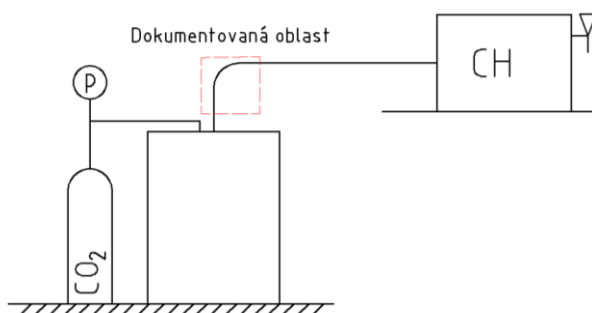
IV. Vlastní část práce

6 Vliv tlaku na tvorbu bublin v pivním potrubí

Dle praktických zkušeností může **vyšší** tlak hnacího plynu eliminovat nežádoucí pění piva vznikající na trase mezi sudem a výčepním kohoutem. Tato kapitola popisuje experiment, který tuto teorii ověřuje.

Testovacím vzorkem byl dvanáctistupňový nefiltrovaný ležák stočený do sudu v pivovaru Kácov. Podle pracovníků pivovaru si výčepní stěžují, že tento typ piva při čepování často příliš pění, především krátce po transportu.

V průběhu experimentu bylo dokumentováno transparentní pivní potrubí o délce 1,5 m , které vedlo z narážecí hlavy v sudu do chladicího průtokového zařízení (schematicky viz Obr. 6.1). Pivní potrubí v chladicím zařízení nejde dokumentovat, proto se tento experiment soustředil na začátek pivního potrubí, které vede od narážecí hlavy. V sudu se postupně zvyšoval tlak CO₂ na hodnoty přetlaku 0,8 bar, 1 bar, 1,5 bar, 2 bar a 2,5 bar. Během těchto nastavení se vždy načepovaly 3 půllitry piva. V sudu byla naměřena teplota piva 14°C. Na Obr. 5.2 - Obr. 5.4 jsou fotografie potrubí zachycující signifikantní změny při proudění piva a zvyšování přetlaku hnacího plynu.



Obr. 6.1

Schéma měření



Obr. 6.2

Pivní potrubí, přetlak plynu 0,8 bar



Obr. 6.3

Pivní potrubí, přetlak plynu 1,5 bar



Obr. 6.4

Pivní potrubí, přetlak plynu 2,5 bar

Při přetlaku CO_2 0,8 bar je na Obr. 5.2 vidět mnoho bublin, při tomto nastavení nebylo možné načepovat pivo najednou, půllitr byl vždy kompletně zaplněný řídkou pěnou s velkými bublinami. Obr. 5.3 dokumentuje pivní potrubí při nastavení přetlaku 1,5 bar, bubliny v potrubí takřka všechny zmizely, pivo bylo ale stále obtížné načepovat, zřejmě vznikala další pěna v chladicím zařízení. Při přetlaku 2,5 bar (Obr. 5.4) nejsou v potrubí patrné žádné bubliny a pivo bylo možné načepovat najednou bez vzniku nežádoucího pění. Tento tlak zřejmě eliminoval nežádoucí pění, které při nižším přetlaku dodatečně vznikalo v chladicím zařízení.

Dle těchto závěrů vyplývá, že vyšší tlak eliminuje nežádoucí pění v potrubí, a to i při použití piva, které je náchylné na pění a bylo krátce před experimentem transportované. Mezi faktory ovlivňující pění bude také teplota piva v sudu. Při vyšší teplotě bude mít pivo větší tendenci k pění. Vyšší tlak ale zvyšuje rozpustnost CO_2 , což bude v dalších kapitolách diskutováno.

7 Vliv tlaku a složení hnacího plynu

Z předchozích kapitol víme, že obsah oxidu uhličitýho v pivu ovlivňuje jeho chuť a kvalitu celkově a podle praktických zkušeností je možné pivo přesytit. Dle mého předpokladu je třeba udržet koncentraci CO₂ stejnou jakou pivo obsahuje při stáčení do sudů pivovarem. Podle toho by také měl být volen tlačný plyn a tlak v závislosti na teplotě. V této kapitole jsou popsány výpočty koncentrace CO₂ jako funkce teploty, tlaku a typu plynu pro **stacionární a nestacionární** stavy.

7.1 Stacionární stav

Dle Henryho zákona (kapitola 3.1) lze spočítat pro **stacionární stav** množství rozpuštěného CO₂ = $f(T, p, typ\ plynu)$. Jako příklad je níže uveden postup výpočtu pro případ sudu uloženého v chladicím zařízení o ustálené teplotě $t = 6\text{ }^{\circ}\text{C}$, tlačný plyn je 100% CO₂ o celkovém tlaku $p_S = 201\text{kPa}$ ³. Ve výpočtech jsou použité Henryho konstanty pro rozpustnost CO₂ - voda, jelikož se rozpustnost CO₂ v pivu chová podobně jako ve vodě.

$$t = 6^{\circ}\text{C}$$

$$p_S = p_p + p_b = 100 + 101 = 201\text{kPa} = 2.01\text{bar}$$

$$M_{CO_2} = 44 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$$

$$H(T) = H^0 \exp \left[\frac{d(\ln(H))}{d\left(\frac{1}{T}\right)} \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{298.15} \right) \right] = 0.035 \exp \left[2400 \cdot \left(\frac{1}{(6+273.15)} - \frac{1}{298.15} \right) \right] =$$

$$0.0605 \frac{\text{mol}_{CO_2}}{\text{kg} \cdot \text{bar}}$$

$$x_{CO_2} = p_S \cdot H = 2.01 \cdot 0.0605 = 0.1216 \frac{\text{mol}_{CO_2}}{\text{kg}} = 0.1216 \cdot 44 = 5,35 \frac{\text{g}_{CO_2}}{\text{kg}} \doteq 5,35 \frac{\text{g}_{CO_2}}{\text{l}}$$

Z výše uvedené rovnice můžeme vyjádřit tlak pro teplotu piva v sudu 6°C a 25°C pro udržení koncentrace $x_{CO_2} = 5 \frac{\text{g}_{CO_2}}{\text{l}}$ ⁴:

$$p_{S6^{\circ}\text{C}} = \frac{x_{CO_2}}{H_{6^{\circ}\text{C}}} \cdot M_{CO_2} = \frac{5}{0.0605 \cdot 44} = 1,878\text{bar} = 187,8\text{kPa}$$

$$p_{pCO_26^{\circ}\text{C}} = p_{CO_26^{\circ}\text{C}} - p_b = 187,8 - 101,325 = 86,47\text{kPa}$$

³ Většina redukčních ventilů (kterými se redukuje tlak z lahve do systému) zobrazuje hodnoty přetlaku. Skutečný tlak plynu CO₂, který působí na kapalinu je ale zvětšen o atmosférický tlak $p_b = 101\text{ kPa}$. V našem případě je tedy výpočtový tlak 201 kPa, ale tlak nastavený na ventilu by byl přetlak 100 kPa

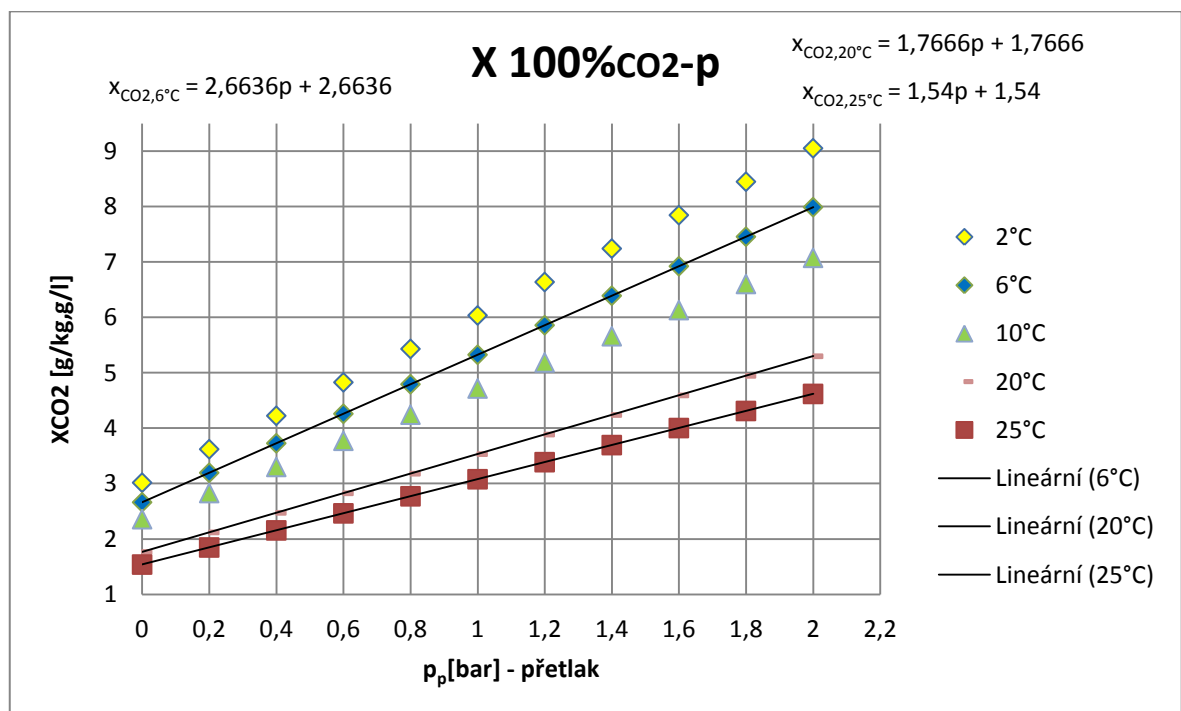
⁴ například pro dvanáctistupňové pivo Pilsner Urquell, které je na tuto koncentraci syceno pivovarem

$$p_{S25^{\circ}\text{C}} = \frac{x_{\text{CO}_2}}{H_{25^{\circ}\text{C}}} \cdot M_{\text{CO}_2} = \frac{5}{0.035 \cdot 44} = 3,25 \text{ bar} = 352 \text{ kPa}$$

$$p_{p\text{CO}_2,25^{\circ}\text{C}} = p_{\text{CO}_2,25^{\circ}\text{C}} - pb = 352 - 101,325 = 223,3 \text{ kPa}$$

Z tohoto výsledku vyplývá, že přetlak čistého oxidu uhličitého by pro pivo, které je pivovarem syceno na koncentraci $5\text{g}_{\text{CO}_2}/\text{l}$ (např. plzeňského typu) za teploty 6°C , byl $p_{p\text{CO}_2,6^{\circ}\text{C}} = 86,47\text{kPa} = 0,868 \text{ bar}$ nastavených na redukčním ventilu. Při teplotě 25°C vychází přetlak potřebný pro udržení koncentrace $5\text{g}_{\text{CO}_2}/\text{l}$ $p_{p\text{CO}_2,25^{\circ}\text{C}} = 223,3\text{kPa} = 2,23 \text{ bar}$. Což je tlak, při kterém by nemělo docházet k přesycování nebo exsorpce CO_2 .

Na Obr. 7.1 jsou zobrazené křivky rozpustnosti čistého CO_2 v pivo za různých teplot a tlaků. Hodnoty byly dopočítány podle předchozího vzoru, přičemž tlak je v grafu vyneseno jako přetlak CO_2 , který se nastavuje na redukčním ventilu u tlakové lahve. Pro zjednodušení výpočtu, který budeme dále používat, lze pro jednotlivé teploty křivky linearizovat a popsat rovnicemi.



Obr. 7.1

Křivky rozpustnosti čistého CO_2 v pivo. Hodnoty tlaku na ose x jsou udávány jako přetlak oproti atmosférickému tlaku

Místo čistého oxidu se v současnosti mohou použít směsi potravinářských plynů (CO_2 a N_2), které kombinují výhody dusíku a oxidu uhličitého (viz kapitola 5.3.1). Analogickým výpočtem určím rozpustnost plynné směsi 20%_{hm} CO_2 80%_{hm} N_2 v pивě, při přetlaku směsi $p_P = 2,5 \text{ bar}$ pro teplotu 6 °C.

Hmotnostní koncentraci nejprve převedu na molovou.

Hmotnost směsi m_s zvolím, $m_s = 100 \text{ kg} \Rightarrow$

$$m_{\text{CO}_2} = 100 \cdot 0,2 = 20 \text{ kg}$$

$$m_{\text{N}_2} = 100 \cdot 0,8 = 80 \text{ kg}$$

$$M_{\text{CO}_2} = 44 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$$

$$M_{\text{N}_2} = 28 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$$

$$n_{\text{CO}_2} = \frac{m_{\text{CO}_2}}{M_{\text{CO}_2}} = \frac{20}{44} = 0,4545 \text{ kmol}$$

$$n_{\text{N}_2} = \frac{m_{\text{N}_2}}{M_{\text{N}_2}} = \frac{80}{28} = 2,857 \text{ kmol}$$

$$y_{\text{CO}_2} = \frac{n_{\text{CO}_2}}{n_{\text{CO}_2} + n_{\text{N}_2}} = \frac{0,4545}{0,4545 + 2,857} = 0,1372$$

$$y_{\text{N}_2} = \frac{n_{\text{N}_2}}{n_{\text{CO}_2} + n_{\text{N}_2}} = \frac{2,857}{0,4545 + 2,857} = 0,8628$$

Parciální tlaky jednotlivých složek jsou dle rovnice (3.1) následně dány:

$$p_{\text{CO}_2} = y_{\text{CO}_2} \cdot (p_P + p_b) = 0,1372 \cdot (2,5 + 1,01) = 0,4815 \text{ bar}$$

$$p_{\text{N}_2} = y_{\text{N}_2} \cdot (p_P + p_b) = 0,8628 \cdot (2,5 + 1,01) = 3,028 \text{ bar}$$

kde p_b je atmosférický tlak.

Analogicky lze poté vypočítat rozpustnost jednotlivých plynů v pивě:

$$x_{CO_2} = p_{CO_2} \cdot H_{CO_2} = 0,4815 \cdot 0,0605 = 0,0291 \frac{\text{mol}_{CO_2}}{\text{kg}} = 0,0291 \cdot 44 =$$

$$1,28 \frac{\text{g}_{CO_2}}{\text{kg}} \doteq 1,28 \frac{\text{g}_{CO_2}}{\text{l}}$$

$$x_{N_2} = p_{N_2} \cdot H_{N_2} = 3,028 \cdot 0,00087 = 2,63 \cdot 10^{-3} \frac{\text{mol}_{CO_2}}{\text{kg}} = 2,63 \cdot 10^{-3} \cdot 28 =$$

$$= 0,07 \frac{\text{g}_{N_2}}{\text{kg}} \doteq 0,07 \frac{\text{g}_{N_2}}{\text{l}}$$

kde H_{N_2} je *Henryho konstanta* popisující rozpustnost **dušíku** ve vodě stanovená ze vztahu:

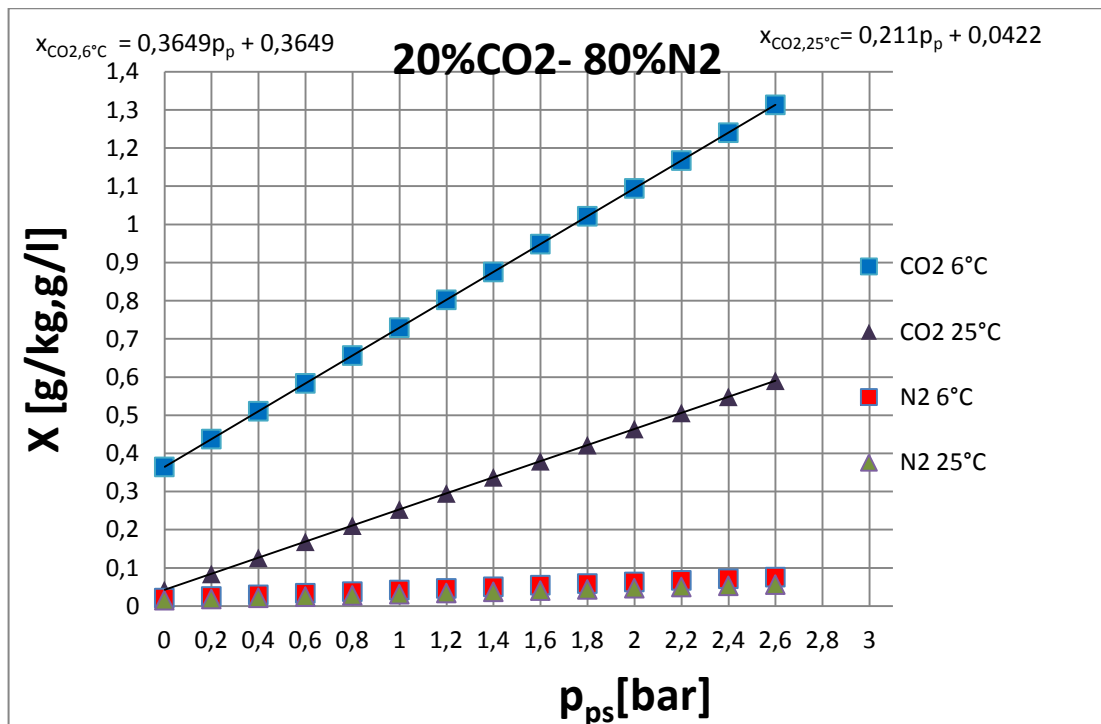
$$H_{N_2}(T) = H_{N_2}^0 \exp \left[\frac{d(\ln(H))}{d\left(\frac{1}{T}\right)} \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{298.15}\right) \right] \left[\frac{\text{mol}}{\text{kg} \cdot \text{bar}} \right] \quad [15]$$

$$H_{N_2}^0 = 0.00065 \left[\frac{\text{mol}}{\text{kg} \cdot \text{bar}} \right] \quad \text{- Henryho konstanta při } 20^\circ\text{C}$$

$$\frac{d(\ln(H))}{d\left(\frac{1}{T}\right)} = 1300[\text{K}] \quad \text{- Teplotně závislá konstanta}$$

T - Teplota [K]

Na Obr. 7.2 jsou zobrazené křivky rozpustnosti plynné směsi 20%_{hm} CO₂ 80%_{hm} N₂ v piva za různých teplot. Je patrné, že i za teploty 6°C a přetlaku přes 2,5 baru nedojde k přesycení piva, jelikož rovnovážná koncentrace má hodnotu kolem 1,3 $\frac{\text{g}_{CO_2}}{\text{l}}$. Teoreticky je však možné, že se bude plyn z piva naopak exsorbovat.



Obr. 7.2

Křivky rozpustnosti CO₂ a N₂ v pivo.

7.2 Tlaková ztráta a minimální tlak plynu pro průtokové a objemové chlazení

Představme si nyní dva výčepy v letním období. První, který používá průtokové chlazení, přičemž sud je uložen v pokojové teplotě 25 °C (Obr. 7.10), a druhý, který má pивní sud uložený v chladicím zařízení o teplotě 6 °C (Obr. Obr. 7.11). Obě situace jsou reálně instalované výčepy v restauraci *Hotel Bouček* (první) a v domácnosti (druhý). V obou případech se bude lišit minimální přípustný tlak vzhledem k rozdílným tlakovým ztrátám v systému. V této kapitole je cílem zjistit, zda tlaky, které jsou potřeba pro překonání ztrát obou chladicích systémů, mohou pivo nepříznivě ovlivnit. Aby bylo možné určit tlakovou ztrátu systému, je nezbytné určit tlakové ztráty jednotlivých komponentů, pro které není tlaková ztráta dostupná v literatuře nebo od výrobce.

Výpočet tlakových ztrát

Ztráta při proudění reálné kapaliny je nevyužitá energie disipovaná v potrubí. Obecně se dají rozdělit na místní a na třecí ztráty. Třecí ztráta je způsobena vazkostí tekutiny a je závislá na několika parametrech, např. viskozitě kapaliny, rychlosti proudění a na geometrii a drsnosti vnitřního povrchu potrubí. Pro výpočet třecí ztráty se využívá Darcy-Weisbachův vztah (7.1), kde L je délka potrubí, \bar{u} střední rychlost proudění, D_o hydraulický průměr potrubí a λ je ztrátový součinitel hydraulického tření. Mezi místní ztráty řadíme: potrubní armatury, pozvolné nebo náhlé zúžení či rozšíření potrubí, ohyby, odbočky, přípojky apod. Místní ztráta e_{zi} se vypočítá ze vztahu (7.2) jako násobek kinetické energie a ztrátového součinitele ζ , který závisí na druhu hydraulického odporu a lze jej stanovit experimentálně nebo pro najít v literatuře. Celková tlaková ztráta se pak určí jako součet jednotlivých ztrát. Tlaková ztráta součásti se vykresluje do grafu jako ztráta tlaku při určitém průtoku [28].

$$e_z = \lambda \cdot \frac{L}{D_o} \cdot \frac{\bar{u}^2}{2} [\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (7.1)$$

$$e_{zi} = \zeta_i \cdot \frac{\bar{u}^2}{2} [\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (7.2)$$

V laminární oblasti je λ závislá pouze na hodnotě Re (7.3). A je konstanta, která je závislá na geometrii průřezu potrubí, například pro kruhový průřez - $A = 64$. Hodnoty pro jiné geometrické tvary průřezu se dají najít v literatuře (např. v [3]).

$$\lambda = \frac{A}{\text{Re}} \quad (7.3)$$

V turbulentní oblasti lze použít pro hydraulicky hladké potrubí Blasiovův vztah (7.4)

$$\lambda = \frac{0.316}{\sqrt[4]{\text{Re}}} \quad (7.4)$$

Pro hydraulicky drsné potrubí v oblasti ($\text{Re} \geq 2320$) je možné užít vztah (7.5)

$$\lambda = \left\{ 2 \log \left[0.27k^* + \left(\frac{7}{\text{Re}} \right)^{0.9} \right] \right\}^{-2} \quad (7.5)$$

Ztráta e_z je úměrná tlakové ztrátě p_z a ztrátové výšce h_z vyjádřené v energetickém tvaru (7.2.1). Jednoduchou úpravou této rovnice vypočteme p_z (7.2.2) nebo h_z (7.2.3).

$$e_z = \frac{p_z}{\rho} = h_z \cdot g \quad [\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (7.2.1)$$

$$p_z = e_z \cdot \rho = \zeta \cdot \frac{\bar{u}^2 \cdot \rho}{2} = g \cdot h_z \cdot \rho [\text{Pa}] \quad (7.2.2)$$

$$h_z = \frac{e_z}{g} = \zeta \cdot \frac{\bar{u}^2}{2 \cdot g} = \frac{p_z}{\rho \cdot g} [\text{m}] \quad (7.2.3)$$

Určení tlakové ztráty komponentů

Vzhledem k tomu, že ztráty částí výčepního zařízení nejsou dostupné v literatuře, se v experimentu měřila tlaková ztráta průtokového chladiče (e_{zch}), narážecí hlavy typu bajonet (e_{zh}) a nejběžněji využívaného výčepního kohoutu se sedlovým ventilem (e_{zp}). Na Obr. 7.3 je schéma měřicí trati. Trať obsahuje kulový kohout za vstupem vody, manometr, přípojovací potrubí a vždy jednu měřenou součást.

Při každém měření se postupně měnil průtok kulovým ventilem, který byl vždy změřen, jako objem vody v odměrném válci za čas t . Postupně se zaznamenávaly hodnoty průtoku odpovídající tlaku změřeného pomocí manometru. Dle Obr. 7.3 a Obr. 7.4 se celková změřená ztráta vždy rovná:

$$e_{zc} = e_{z1} + e_{z2} + e_{z3} + e_{z4} \quad (7.6)$$

Kde:

e_{z1} – Ztráta náhlým a rozšířením šroubení

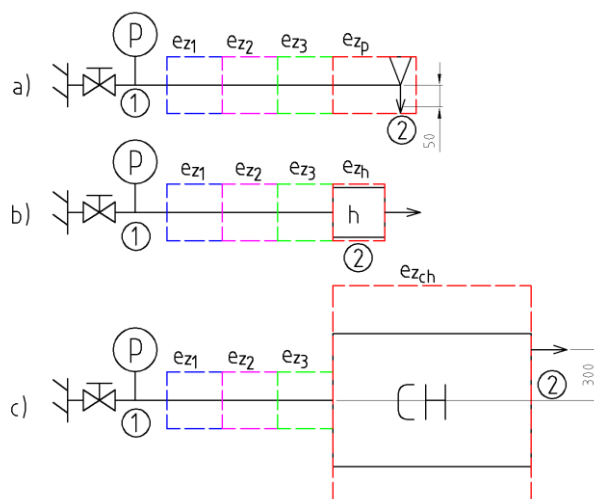
e_{z2} – Ztráta v potrubí

e_{z3} – Ztráta náhlým zúžením

e_{z4} – Ztráta součásti (e_{zch}, e_{zp}, e_{zh})

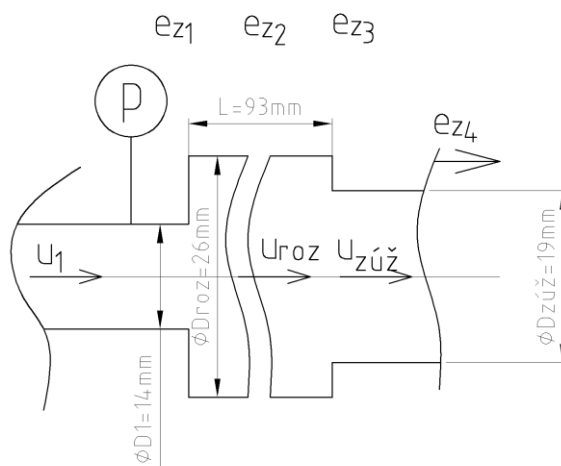
Vyjádření hledané tlakové ztráty e_{z4} ze vztahu (7.6) dostaneme:

$$e_{z4} = e_{zc} - e_{z1} - e_{z2} - e_{z3} \quad (7.6.1)$$



Obr. 7.3

Schéma měřicí trati: a) měření výčepního kohoutu, b) měření narážecí hlavy, c) měření chladičního zařízení



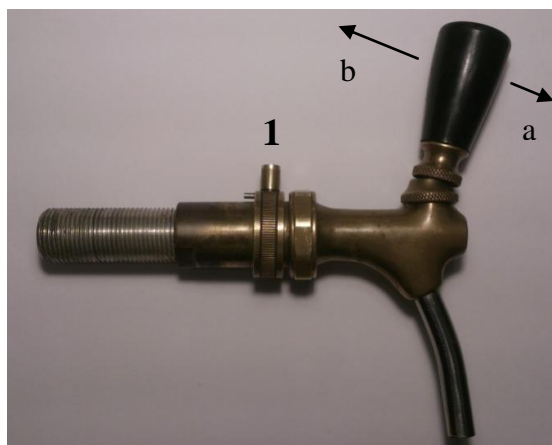
Obr. 7.4

Schéma pro výpočet tlakových ztrát

Příklad výpočtu:

Výpočty tlakových ztrát součástí jsou naprosto analogické. Níže je uveden příklad výpočtu tlakové ztráty pro výčepní kohout při úplném otevření pákového kohoutu při průtoku $\dot{V} = 1,225 \cdot 10^{-4} \text{m}^3 \text{s}^{-1}$ a naměřeném tlaku 61 kPa.

Výčepní kohout má proměnnou charakteristiku, kterou mění pákový ventil (1) a obrácené otevření výčepního kohoutu ⁵(b) (viz Obr. 7.5 a Obr. 7.6). Pákovým ventilem se při čepování provádí dodatečná úprava průtoku a obrácené otevření výčepního kohoutu se používá pro vytvoření prvotní pěny. Výsledná charakteristika výčepního kohoutu bude mít 3 křivky, dvě pro různé polohy pákového kohoutu a jednu pro obrácené otevření výčepního kohoutu.



Obr. 7.5

Výčepní kohout se sedlovým ventilem



Obr. 7.6

Výčepní kohout se sedlovým ventilem s označením regulace pákovým kohoutem.

⁵ v pivařské terminologii se někdy nazývá jako *zpátečka*

V průběhu experimentu byla naměřena teplota vody 10 °C, čemuž odpovídá hustota $\rho = 999 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ a dynamická viskozita $\mu = 1,307 \cdot 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ [29]

a) Celková ztráta e_{zc}

Rozeepsáním Bernoulliho rovnice mezi body 1 a 2 dostaneme:

$$\frac{p+p_b}{\rho} + g \cdot h_1 + \frac{u_1^2}{2} = \frac{p_b}{\rho} + g \cdot h_2 + \frac{u_2^2}{2} + e_{zc} \quad (7.7)$$

Kde:

$h_1 = 50 \text{ mm}; h_2 = 0 \text{ mm}; p$ - změřený přetlak = 61 kPa ; p_b - atmosférický tlak; ρ - hustota vody; g - tíhové zrychlení = $9,81 \text{ m s}^{-2}$ $u_{1,2}$ - střední rychlost v místě 1 resp. 2

Upravením rovnice (7.7) přejde vztah do tvaru (7.8) pro výpočet celkové ztráty e_{zc}

$$e_{zc} = \left(\frac{p}{\rho} + g \cdot h_1 + \frac{u_1^2}{2} - \frac{u_2^2}{2} \right) \cdot \rho \quad [Pa] \quad (7.8)$$

Střední rychlosti lze vypočítat, známe-li objemový průtok $\dot{V} [\text{m}^3 \text{s}^{-1}]$ a průřez potrubí S . Pro průměr potrubí v místě 1 $D_1 = 14 \text{ mm}$ a v místě 2 $D_2 = 8 \text{ mm}$ jsou rychlosti následující:

$$u_1 = \frac{\dot{V}}{S_1} = \frac{\dot{V}}{\frac{\pi \cdot D_1^2}{4}} = \frac{1,225 \cdot 10^{-4}}{\frac{\pi \cdot (14 \cdot 10^{-3})^2}{4}} = 0,796 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$u_2 = \frac{\dot{V}}{S_2} = \frac{\dot{V}}{\frac{\pi \cdot D_2^2}{4}} = \frac{1,225 \cdot 10^{-4}}{\frac{\pi \cdot (8 \cdot 10^{-3})^2}{4}} = 2,438 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Po dosazení výše vypsanych hodnot do rovnice (7.8) obdržíme:

$$\begin{aligned} e_{zc} &= \left(\frac{p}{\rho} + g \cdot h_1 + \frac{u_1^2}{2} - \frac{u_2^2}{2} \right) \cdot \rho \\ &= \left(\frac{61000}{999,4} + 9,81 \cdot 50 \cdot 10^{-3} + \frac{0,796^2}{2} - \frac{2,438^2}{2} \right) \cdot 999 = 58 \, 836 \text{ Pa} \end{aligned}$$

⁶ Do rovnic dosazujeme v jednotkách SI

b) Místní ztráta e_{z1}

Podle rovnice (7.2) je pro výpočet tlakové místní ztráty nutné stanovit ztrátového součinitele. Dle literatury a Obr. 9.9 se ztrátový součinitel ζ stanoví podle následujícího vztahu:

$$\text{Náhlé rozšíření} - \zeta_{roz} = \left(1 - \frac{S_1}{S_{roz}}\right)^2 \quad [28]$$

$$\zeta_{roz} = \left(1 - \frac{\frac{\pi \cdot (14 \cdot 10^{-3})^2}{4}}{\frac{\pi \cdot (26 \cdot 10^{-3})^2}{4}}\right)^2 = 0,504$$

Výsledná tlaková ztráta e_{z1} se poté dle (7.2) rovná:

$$e_{z1} = \frac{u_1^2}{2} \cdot \zeta_{roz} = \frac{0,796^2}{2} \cdot 0,504 = 0,1597 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Vyjádřené v jednotkách tlaku:

$$e_{z1} = 0,1597 \cdot \rho = 0,1597 \cdot 999 = 159,71 \text{ Pa}$$

c) Třecí ztráta e_{z2}

Dle předchozí teorie se třecí tlaková ztráta stanoví pomocí Darcy-Weisbachova vztahu (7.1):

$$e_{z2} = \lambda \cdot \frac{L}{D_{roz}} \cdot \frac{u_{roz}^2}{2}$$

u_{roz} se stanoví obdobně jako v předchozích výpočtech dle zákona zachování hmoty

$$u_{roz} = \frac{\dot{V}}{S_{roz}} = \frac{\dot{V}}{\frac{\pi \cdot D_{roz}^2}{4}} = \frac{1,225 \cdot 10^{-4}}{\frac{\pi \cdot (26 \cdot 10^{-3})^2}{4}} = 0,231 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Ztrátový součinitel λ se určí podle předchozích vztahů (7.3) - (7.5). Nejprve stanovíme, o jakou oblast proudění se jedná.:

$$Re = \frac{u_{roz} \cdot D_{roz} \cdot \rho}{\mu} = \frac{0,231 \cdot 26 \cdot 10^{-3} \cdot 999}{1,307 \cdot 10^{-3}} = 6280 > 2320$$

\Rightarrow Turbulentní oblast proudění

$$k^* = \frac{k_{stř}}{D_{roz}} = \frac{0,002}{26} = 7,69 \cdot 10^{-5}$$

Připojovací potrubí z PVC má velice nízkou hodnotu relativní drsnosti k^* a hodnota čísla Re leží v mezích pro použití Blasiova vztahu (7.3).

$$\lambda = \frac{0,316}{\sqrt[4]{Re}} = \frac{0,316}{\sqrt[4]{6280}} = 0,0355$$

Dosazením do vztahu (7.1) získáme:

$$e_{z2} = 0,0355 \cdot \frac{93 \cdot 10^{-3}}{26 \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{0,231^2}{2} = 0,0162 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Vyjádřené v jednotkách tlaku:

$$e_{z2} = 0,0162 \cdot \rho = 0,0162 \cdot 999,4 = 16,22 \text{ Pa}$$

d) Místní ztráta e_{z3}

Místní ztráta e_{z3} je ztráta náhlým zúžením. Součinitel $\zeta_{zúž}$ se stanoví podle následujícího vztahu:

$$\zeta_{zúž} = 0,5 \cdot \left(1 - \frac{S_{zúž}}{S_{roz}}\right)^2$$

$$\zeta_{zúž} = 0,5 \cdot \left(1 - \frac{\frac{\pi \cdot (19 \cdot 10^{-3})^2}{4}}{\frac{\pi \cdot (26 \cdot 10^{-3})^2}{4}}\right)^2 = 0,233$$

$$e_{z3} = \frac{u_{roz}^2}{2} \cdot \zeta_{zúž} = \frac{0,231^2}{2} \cdot 0,233 = 6,216 \cdot 10^{-3} \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$$

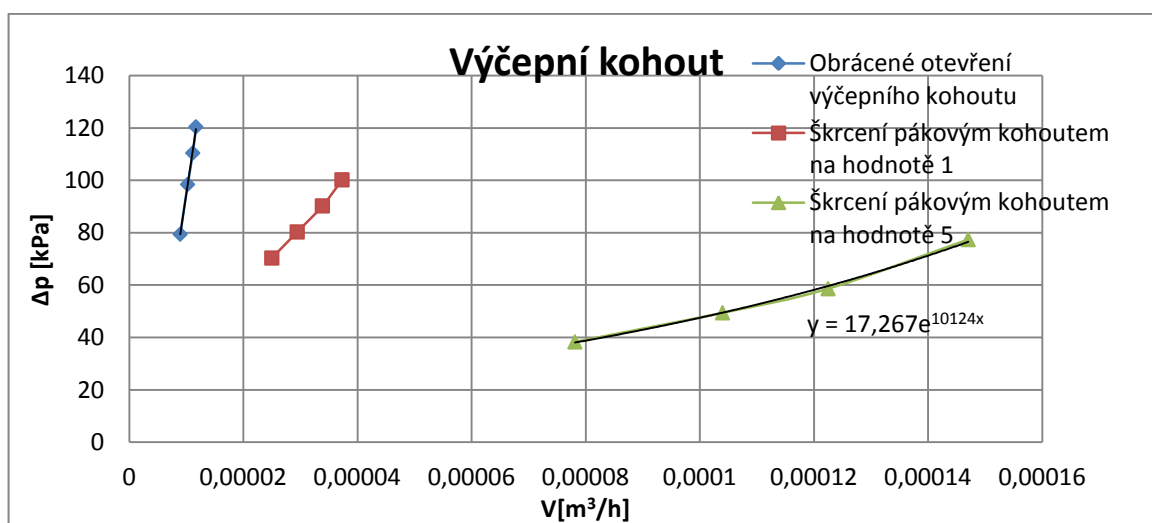
Vyjádřené v jednotkách tlaku:

$$e_{z3} = 6,216 \cdot 10^{-3} \cdot \rho = 6,216 \cdot 10^{-3} \cdot 999 = 6,204 \text{ Pa}$$

Nyní lze dosazením do vztahu (7.6.1) stanovit tlakovou ztrátu ve výčepním kohoutu, pro daný průtok a plně otevřený pákový kohout:

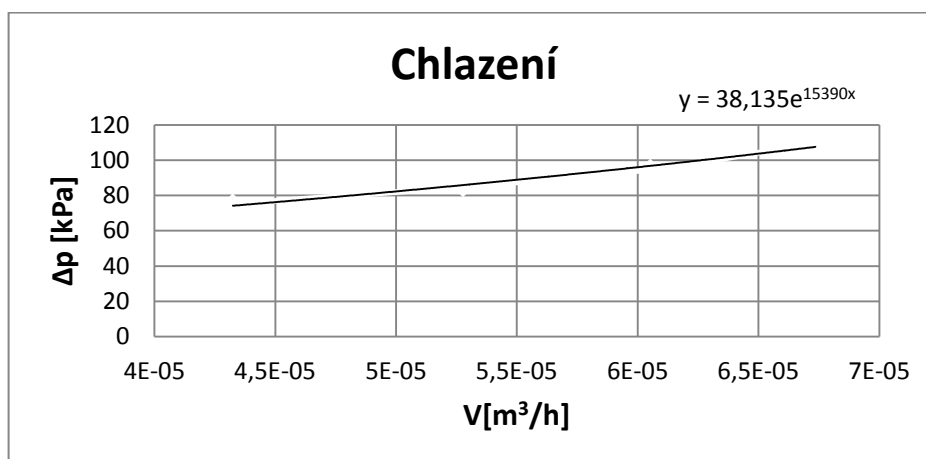
$$e_{z4} = e_{zc} - e_{z1} - e_{z2} - e_{z3} = 58\,836 - 159,71 - 16,22 - 6,204 = 58\,653 \text{ Pa}$$

Z tohoto výsledku je zřejmé, že místní a třecí ztráty vycházejí o několik řádů nižší než naměřená ztráta výčepního kohoutu a tudíž jsou chyby vzniklé odhadem ztrát v přírodním potrubí zanedbatelné. Zcela analogicky proběhl dopočet charakteristiky výčepního kohoutu a ostatních součástí, pro které jsou níže vykreslené jednotlivé grafy.



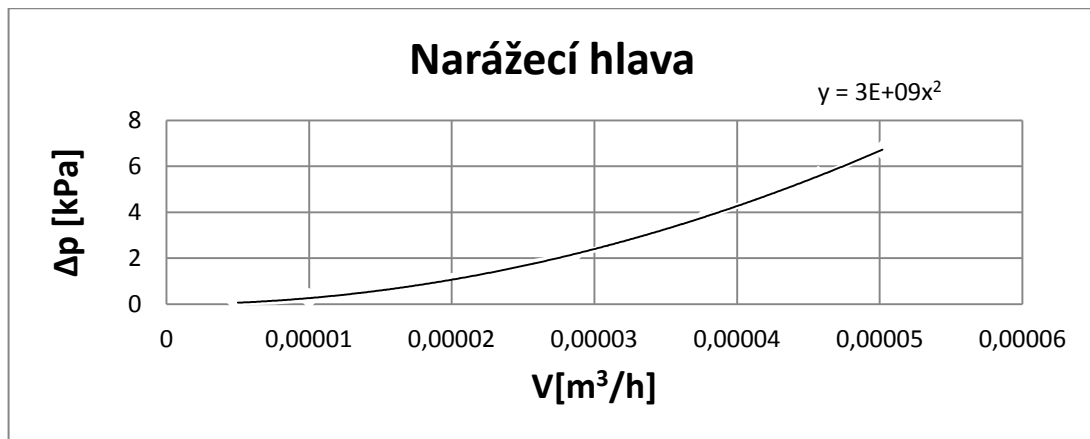
Obr. 7.7

Charakteristika výčepního kohoutu



Obr. 7.8

Závislost tlakové ztráty průtočného chlazení na průtoku



Obr. 7.9

Závislost tlakové ztráty nárážecí hlavy na průtoku

Stanovení minimálního tlaku plynu pro průtočné chlazení.

Schematicky je případ průtočného chlazení zobrazen na Obr. 7.10. Jedná se o nejběžněji používané chlazení. Sud je uložený pod výčepním pultem v pokojové teplotě 25 °C a pivo je chlazené v průtočném chlazení. Minimální přípustný tlak bude úměrný ztrátě systému pro zvolený objemový průtok. Bernoulliho rovnice mezi body 1 a 2 bude mít tvar (7.9).

$$\frac{p+p_b}{\rho} + g \cdot h_1 + \frac{u_1^2}{2} = \frac{p_b}{\rho_{25^\circ C}} + g \cdot h_2 + \frac{u_2^2}{2} + e_{zc} \quad (7.9)$$

Celková ztráta e_{zc} bude v tomto případě složena z třech a místních ztrát v potrubí, ztráty v chlazení a ztráty ve výčepním kohoutu. Na Obr. 7.10 jsou jednotlivé signifikantní ztráty zobrazené červenou barvou. Jako počáteční podmínku je potřeba stanovit objemový průtok, který vypočítáme z časové podmínky pro načepování půllitru piva. Dle měření v Pražské restauraci Konvikt, trvá načepování jednoho půllitru piva přibližně 6 - 10 sekund, v případě, že předpokládáme čepování do půllitru bez přerušení. Tento průtok zajistí nejen spokojené hosty, ale také potřebnou kinetickou energii pro vytvoření krémové pěny ve výčepním kohoutu.

Některé výčepy čepují i 20 sekund, v případě, že jim pivo pění a upravením rychlosti proudění se snaží snížit pěnivost při dopadu piva na stěnu a dno půllitru. Zvýšené pěnivosti může ale předcházet vznik bublin v potrubí. Dle předchozího experimentu víme, že lze pění v potrubí potlačit zvýšením tlaku. V následujícím výpočtu je stanovený potřebný přetlak plynu v sudu pro podmínku načepování piva za 10 a 20 sekund.

Objemový průtok se následně stanoví jako objem za čas.

$$\dot{V} = \frac{V}{t} = \frac{0,5 \cdot 10^{-3}}{10} = 5 \cdot 10^{-5} m^3 \cdot s^{-1}$$

$$\dot{V} = \frac{V}{t} = \frac{0,5 \cdot 10^{-3}}{20} = 2,5 \cdot 10^{-5} m^3 \cdot s^{-1}$$

$$\rho_{25^\circ C} = 997 kg \cdot m^{-3}$$

$$\mu_{25^\circ C} = 0,890 \cdot 10^{-3} Pa \cdot s$$

Celková tlaková ztráta e_{zc} je dle Obr. 7.10 rovna:

$$e_{zc} = e_{zvs} + e_{tř1} + e_{zh} + e_{tř2} + e_{zk} + e_{zch} + e_{zp} \quad (7.10)$$

e_{zvs} – ztráta na vstupu do potrubí

$e_{tř1}$ – třecí ztráta ve vstupním potrubí

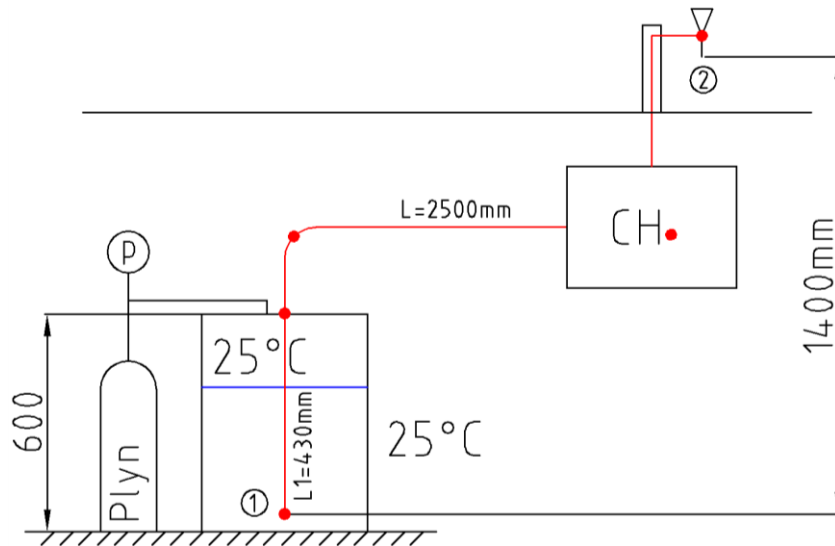
e_{zh} – ztráta v narážecí hlavě

$e_{tř2}$ – třecí ztráta v pívním potrubí

e_{zk} – ztráta v koleně

e_{zch} – ztráta v chlazení

e_{zp} – ztráta ve výčepní pípě (uvažujeme plně otevřený kuželový kohout)



Obr. 7.10

Schéma průtočného chlazení piva

Ztráty e_{zh} , e_{zch} , e_{zp} stanovené v předešlém měření určíme z příložených grafů (Obr. 7.7, Obr. 7.8 a Obr. 7.9).

a) Pro průtok $5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ jsou jednotlivé ztráty následující:

$$e_{zh} = 7,5 \text{ kPa}$$

$$e_{zch} = 177,7 \text{ kPa}$$

$$e_{zp} = 28,64 \text{ kPa}$$

Ostatní ztráty se stanoví obdobně jako v předchozích výpočtech dle literatury [28], pro zkrácení zápisu jsou níže uvedeny pouze výpočty typů ztrát, které doposud nebyly počítány. U ostatních ztrát jsou uvedeny výsledky.

e_{zvs} - Ztráta na vstupu do potrubí

$$e_{zvs} = \zeta_{vs} \cdot \frac{u_s^2}{2}$$

Ztrátový součinitel ξ_{vS} se určí podle grafu, který lze najít v literatuře [28] a rychlost je u_S je rychlost v potrubí sudu.

$$u_S = \frac{\dot{V}}{S_S} = \frac{\dot{V}}{\frac{\pi \cdot D_S^2}{4}} = \frac{5 \cdot 10^{-5}}{\frac{\pi \cdot (18 \cdot 10^{-3})^2}{4}} = 0,19 m \cdot s^{-1}$$

$$\zeta_{vS} = 0,18$$

$$e_{zvs} = 0,18 \cdot \frac{0,19^2}{2} = 3,249 \cdot 10^{-3} J \cdot kg^{-1} = 3,239 \cdot 10^{-3} kPa$$

e_{zk} - Ztráta v koleni

$$e_{zk} = (\zeta_o + \zeta_t) \cdot \frac{u_p^2}{2} [J \cdot kg^{-1}]$$

$$\zeta_o = 0,21 \cdot \left(\frac{r}{d}\right)^{-1/2} = 0,21 \cdot \left(\frac{0,2}{10 \cdot 10^{-3}}\right)^{-1/2} = 0,0469$$

$$u_p = \frac{\dot{V}}{S_p} = \frac{\dot{V}}{\frac{\pi \cdot D_p^2}{4}} = \frac{5 \cdot 10^{-5}}{\frac{\pi \cdot (10 \cdot 10^{-3})^2}{4}} = 0,63 m \cdot s^{-1}$$

$$Re = \frac{u_p \cdot D_p \cdot \rho_{25^\circ C}}{\mu_{25^\circ C}} = \frac{0,63 \cdot 10 \cdot 10^{-3} \cdot 997}{0,89 \cdot 10^{-3}} = 7057 > 2320 \Rightarrow$$

$$\lambda = \frac{0,316}{\sqrt[4]{Re}} = \frac{0,316}{\sqrt[4]{7057}} = 0,0345$$

$$\zeta_t = \frac{\pi}{2} \cdot \lambda \cdot \frac{r}{d} = \frac{3,14}{2} \cdot 0,0345 \cdot \frac{0,2}{10 \cdot 10^{-3}} = 1,0833$$

$$e_{zk} = (\zeta_o + \zeta_t) \cdot \frac{u_p^2}{2} = (0,0469 + 1,0833) \cdot \frac{0,63^2}{2} = 0,224 J \cdot kg^{-1} = 0,224 \cdot 997 Pa$$

$$= 223 Pa = 0,223 kPa$$

$$e_{tř1} = 0,017 kPa$$

$$e_{tř2} = 1,734 kPa$$

$$\begin{aligned}
e_{zc} &= e_{zvs} + e_{tř1} + e_{zh} + e_{tř2} + e_{zk} + e_{zch} + e_{zp} \\
&= 3,2 \cdot 10^{-3} + 0,017 + 7,5 + 1,734 + 0,223 + 177,7 + 28,64 \\
&= 215 \text{ kPa} = \frac{215 \cdot 10^3}{997} = 216 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}
\end{aligned}$$

Z rovnice (7.9) lze nyní určit potřebný přetlak plynu v sudu pro průtok $5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Rychlost úbytku piva u_1 lze zanedbat a výška h_2 je zvolena pro případ kdy je hladina piva v sudu takřka na dně:

$$u_2 = \frac{\dot{V}}{S_2} = \frac{\dot{V}}{\frac{\pi \cdot D_2^2}{4}} = \frac{5 \cdot 10^{-5}}{\frac{\pi \cdot (8 \cdot 10^{-3})^2}{4}} = 0,995 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\begin{aligned}
\frac{p+p_B}{\rho} + g \cdot h_1 + \frac{u_1^2}{2} &= \frac{p_B}{\rho} + g \cdot h_2 + \frac{u_2^2}{2} + e_{zc} \Rightarrow p = \left(g \cdot h_2 + \frac{u_2^2}{2} + e_{zc} \right) \cdot \rho = \\
(9,81 \cdot 1,4 + \frac{0,995^2}{2} + 216) \cdot 997 &= 249478 \text{ Pa} = \mathbf{229,5 \text{ kPa} = 2,29 \text{ bar}}
\end{aligned}$$

b) Pro průtok $2,5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ je výpočet totožný a již není uveden.

$$e_{zh} = 1,875 \text{ kPa}$$

$$e_{zch} = 56 \text{ kPa}$$

$$e_{zp} = 22,2 \text{ kPa}$$

$$e_{zvs} = 0,86 \text{ kPa}$$

$$e_{tř1} = 8 \cdot 10^{-3} \text{ kPa}$$

$$e_{zk} = 0,324 \text{ kPa}$$

$$e_{tř2} = 0,48 \text{ kPa}$$

$$\begin{aligned}
e_{zc} &= e_{zvs} + e_{tř1} + e_{zh} + e_{tř2} + e_{zk} + e_{zch} + e_{zp} = 81,8 \text{ kPa} = \frac{81,8 \cdot 10^3}{997} \\
&= 81,9 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}
\end{aligned}$$

$$u_2 = \frac{\dot{V}}{S_2} = \frac{\dot{V}}{\frac{\pi \cdot D_2^2}{4}} = \frac{2,5 \cdot 10^{-5}}{\frac{\pi \cdot (8 \cdot 10^{-3})^2}{4}} = 0,497 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$p = \left(g \cdot h_2 + \frac{u_2^2}{2} + e_{zc} \right) \cdot \rho = \left(9,81 \cdot 1,4 + \frac{0,497^2}{2} + 81,9 \right) \cdot 997 = 95700 \text{ Pa} =$$

95 kPa = 0,95 bar

Potřebný minimální přetlak plynu je **2,29 bar** pro načepování piva za 10 sekund a **0,95bar** pro načepování za 20 sekund. V případě, že by se jednalo o čistý oxid uhličitý, lze ve stacionárním režimu dle Obr. 9.1 určit množství rozpuštěného plynu v pivu:

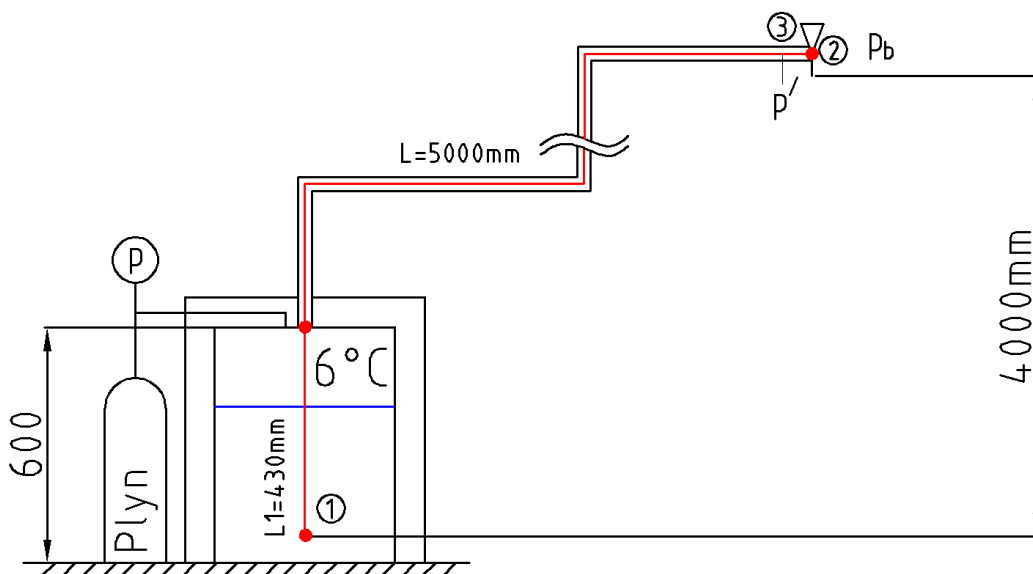
$$10s. \quad x_{CO_2} = 1,54 \cdot p_p + 1,54 = 1,54 \cdot \mathbf{2,29} + 1,54 = 5,06 \frac{g_{CO_2}}{l}$$

$$20s. \quad x_{CO_2} = 1,54 \cdot p_p + 1,54 = 1,54 \cdot \mathbf{0,95} + 1,54 = 3 \frac{g_{CO_2}}{l}$$

Z těchto výsledků je patrné, že v případě, kdy je pivo uloženo v teplém prostředí a syceno přetlakem do 2,3 barů, nehrozí přesycení piva.

Stanovení minimálního tlaku plynu pro objemové chlazení.

Schematicky je případ objemového chlazení zobrazen na Obr. 7.10. Jedná se o méně používané chlazení, které však příznivě ovlivňuje kvalitu piva. Sud je v tomto případě uložený v chladicím boxu a na cestě k výčepu vede izolované pivní potrubí. Minimální přípustný tlak bude podobně jako v předchozím případě úměrný ztrátě systému pro stejné objemové průtoky $5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ a $2,5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Postup výpočtu tlakových ztrát a rychlostí je stejný jako v případě průtočného chlazení. Tento systém chlazení postrádá průtokový chladič, který jinak tvoří významnou tlakovou ztrátu. Systém naopak musí překonat obvykle větší výšku, a větší třecí ztráty v potrubí, jelikož bývá sud uložený ve sklepích a tedy i o několik pater níž než výčepní kohout. Bernoulliho rovnice mezi body 1 a 2 bude mít tvar (7.11).



Obr. 7.11

Schéma chlazení piva v celém objemu

$$\frac{p+p_b}{\rho} + g \cdot h_1 + \frac{u_1^2}{2} = \frac{p_b}{\rho_{6^\circ\text{C}}} + g \cdot h_2 + \frac{u_2^2}{2} + e_{zc} \quad (7.11)$$

Celková tlaková ztráta se určí součtem (7.12):

$$e_{zc} = e_{zvs} + e_{tř1} + e_{zh} + e_{tř2} + e_{zk} + e_{zp} \quad (7.12)$$

Kde:

e_{zvs} – ztráta na vstupu do potrubí

$e_{tř1}$ – třecí ztráta ve vstupním potrubí

e_{zh} – ztráta v narážecí hlavě

$e_{tř2}$ – třecí ztráta v pivním potrubí

e_{zk} – ztráty ve 3 kolenech

e_{zp} – ztráta ve výčepní pípě (uvažujeme plně otevřený kuželový kohout)

a) Pro průtok $5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ jsou jednotlivé ztráty následující:

$$e_{zh} = 7,5 \text{ kPa}$$

$$e_{zp} = 28,64 \text{ kPa}$$

$$e_{zvs} = 3,24 \text{ kPa}$$

$$e_{tř1} = 12 \cdot 10^{-3} \text{ kPa}$$

$$e_{tř2} = 3,62 \text{ kPa}$$

$$e_{zk} = 0,73 \text{ kPa}$$

Dosazením do rovnice (7.11) dostaneme:

$$e_{zc} = e_{zvs} + e_{tř1} + e_{zh} + e_{tř2} + e_{zk} + e_{zp} = 3,24 + 12 \cdot 10^{-3} + 7,5 + 0,73 + 3,62 + 28,64 = 43,84 \text{ kPa} = \frac{40,84 \cdot 10^3}{\rho_{6^\circ\text{C}}} = \frac{40,84 \cdot 10^3}{999} = 43,74 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Následným dosazením a upravením rovnice (7.11) získáme potřebný přetlak:

$$u_2 = \frac{\dot{V}}{S_2} = \frac{\dot{V}}{\frac{\pi \cdot D_2^2}{4}} = \frac{5 \cdot 10^{-5}}{\frac{\pi \cdot (8 \cdot 10^{-3})^2}{4}} = 0,995 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\frac{p+p_B}{\rho} + g \cdot h_1 + \frac{u_1^2}{2} = \frac{p_B}{\rho} + g \cdot h_2 + \frac{u_2^2}{2} + e_{zc} \Rightarrow p = \left(g \cdot h_2 + \frac{u_2^2}{2} + e_{zc} \right) \cdot \rho = \left(9,81 \cdot 4 + \frac{0,995^2}{2} + 43,74 \right) \cdot 999 = 80534 \text{ Pa} = \mathbf{80,5 \text{ kPa} = 0,805 \text{ bar}}$$

b) Pro průtok $2,5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ jsou jednotlivé ztráty následující:

$$e_{zh} = 1,875 \text{ kPa}$$

$$e_{zp} = 22,2 \text{ kPa}$$

$$e_{zvs} = 0,86 \text{ kPa}$$

$$e_{tř1} = 0,006 \text{ kPa}$$

$$e_{tř2} = 0,75 \text{ kPa}$$

$$e_{zk} = 0,621 \text{ kPa}$$

Dosazením do rovnice (7.11) dostaneme:

$$e_{zc} = e_{zvs} + e_{tř1} + e_{zh} + e_{tř2} + e_{zk} + e_{zp} = 0,86 + 6 \cdot 10^{-3} + 1,875 + 0,75 + 0,621 + 22,2 = 26,312 \text{ kPa} = \frac{26,312 \cdot 10^3}{\rho_{6^\circ\text{C}}} = \frac{26,312 \cdot 10^3}{999} = 26,34 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Následným dosazením a upravením rovnice (7.11) získáme potřebný přetlak:

$$u_2 = \frac{\dot{V}}{S_2} = \frac{\dot{V}}{\frac{\pi \cdot D_2^2}{4}} = \frac{2,5 \cdot 10^{-5}}{\frac{\pi \cdot (8 \cdot 10^{-3})^2}{4}} = 0,497 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\frac{p+p_B}{\rho} + g \cdot h_1 + \frac{u_1^2}{2} = \frac{p_B}{\rho} + g \cdot h_2 + \frac{u_2^2}{2} + e_{zc} \Rightarrow p = \left(g \cdot h_2 + \frac{u_2^2}{2} + e_{zc} \right) \cdot \rho = \left(9,81 \cdot 4 + \frac{0,497^2}{2} + 26,34 \right) \cdot 999 = 65637 \text{ Pa} = \mathbf{65,63 \text{ kPa}} = \mathbf{0,656 \text{ bar}}$$

Potřebný přetlak plynu je v případě chlazení sudu v celém objemu **0,805bar** pro načepování piva za 10 sekund a **0,656bar** pro načepování za 20 sekund. Za předpokladu, že je hnací plyn čisté CO₂ lze opět z Obr. 7.1 dopočítat rovnovážné koncentrace pro teplotu 6 °C:

$$10\text{s. } x_{CO_2} = 2,6636 \cdot p_p + 2,6636 = 2,6636 \cdot \mathbf{0,805} + 2,6636 = 4,8 \frac{\text{g}_{CO_2}}{\text{l}}$$

$$20\text{s. } x_{CO_2} = 2,6636 \cdot p_p + 2,6636 = 2,6636 \cdot \mathbf{0,656} + 2,6636 = 4,4 \frac{\text{g}_{CO_2}}{\text{l}}$$

Stanovený přetlak p působí na pivo v celém objemu sudu, respektive je tlak navýšený o hodnotu hydrostatického tlaku piva, který se mění s hloubkou. Jakmile pivo opustí sud, ztrácí však tlak vlivem ztrát, rozdílu výšek a tlaků. Jak bylo zmíněno v kapitole 6, pokles tlaku v potrubí změní vytvořenou koncentrační rovnováhu, což může mít za následek únik plynu. Podle kapitoly 5.4 by měla pěna vznikat až ve výčepním kohoutu. Dle těchto poznatků, by nastavený tlak měl být určen podle toho, aby před výčepním kohoutem byl právě takový, který odpovídá optimální koncentraci CO₂ v pivním sudu. Problém nastává u průtokového chlazení, při kterém mění pivo na trase ze sudu teplotu, která také ovlivňuje rozpustnost. Výpočet tedy provedeme jen u objemového chlazení, které chladí pivo v celém objemu sudu na konstantní teplotu pro průtok $5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Podle Obr. 7.1, je potřebný přetlak plynu p' pro teplotu $6\text{ }^{\circ}\text{C}$ a koncentraci $5\frac{\text{gCO}_2}{\text{l}}$ roven:

$$p' = \frac{x_{\text{CO}_2} - 2,6636}{2,6636} = \frac{5 - 2,6636}{2,6636} = 0,8772\text{bar} = 87,72 \cdot 10^3\text{ Pa}$$

Dle Obr. Obr. 7.11 rozepíšeme Bernoulliho rovnici mezi body 1 a 3:

$$\frac{p + p_b}{\rho} + g \cdot h_1 + \frac{u_1^2}{2} = \frac{p' + p_b}{\rho_{6^{\circ}\text{C}}} + g \cdot h_2 + \frac{u_2^2}{2} + e_{zc} - e_{zp}$$

Po následné úpravě a vyjádření tlaku dostaneme:

$$\begin{aligned} \frac{p + p_b}{\rho} + g \cdot h_1 + \frac{u_1^2}{2} &= \frac{p' + p_b}{\rho} + g \cdot h_2 + \frac{u_2^2}{2} + e_{zc} \Rightarrow p \\ &= \left(g \cdot h_2 + \frac{p'}{\rho} + \frac{u_2^2}{2} + e_{zc} - e_{zp} \right) \cdot \rho \\ &= \left(9,81 \cdot 4 + \frac{87,72 \cdot 10^3}{999} + \frac{0,995^2}{2} + 43,74 - 28,6 \right) \cdot 999 = 142540\text{ Pa} \\ &= 142,5\text{ kPa} = 1,425\text{ bar} \end{aligned}$$

Nastavená hodnota přetlaku by měla být $1,425\text{bar}$, aby byl udrženy tlak před výčepním kohoutem $0,8772\text{bar}$. Nastavením tohoto tlaku zvýšíme objemový průtok piva, který se ale dá regulovat výčepním kohoutem. Přetlaku $1,425\text{ bar}$ a teplotě 6°C odpovídá rovnovážná koncentrace CO_2 $6,4\frac{\text{gCO}_2}{\text{l}}$. Tento tlak by mohl pivo mírně přesytit.

Níže jsou výsledky této kapitoly shrnuty v Tabulka 1

Tabulka 1

Typ chlazení	Teplota piva v sudu [°C]	Průtok [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]	Potřebný přetlak [bar]	Koncentrace CO_2 úměrná teplotě a tlaku [gCO_2/l]
Průtokové	25	$5 \cdot 10^{-5}$	2,29	5,6
		$2,5 \cdot 10^{-5}$	0,95	3
Objemové	6	$5 \cdot 10^{-5}$	0,805	4,8
		$2,5 \cdot 10^{-5}$	0,656	4,4
		$5 \cdot 10^{-5}$ ⁷	1,425	6,4

⁷ Výpočet pro přetlak před výčepním kohoutem $p_p = 0,8772\text{ bar}$

Diskuze k výsledkům této kapitoly

Z výše uvedených hodnot v Tabulka 1 vyplývá několik závěrů.

- a) V případě, že je pivo uloženo v teplém prostředí a je syceno tlakem přes 2 bary, nehrozí silné přesycení nebo exsorpcce CO₂ z piva. Naopak ale může teoreticky dojít k exsorpci CO₂ z piva v případě, kdy je tlak nastavený na minimální hodnoty pro, které jsou překonány ztráty a dochází k pomalému toku piva.
- b) Výpočet nepotvrzuje předchozí teorii, že by v případě objemového chlazení bylo třeba dodat vyšší tlak pro překonání větší ztráty v potrubí a ztrátové výšky. Celkový potřebný tlak je u objemového chlazení piva nižší, především vzhledem k absenci průtokového chladiče. Přesto je i za nižších tlaků pivo syceno na koncentrace přes 4 g_{CO2}/l, vzhledem k nižší teplotě ve které je pivo uloženo. Při zvýšení přetlaku na 2 bary by byla koncentrace rovna 8 g_{CO2}/l, což by mohlo vést k silnému přesycení piva.
- c) **Z předchozích poznatků z této kapitoly a kapitoly 6, lze obecně doporučit: pro chlazení piva průtokovým chladičem za vyšších okolních teplot zvýšit tlak oxidu uhličitého přes 2 bary. Konkrétní hodnota tlaku se dá pro různé teploty určit podle Obr. 9.1 tak, aby byla výsledná hodnota koncentrace rovna $5 \frac{g_{CO_2}}{l}$. Výsledkem bude snížení pěnivosti v potrubí a uchování stejného složení piva.**
- d) **V případě objemového chlazení hrozí nebezpečí přesycení piva při překročení 1 baru přetlaku plynu čistého CO₂. Vyšší tlak 1,425 bar však může potlačit nežádoucí vznik bublinek při průchodu potrubím, redukcemi, narážecí hlavou atd. V tomto případě doporučuji volit jinou směs plynu, která by neměla pivo i za vyšších tlaků přesytit. Například směs oxidu uhličitého a dusíku v poměru 20 % CO₂ : 80 % N₂, která má výrazně nižší koncentraci CO₂ a dle Obr. 7.3 pivo nepřesytí.**

8 Distribuce rozpouštěného CO₂ v sudu

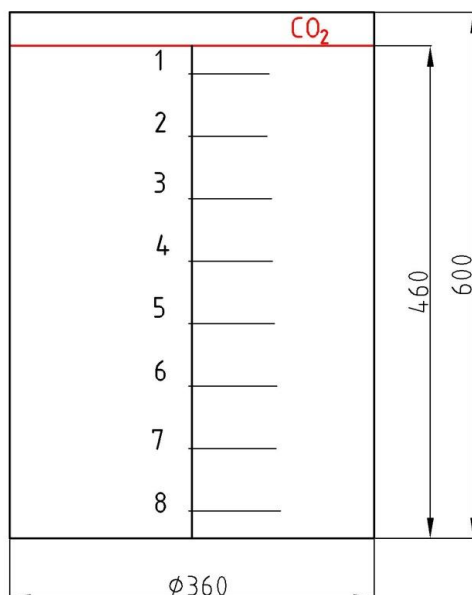
Jak bylo uvedeno v kapitole III, podle literatury[21] a praktických zkušeností je možné v reálném čase pivo přesytit. Otázkou je, za jak dlouho může dojít k případnému přesycení nebo úbytku CO₂, který by výrazněji ovlivnil kvalitu piva. Tím se zabývá tato kapitola a experimentální část této práce.

8.1 Simulace nestacionární difuze CO₂ do piva

Tato kapitola popisuje analytickou a numerickou analýzu výpočtu **nestacionární** difuze oxidu uhličitého do piva. Výsledky simulace byly ověřovány na měřicím zařízení v kapitole 8.4.

a) Analytický výpočet [27]

Řešený případ je schematicky zobrazený je na Obr. 8.1. V sudu je předpokládána počáteční koncentrace CO₂ 4,6g/l stanovená pivovarem, teplota piva 6°C a přetlak nad hladinou $p_{CO_2} = 2,5 \text{ bar}$, který odpovídá rovnovážnému nasycení 9,3g/l. Vrchní velmi tenká vrstva u hladiny je uvažována jako plně nasycena oxidem uhličitým. Dále uvažují řešení případu v poloomezeném tělese. Výška hladiny plného sudu je 460mm. Níže je uveden příklad výpočtu pro místo vzdálené 7mm od hladiny v čase $t = 5 \text{ hod}$. Je důležité stanovit koncentraci CO₂ na dně sudu, vzhledem k tomu, že je pivo ze dna odebíráno (Obr. 5.2)



Obr. 8.1

Schéma sudu naplněného pivem, s vrchní nasycenou vrstvou CO₂

Předpoklady výpočet jsou:

- nulová přirozená nebo nucená konvekce.
- poloomezený prostor.
- počáteční podmínky:
 1. V čase $t = 0$ je velmi malá vrstva piva na hladině plně nasycena oxidem uhličitým na koncentraci 9,3g/l.
 2. V čase $t = 0$ je všude jinde koncentrace $\text{CO}_2 = 4,6$ g/l.

Nestacionární analytické řešení difuze [27].

Rovnice přenosu hmoty vyjadřuje vztah má tvar (8.1):

$$\frac{\partial c_A}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{N}_A - R_A = 0^8 \quad (8.1)$$

Kde:

\vec{N}_A - hustota difúzního toku složky A $\left[\frac{\text{kmol}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}\right]$

R_A - rychlost vzniku složky $\left[\frac{\text{kmol}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}\right]$

$\frac{\partial c_A}{\partial t}$ - změna koncentrace složky A závislá na čase

Neuvažujeme-li v rovnici (8.1) konvektivní člen a člen R_A vyjadřující vznik složky A dostaneme rovnici (8.2)

$$\frac{\partial c_A}{\partial t} = D_{AB} \nabla^2 c_A \quad (8.2)$$

$D_{AB} \left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}}\right]$ - je difúzní součinitel složky A v kapalině, který je závislý na teplotě a typu difúzního prostředí. Pro difúzi CO_2 ve vodě jej lze najít v literatuře. Difúzní součinitel pro difúzi CO_2 do vody při teplotě tepotu 6°C je dle [25] následující:

$$D = 2.35 \cdot 10^{-6} \exp\left(\frac{-2119}{T}\right) = 2.35 \cdot 10^{-6} \exp\left(\frac{-2119}{6 + 273.15}\right) = 1.182 \cdot 10^{-9} \left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}}\right]^9$$

Nestacionární difuze v poloomezeném tělese se řeší za předpokladu platnosti rovnice (8.2) s následujícími okrajovými podmínkami:

$$P. P. 0 \leq x \leq \infty; c_A = c_{A0}; t \leq 0$$

⁸ Indexy A = CO_2

⁹ Podle předchozích závěrů je difúzní součinitel uvažován stejný pro pivo jako pro vodu

$$\text{O.P.1 } x = 0; c_A = c_{AS}; t > 0$$

$$\text{O.P.2 } x \rightarrow \infty; c_A = c_{A0}; t > 0$$

Na počátku je v poloomezeném tělese všude stejná koncentrace c_{A0} , která se skokově změní v čase $t = 0$ na hodnotu c_{AS} . Po zavedení bezrozměrné koncentrace c_A^* (8.3) je řešením koncentrační profil, který je popsán rovnicí (8.4).

$$c_A^* = \frac{c_{AS} - c_A}{c_{AS} - c_{A0}} \quad (8.3)$$

$$c_A^* = \text{erf}(\eta) \quad (8.4)$$

kde :

$$\eta = \frac{x}{\sqrt{4D_{AB}t}}$$

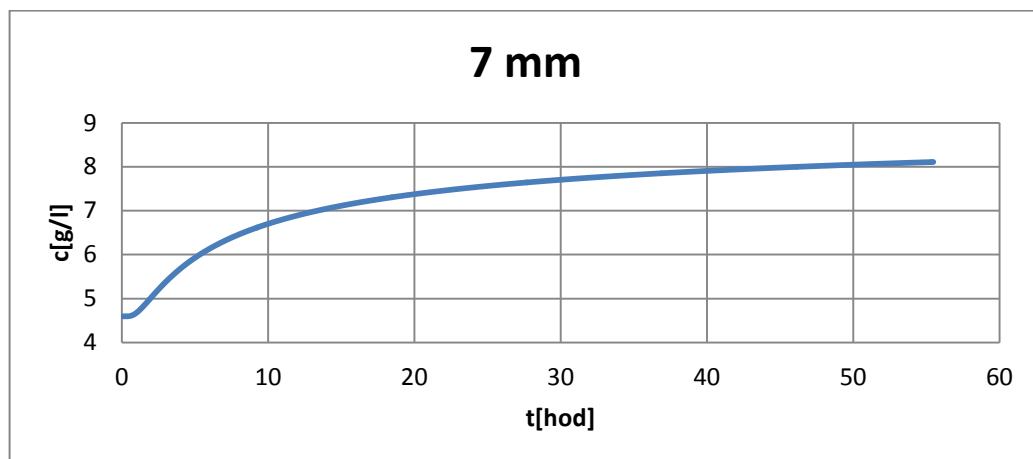
Př.: $t = 5\text{hod}$, $c_{A0} = 4,6\text{g/l}$, $x = 0,007\text{m}$

$$\eta = \frac{x}{\sqrt{4D_{AB}t}} = \eta = \frac{0,007}{\sqrt{4 \cdot 1.18210^{-95} \cdot 3600}} = 0.759$$

$$c_A^* = \text{erf}(\eta) = \text{erf}(0.759) = 0.7169$$

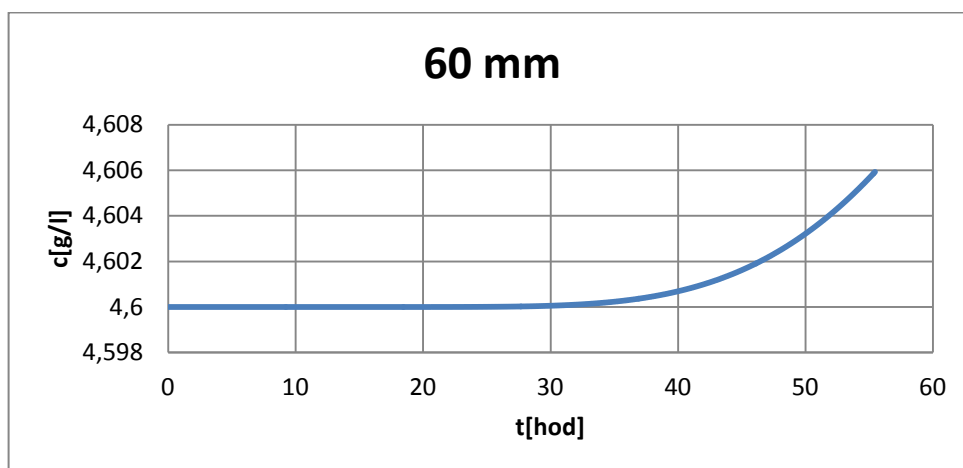
$$c_A^* = \frac{c_{AS} - c_A}{c_{AS} - c_{A0}} \Rightarrow c_A = c_{AS} - c_A^* \cdot (c_{AS} - c_{A0}) = 9,3 - 0.759 \cdot (9,3 - 4,6) = 5,73\text{g/l}$$

Výpočet byl následně provedený pro ostatní body do maximálního času 55hodin odpovídající více než 2 dnům, tedy času, za který by dle předpokladů mohlo dojít k přesycení. Grafické znázornění jsou zobrazeny níže pro místa, ve kterých je průběh růstu koncentrace zajímavý. Pro body ve vzdálenosti 7 mm, 60 mm a 460 mm jsou křivky vyobrazeny na Obr. 8.2, Obr. 8.3. a Obr. 8.4.



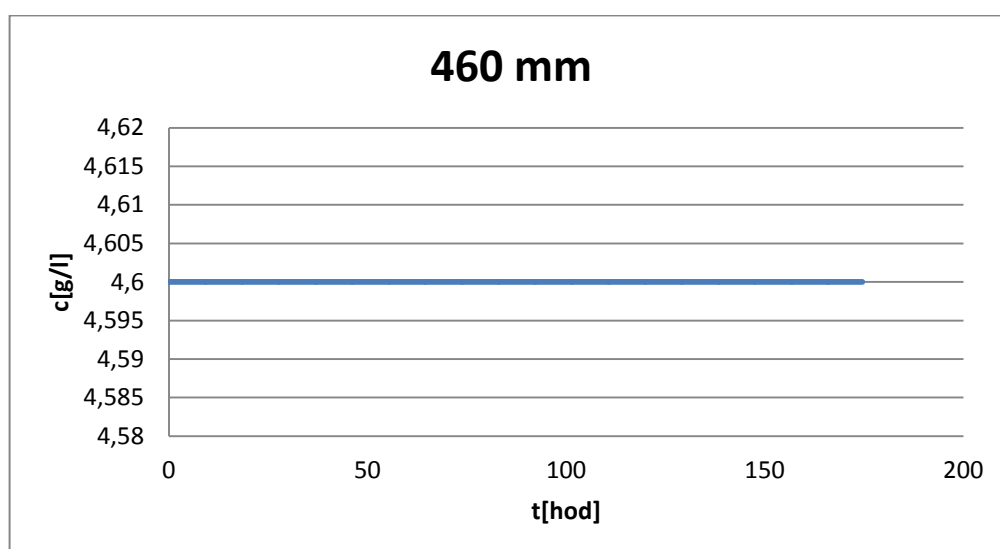
Obr. 8.2

Grafické znázornění nárůstu koncentrace v čase pro bod vzdálený od hladiny 7mm



Obr. 8.3

Grafické znázornění nárůstu koncentrace v čase pro bod vzdálený od hladiny 60 mm



Obr. 8.4

Grafické znázornění nárůstu koncentrace v čase pro bod vzdálený od hladiny 460 mm, tedy na dně sudu.

Koncentrace s časem dle předpokladů roste, ale jen velmi pomalu. Koncentrace v bodu vzdáleném od hladiny 60mm se nenavýšila za 55 hodin ani o jednu setinu. V hloubce 200 mm se lehký nárůst projevil až za 75hodin a v hloubce 460mm se nárůst koncentrace neprojevil vůbec. **Výpočet byl dále ověřen numerickou metodou popsanou níže.**

b) Numerická metoda [26]

Numerická metoda je analýza systémů zahrnující tok tekutin, hmoty a přenos tepla současně s jevy, jako je například chemická reakce, **prostředky počítačové simulace**. Tato velmi účinná technika je používána v mnoha aplikacích. [26]

Náš případ je stejný jako u analytické metody. Sud je rozdělený na 8 kontrolních bodů, ve kterých bude dopočítávána koncentrace v čase. Toto rozložení odpovídá rozložení odběrných míst experimentálního zařízení, které je popsáno v dalších kapitolách.

Předpoklady výpočtu jsou stejné jako u analytické metody:

- nulová přirozená nebo nucená konvekce.
- poloomezeným prostor.
- počáteční podmínky:
 1. v čase $t=0$ je velmi malá vrstva piva na hladině plně nasycena oxidem uhličitým na koncentraci 9,3g/l
 2. v čase $t=0$ je všude jinde koncentrace $\text{CO}_2=4,6$ g/l

Při použití numerické metody je dále nutné zvolit si prostor, ve kterém bude problém vyšetřován, a počet bodů, které budou dopočítávány, což vytvoří takzvanou síť bodů. Náš případ omezíme na 1D a počet bodů určíme později podle oblasti, kterou budeme vyšetřovat. Pro jednoduchost vysvětlení metody budeme nejprve uvažovat případ o 5ti to bodech (Obr. 8.5). Podstatou celého výpočtu je nahrazení parciálních derivací velmi malým intervalem, soustředěným kolem kontrolního bodu P , který je dopočítán pomocí sousedních bodů E (east side), W (west side), ty jsou dopočítány pomocí svých sousedních bodů a dál až k počátečním okrajovým podmínkám.

Vycházíme z úplné Navier- Stokesovy rovnice, která má tvar (8.5):

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho\phi\mathbf{u}) = \text{div}(\Gamma\text{grad}\phi) + S_\phi \quad (8.5)$$

akumulace + konvekce = kondukce + zdroj

Kde:

ϕ - obecná proměnná (teplota, koncentrace, rychlost...)

Γ - difúzní/ kondukční koeficient

Případ předpokládá nulovou konvekci a žádný zdroj. Následně přechází rovnice (8.5) do tvaru (8.6):

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} = \text{div}(\Gamma \text{grad}\phi) \quad (8.6)$$

Postupně lze pomocí matematických úprav (popsaných v [25]) a dosazením za ϕ a Γ dostat rovnici (8.6) do tvaru (8.7)

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial c}{\partial x} \right) \quad (8.7)$$

Kde:

$c \left[\frac{g}{l}, \frac{mol}{m^3}, \% \dots \right]$ je koncentrace CO_2

Integrací rovnice (8.3) přes kontrolní objem (control volume CV) a čas a nahrazením první parciální derivace na pravé straně rozdílem hodnot na straně *east* a *west* dostáváme:

$$\int_t^{t+\Delta t} \int_{CV} \frac{\partial c}{\partial t} dV dt = \int_t^{t+\Delta t} \int_{CV} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial c}{\partial x} \right) dV dt \right] \quad (8.8)$$

$$\int_w^e \left[\int_t^{t+\Delta t} \frac{\partial c}{\partial t} dt \right] dV = \int_t^{t+\Delta t} \left[\left(DA \frac{\partial c}{\partial x} \right)_e - \left(DA \frac{\partial c}{\partial x} \right)_w \right] dt \quad (8.9)$$

Kde A je čelní plocha kontrolního objemu ΔV , který je roven $A\Delta x$, kde $\Delta x = \delta x_{we}$ je délka kontrolního objemu. V případě, že předpokládáme konstantní koncentraci v kontrolním objemu kolem bodu P , levá strana poslední rovnice může být přepsaná jako:

$$\int_{CV} \left[\int_t^{t+\Delta t} \frac{\partial c}{\partial t} dt \right] dV = \frac{(C_p - C_p^0)\Delta V}{\Delta t} \quad (8.10)$$

Kde index C_p^0 vyjadřuje koncentraci v čase t a C_p koncentraci v čase $t+\Delta t$. V případě, že uvažujeme konstantní plochu A , konstantního součinitele D a užitím explicitního schématu dostaneme:

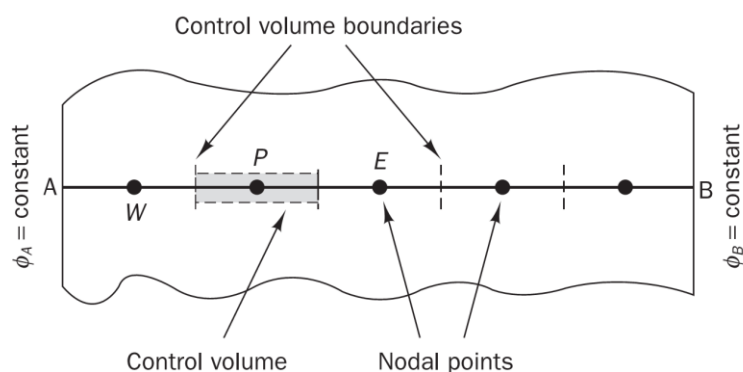
$$\frac{(C_p - C_p^0)}{\Delta t} \Delta x = D \frac{C_E^0 - C_P^0}{\delta x_{PE}} - D \frac{C_P^0 - C_W^0}{\delta x_{WP}} \quad (8.11)$$

Nyní je možné vyjádřit požadovanou koncentraci C_p . Vzhledem k tomu, že rovnice budou jiné pro body "uprostřed" a krajní body, je vhodné zavést parametry ap , aw , ae a aa , které zjednoduší orientaci. Dále zavádíme proměnnou hodnotu S_A a S_B , které vyjadřují počáteční koncentrace krajních bodů a za δx_{PE} , δx_{WP} dosazujeme Δx . Obecně bude mít rovnice tvar:

$$C_p = \frac{ae \cdot C_E^0 + aw \cdot C_W^0 + (ap - aw - ae - aa) \cdot C_p^0 + aa \cdot S_A}{ap} \quad (8.12)$$

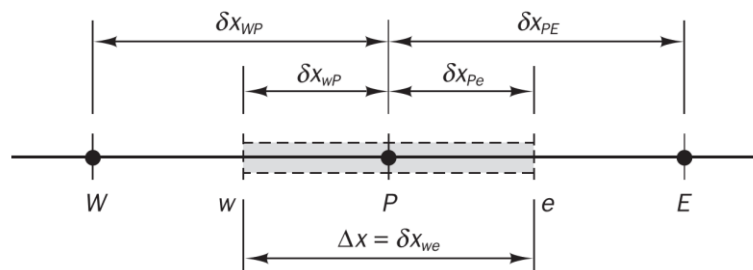
BOD	aw	ae	S_A	aa	ap
1 (krajní)	0	$\frac{D}{\Delta x}$	C_A	$\frac{2D}{\Delta x}$	$\frac{\Delta x}{\Delta t}$
2;3;4	$\frac{D}{\Delta x}$	$\frac{D}{\Delta x}$	0	0	$\frac{\Delta x}{\Delta t}$
5 (krajní)	$\frac{D}{\Delta x}$	0	C_B	$\frac{2D}{\Delta x}$	$\frac{\Delta x}{\Delta t}$

V případě našeho výpočtu prochází plyn od hladiny ke dnu sudu dráhou dlouhou 460 mm. Aby bylo možné použít předchozí vztahy, derivace musí být nahrazeny velmi malou hodnotou, za Δx dosazujeme 0,5 mm z čehož vychází 920 bodů, pro které je v určitém čase dopočítávaná koncentrace. Časový interval Δt je zvolen na 1 sekundu. Volba těchto "malých hodnot" nahrazujících parciální derivace výrazně ovlivňuje celý výpočet. Při volbě větších intervalů (například $x = 5 \text{ mm}$, $t = 5 \text{ s}$) by nebyl výpočet přesný.



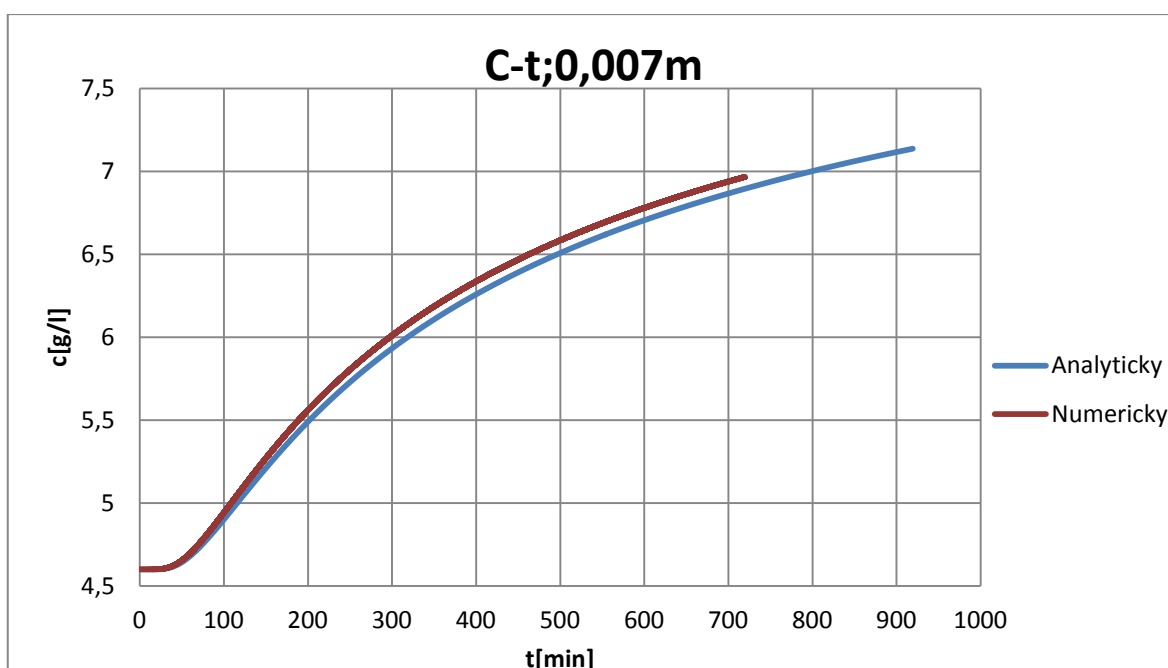
Obr. 8.5

Zjednodušené 1D schéma výpočtu [26]



Obr. 8.6

Stanovení kontrolního objemu kolem bodu P [26]



Obr. 8.7

Porovnání numerické a analytické metody difuze CO₂ do piva, bod 7mm pod hladinou

Na Obr. 8.7 je zobrazené porovnání analytické a numerické metody výpočtu nestacionární difuze pro bod 7 mm pod hladinou. Křivky mají jen minimální odchylku, která je způsobena volbou kroku Δx a časovým intervalem Δt .

Dle těchto výsledků by teoreticky nebylo možné v reálném čase sud přesytit. Z praxe a dle článku [21] je možné sud přesytit tak, aby došlo k ovlivnění chování a chuti piva. **Jako možné vysvětlení může být vliv konvektivního přenosu hmoty, který nebyl**

ve výpočtech předpokládán. Dále se tato publikace zabývá experimentálním měřením prostupu CO₂ v čase v pivním sudu.

8.2 Měření koncentrace rozpuštěného CO₂

Nezbytnou součástí experimentálního vyhodnocení kinetiky sycení je měření oxidu uhličitého. Vzhledem k finanční náročnosti měřících zařízení oxidu uhličitého, je dále v této kapitole navržen a sestaven přístroj umožňující měřit koncentraci rozpuštěného CO₂ v kapalině.

8.2.1 Měření koncentrace CO₂ v pivu dle pH

V kapitole 4.1 je popsáno měření koncentrace CO₂ dle hodnot pH. V níže uvedeném experimentu jsem ověřil aplikaci této metody na pivo.

Přístroj na měření pH *Acidmeter 333* byl nejprve kalibrován na teplotu 10 °C dvoubodovou kalibrací kalibračními roztoky. Následně proběhlo měření kohoutkové vody o teplotě 10 °C s výsledkem **pH = 8,06**, poté byla ta samá voda sycena oxidem uhličitým pomocí přístroje *SodaStream* a opět proběhlo měření - **pH = 5,08**. Patrný pokles pH je v souladu s předchozími předpoklady. Dále se měřily dva vzorky piva načepované ze stejného sudu. Vzorek č. 1 byl opatrně načepovaný, aby nedošlo k významnému úniku CO₂. Ze vzorku číslo 2 byl naopak takřka všechen CO₂ násilně exsorbován vytřepáváním viz Obr. 8.8, na kterém lze vidět rozdíl koncentrací CO₂ v podobě množství stoupajících bublinek u vzorku č.1. Výsledkem měření jsou koncentrace **pH₁ = 4,98 a pH₂ = 5,03**. Takřka totožné hodnoty opět potvrzují předpoklady, dle kterých se pivo chová jako pufr. Tato metoda je pro měření koncentrace CO₂ pomocí pH **zcela nevhodná**. Pro měření koncentrace CO₂ je nutné volit jinou metodu měření.

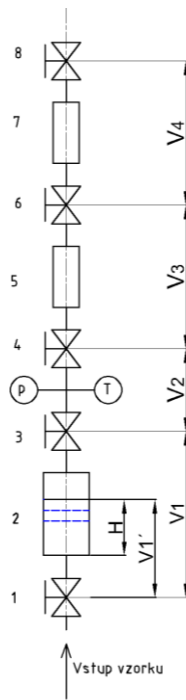


Obr. 8.8

Měření pH u 2 vzorků piv o rozdílné koncentraci CO_2 (vzorek č. 1 vlevo, č. 2 vpravo)

8.2.2 Návrh manometrického přístroje a zkušební měření.

V kapitole 4 jsou popsány nejběžnější metody měření rozpuštěných plynů v pivo. Komerční zařízení jsou velmi nákladná, jejich cena může dosáhnout až několika set tisíc korun. V této práci byl z toho důvodu navržen a sestaven přístroj (schéma zobrazené na Obr. 8.9), umožňující měřit množství CO_2 rozpuštěného v pivo pracující na principu mechanického vytřepání CO_2 (viz kapitole 4, manometrické metody). Přesnost přístroje byla následně ověřena porovnáním výsledků měření, které se uskutečnilo na přístroji *CarboQC* v pivovaru Kácov.



Obr. 8.9

Schéma měřicího zařízení

Popis zařízení a přípravná měření

Podle Obr. 8.9 je zařízení složené z: průhledné vzorkovací části, do které je odebrán vzorek (2), měřicího kříže, ve kterém se měří teplota bimetalovým teploměrem a tlak analogickým manometrem *WIKA*, a dvou dutých válců (5, 7). Jednotlivé části oddělují kulové kohouty, které jsou namontované také na vstupu a výstupu ze zařízení (1, 3, 4, 6, 8).

Před samotným měřením a vyhodnocením výsledků bylo nutné nejprve změřit objemy jednotlivých částí přístroje a provést tlakovou zkoušku do přetlaku 300 kPa, což odpovídá maximálnímu provoznímu přetlaku pivních sudů.

Konkrétně dle Obr. 8.9 se jedná o objemy V_1, V_2, V_3, V_4 a objem V_1' , který je proměnný a závisí na množství odebraného vzorku. Objemy byly určeny nepřímou, dopočtem z hustoty a hmotnosti vody zaplňující jednotlivé části.

Přístroj byl ve vertikální poloze napojený přes kohout 1 na zdroj pitné vody a byl plně zaplněný vodou, přičemž všechny kohouty byly otevřené. Jakmile začala voda vytékat

přes poslední kohout 8, uzavřel se přívod vody a kohouty 1 a 8. Následným vytřepáním se zařízení odvzdušnilo, opět se zařízení zcela zaplnilo vodou a uzavřely se kohouty 1 až 8. Jednotlivé objemy vody se postupně vyprazdňovaly do kádinky, která byla předem zvážená na digitální váze s přesností na desetiny gramu $m_k = 110,5 \text{ g}$. Měření jednotlivých částí se provedlo vždy 4 x. Objem V_1' se měřil podobným způsobem, přičemž se zaplavila jen část průhledítka a vždy se změřila výška hladiny h . Měření se opakovalo pro několik objemů, respektive výšek. V Tabulka 2 jsou vypsány naměřené hodnoty.

Tabulka 2

Naměřené hmotnosti vody pro jednotlivé části měřícího zařízení

	V_1	V_2	V_3	V_4	V_1'	
	m [g]	m [g]	m [g]	m [g]	m [g]	h [mm]
1	278,3	173,7	173,3	173,9	395,5	28,8
2	278,9	174	174,2	174,1	384,8	39,5
3	279,2	173,5	174,3	173,5	358,8	69,9
4	279,1	173,3	174,1	173,9	-	-
Průměr	278,875	173,625	173,975	173,85	-	-

Po celou dobu měření zůstala teplota vody na konstantní hodnotě $22 \text{ }^\circ\text{C}$, čemuž odpovídá hustota vody $\rho_{22^\circ\text{C}} = 997,77 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. [29]

Objem se poté stanoví z hustoty a hmotnosti vody. Níže je uveden příklad výpočtu pro objem V_1 :

$$\rho = \frac{m - m_k}{V_1} \Rightarrow V_1 = \frac{m - m_k}{\rho} = \frac{(278,875 - 110,5) \cdot 10^{-3}}{997,77} = 1,68 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 = 168 \text{ ml}$$

Ostatní výsledky jsou vypsány v Tabulka 3 a Tabulka 4

Tabulka 3

Objemy jednotlivých částí měřícího zařízení

$V_1 [\text{m}^3]$	$V_2 [\text{m}^3]$	$V_3 [\text{m}^3]$	$V_4 [\text{m}^3]$
0,0001684	0,0000631	0,0000635	0,0000634

Tabulka 4

Cejchování objemů průhledítka včetně kohoutu

V_1'	
V_1' [m ³]	h[mm]
0,0000733	28,8
0,0000840	39,5
0,0001100	69,9

Dle cejchování průhledítka lze objem popsat lineární funkcí:

$$V_1' = 9 \cdot 10^{-7} \cdot h + 5 \cdot 10^{-5} \quad (8.13)$$

Kde:

h je dle Obr. 8.9 výška vzorkovací části [mm]

V_1' objem vzorku [m³]

Tlaková zkouška byla provedena připojením zařízení na redukční ventil, redukcující tlak ve zdroj pitné vody. Na redukčním ventilu se nastavil tlak 3 bary. Kohouty (1,3,4,6) byly otevřené a kohout 8 zůstal zavřený. Na manometru ze zařízení byla odečtena hodnota 3 bary.

Popis měření

Před měřením jsou všechny kohouty uzavřené a zařízení je prázdné, pouze zaplněné vzduchem o teplotě t_{vz} , která se odečte na teploměru. Zařízení se připojí přes hadičku a vhodnou spojku (rychlospojky Festo, hadičník...) k nádrži se vzorkem. Otevřením kohoutu 1 se zaplaví průhledítka přibližně do jedné poloviny své výšky. Kohout 1 je opět uzavřen a výška hladiny se přesně změří posuvným měřítkem. Následně se otevře kohout 3, který propojuje první část s měřicím křížem a začne se vytřepávat CO₂. Vytřepává se až do té doby, než se ustálí rostoucí tlak na manometru a jeho hodnota se zaznamená. Nyní se otevře kohout 4, který připojí měřicí objem 5, opakuje se vytřepávání a opět se zaznamená tlak, který poklesl vlivem zvětšení objemu. V poslední fázi se otevře kohout 6, ze vzorku se vytřepe zbývající CO₂ a zaznamená se tlak a teplota piva t_p . Před dalším měřením je vzorek vypuštěn kohoutem 1 a měření se opakuje. V další části práce je popsáno vyhodnocení obsahu CO₂ z naměřených tlaků a teplot.

Porovnání výsledků měření obsahu CO₂ se snímačem *CarboQC*, *Anton Paar*.

Přesnost měření byla nejprve ověřována na vzorku nefiltrovaného piva 12°C v pivovaru Kácov, odebraného z ležáckého tanku. Souběžně proběhlo měření stejného piva komerčním přístrojem *CarboQC*, *Anton Paar* s výslednou koncentrací **4,09 gCO₂/l**. Měření s navrženým přístrojem proběhlo 3 x. Změřené hodnoty jsou zapsány v Tabulka 5 a následně je uveden příklad stanovení koncentrace CO₂ z naměřených hodnot.

Tabulka 5

Naměřené hodnoty, pivo nefiltrované 12° Kácov

Č.	tvz [°C]	tp [°C]	h[mm]	p1 [bar]	p2[bar]	p3[bar]
1	10	7,6	38	0,72	0,6	0,5
2	8	7,6	47	0,92	0,7	0,55
3	8	7,6	35,5	0,88	0,7	0,58

Příklad stanovení koncentrace CO₂

Příklad výpočtu je proveden pro měření č. 1. Obsah CO₂ ve vzorku piva se stanovuje z rovnováhy koncentrací, která nastane mezi kapalinou a plynem po násilném vytřepání oxidu uhličitého. Ke každému odebranému vzorku jsou dopočítány 3 koncentrace CO₂ stanovené postupně otevíráním jednotlivých ventilů, které vytváří 3 měřicí části. **První**, kterou tvoří objemy $V_1 + V_2$, **druhá** která je složená z objemů $V_1 + V_2 + V_3$, a **třetí** část, která vznikne propojením všech objemů $V_1 + V_2 + V_3 + V_4$. Takto řešená konstrukce má výhodu ve zpřesnění výpočtu jednoho vzorku, jelikož by se stanovené tři koncentrace CO₂ měly rovnat. Výsledek je vždy aritmetický průměr těchto tří hodnot.

Před odebráním vzorku jsou všechny části naplněny vzduchem o teplotě t_{vz} a atmosférickém tlaku $p_b[kPa]$. Nejprve se provede výpočet látkového množství vzduchu v jednotlivých částích. Ze stavové rovnice pro ideální plyn vychází:

$$n_1 = \frac{pb \cdot (V_1 + V_2)}{R \cdot T_{vz}} = \frac{101,325 \cdot (0,0001684 + 0,0000631)}{8,314 \cdot (10 + 273,15)} = 9,96 \cdot 10^{-6} kmol$$

$$n_2 = \frac{pb \cdot (V_1 + V_2 + V_3)}{R \cdot T_{vz}} = \frac{101,325 \cdot (0,0001684 + 0,0000631 + 0,0000635)}{8,314 \cdot (10 + 273,15)} \\ = 1,271 \cdot 10^{-5} kmol$$

$$\begin{aligned}
 n_3 &= \frac{pb \cdot (V_1 + V_2 + V_3 + V_4)}{R \cdot T_{vz}} \\
 &= \frac{101,325 \cdot (0,0001684 + 0,0000631 + 0,0000635 + 0,0000634)}{8,314 \cdot (10 + 273,15)} \\
 &= 1,543 \cdot 10^{-5} \text{ kmol}
 \end{aligned}$$

Kde:

R - univerzální plynová konstanta = $8.314 \text{ [kJ} \cdot \text{kmol}^{-1}\text{K}^{-1}]$

T_{vz} – termodynamická teplota vzduchu [K]

n_i - molové množství jednotlivých částí [kmol]

Předpokládám, že je vzduch obsahuje kyslík, dusík a vodní páry. Jednotlivé molové množství se stanoví následně:

$$n_{1H_2O} = \frac{p''_{H_2O} \cdot (V_1 + V_2)}{R \cdot T_{vz}} = \frac{1,2 \cdot (0,0001684 + 0,0000631)}{8,314 \cdot (10 + 273,15)} = 1,181 \cdot 10^{-7} \text{ kmol}$$

Kde p''_{H_2O} je parciální tlak syté vodní páry ve vzduchu pro teplotu $10 \text{ }^\circ\text{C}^{10}$

Analogicky se stanoví molové množství vodní páry v druhé, resp. třetí části:

$$n_{2H_2O} = 1,504 \cdot 10^{-7} \text{ kmol}$$

$$n_{3H_2O} = 1,827 \cdot 10^{-7} \text{ kmol}$$

Koncentrace kyslíku je ve vzduchu 21 %, vztaženo na suchý plyn. Molové množství kyslíku se stanoví následovně:

$$n_{1O_2} = (n_1 - n_{1H_2O}) \cdot 0,21 = (9,96 \cdot 10^{-6} - 1,181 \cdot 10^{-7}) \cdot 0,21 = 2,07 \cdot 10^{-6} \text{ kmol}$$

$$n_{2O_2} = 2,636 \cdot 10^{-6} \text{ kmol}$$

$$n_{3O_2} = 3,202 \cdot 10^{-6} \text{ kmol}$$

A molové množství dusíku je pak stanovené z molové koncentrace y :

$$y_1 = 1 = y_{1O_2} + y_{1H_2O} + y_{1N_2} \Rightarrow y_{1N_2} = 1 - y_{1O_2} - y_{1H_2O}$$

¹⁰ Je uvažována 100% vlhkost vzduchu

$$y_{1O_2} = \frac{n_{1O_2}}{n_1} = \frac{2,07 \cdot 10^{-6}}{9,96 \cdot 10^{-6}} = 0,207$$

$$y_{1H_2O} = \frac{n_{1H_2O}}{n_1} = \frac{1,181 \cdot 10^{-7}}{9,96 \cdot 10^{-6}} = 0,0118$$

$$y_{1N_2} = 1 - 0,207 - 0,0118 = 0,781$$

$$n_{1N_2} = n_1 \cdot y_{1N_2} = 9,96 \cdot 10^{-6} \cdot 0,781 = 7,784 \cdot 10^{-6} \text{ kmol}$$

$$n_{2N_2} = 9,919 \cdot 10^{-6} \text{ kmol}$$

$$n_{3N_2} = 1,205 \cdot 10^{-5} \text{ kmol}$$

Po prvním vytřepání se uvolní určité molové množství CO_2 do objemu, čímž se zvýší tlak a zmenší se objem o odebraný vzorek. Nyní vypočítáme nové celkové molové množství pro část 1.

$$\begin{aligned} n_1' &= \frac{(p_1 + pb) \cdot (V_1 + V_2 - V_1')}{R \cdot T_{vz}} \\ &= \frac{(72 + 101,325) \cdot (0,0001684 + 0,0000631 - 9,23 \cdot 10^{-5})}{8,314 \cdot (10 + 273,15)} \\ &= 1,144 \cdot 10^{-5} \text{ kmol} \end{aligned}$$

$$V_1' = 9 \cdot 10^{-7} \cdot h + 5 \cdot 10^{-5} = 9 \cdot 10^{-7} \cdot 38 + 5 \cdot 10^{-5} = 9,23 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$$

Nyní lze vypočítat počet molů CO_2 uniklých při vytřepávání jako:

$$\begin{aligned} n_1' &= n_{1H_2O} + n_{1O_2} + n_{1N_2} + n_{1CO_2} \Rightarrow n_{1CO_2} = n_1' - (n_{1H_2O} + n_{1O_2} + n_{1N_2}) \\ &= 1,144 \cdot 10^{-5} - (1,181 \cdot 10^{-7} + 2,07 \cdot 10^{-6} + 7,784 \cdot 10^{-6}) \\ &= 1,47 \cdot 10^{-6} \text{ kmol} \end{aligned}$$

Koncentrace uniklého CO_2 v plynu je poté:

$$y_{1CO_2} = \frac{n_{1CO_2}}{n_1'} = \frac{1,47 \cdot 10^{-6}}{1,144 \cdot 10^{-5}} = 0,128$$

Spojením rovnic 5.1 a 5.2 dostaneme koncentraci CO_2 ve vzorku po vytřepání.

$$x_{1CO_2} = y_{1CO_2} \cdot (p_1 + pb) \cdot H = 0,128 \cdot (72 + 101,325) \cdot 0,0577 = 0,0143 \text{ mol} \cdot \text{kg}^{-1}$$

a Henryho konstanta se dle rovnice (5.4) pro teplotu vzorku $7,6^\circ\text{C}$ rovná:

$$H = 0,0577 \left[\frac{\text{mol}}{\frac{\text{kg}}{\text{bar}}} \right]$$

Hledanou počáteční koncentraci x_{0CO_2} ve vzorku stanovíme jako:

$$\begin{aligned} n'_1 &= (x_{vz1CO_2} - x_{1CO_2}) \cdot m'_1 \Rightarrow x_{vz1CO_2} = \frac{n'_1 + x_{1CO_2} \cdot V'_1 \cdot \rho}{V'_1 \cdot \rho} \\ &= \frac{1,47 \cdot 10^{-3} + 0,0143 \cdot 9,23 \cdot 10^{-5} \cdot 999}{9,23 \cdot 10^{-5} \cdot 999} = 3,03 \cdot 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{kg}^{-1} \\ &\Rightarrow 3,03 \cdot 10^{-2} \cdot M_{CO_2} = 3,03 \cdot 10^{-2} \cdot 44 = 1,33 \text{ g}_{CO_2} \cdot \text{kg}^{-1} \\ &\cong \mathbf{1,33 \text{ g}_{CO_2} \cdot l^{-1}} \end{aligned}$$

Je důležité dosazovat ve správných jednotkách, objem vzorku V'_1 proto vyjádříme jako hmotnost m'_1 přes hustotu, která má pro teplotu 7,6 °C hodnotu 999 kg · m⁻³

Další části byly vypočítány analogicky:

$$x_{vz2CO_2} = \mathbf{1,58 \text{ g}_{CO_2} \cdot l^{-1}}$$

$$x_{vz3CO_2} = \mathbf{1,57 \text{ g}_{CO_2} \cdot l^{-1}}$$

$$\text{Průměrná hodnota je poté } x_{vz} = \frac{x_{vz1CO_2} + x_{vz2CO_2} + x_{vz3CO_2}}{3} = \frac{1,33 + 1,58 + 1,57}{3} = \mathbf{1,49 \text{ g}_{CO_2} \cdot l^{-1}}$$

Tato stanovená koncentrace se liší o několik jednotek od hodnoty stanovené přístrojem CarboQC 4,09 g_{CO2}/l. V další části vyhodnocení proběhla úprava zařízení a měřicího postupu, aby bylo měření přesnější.

Zpřesnění měření

Přesnost změřeného tlaku signifikantně ovlivňuje výsledek měření. Z toho důvodu byl nahrazen analogický manometr digitálním tlakovým čidlem Festo SPAB, který velmi rychle reaguje na změny tlaku a měří přetlak s přesností 0,01 bar (Obr. 8.10) . Vzhledem k výměně manometru bylo nutné znovu změřit objem V_2 , který se zvětšil na hodnotu $V_2 = 6,42 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$



Obr. 8.10

Upravené měřicí zařízení

Dále byl upraven postup měření. Konkrétně měření objemu odebraného vzorku V_1' . Předchozí metoda měření výšky hladiny se ukázala jako nevhodná, jelikož po odebrání vzorku se nad hladinou vytvořila pěna, které se velice pomalu rozpadala. Bylo tedy obtížné stanovit tuto výšku. Postup jsem modifikoval takto: vypustit po měření vzorek do připraveného odměrného válce, ve kterém se pěna během několika minut rozpadne, poté se odečte objem. Přístroj může být přitom ihned použit k dalšímu měření.

Při opětovném měření může nastat chyba, vyvolaná zbytkovou koncentrací oxidu uhličitého v přístroji. Pro další měření je doporučeno napojit celé zařízení na zdroj pitné vody a plně zaplavit vodou, následně odpojit, vypustit vodu což má za následek nasání čistého vzduchu.

V poslední řadě doporučuji před měřením externě změřit teplotu vzorku, jelikož je teploměr se vzorkem v zařízení jen krátkou dobu v kontaktu reaguje velmi pomalu.

Opakované měření dle výše zmíněných úprav a doporučení

Opakované kontrolní měření bylo provedeno ze speciálně upraveného sudu (viz. kapitolu 8.3), do kterého bylo v pivovaru Kácov stočené nefiltrované 12ti stupňové pivo. Tato várka piva měla stanovenou koncentraci CO_2 opět v laboratoři pivovaru Kácov, přístrojem *CarboQC*, s výslednou hodnotou $4,91 \text{ gCO}_2/\text{l}$.

V Tabulka 6 jsou vypsané změřené hodnoty navrženým přístrojem včetně výsledků, které se vyhodnotily analogicky jako dříve v této kapitole. Měření proběhlo u stejného vzorku 2 x.

Tabulka 6*Naměřené a vyhodnocené výsledky druhého kontrolního měření*

Naměřené hodnoty							Hledané koncentrace			Průměr
	tvz [°C]	t [°C]	V _L [ml]	p1 [bar]	p2[bar]	p3[bar]	XCO ₂ 1 [g/l]	XCO ₂ 2 [g/l]	XCO ₂ 3 [g/l]	XCO ₂ φ
1	20	12	85	1,38	1,02	0,85	4,24	4,09	4,31	4,21
2	19	12	110	2,01	1,47	1,21	4,63	4,58	4,82	4,68

Vyhodnocené hodnoty se nyní liší od hodnoty změřené komerčním přístrojem jen v řádu desetin, lze je tedy považovat za relevantní. Změřené koncentrace vycházejí lehce nižší, to může být způsobeno tím, že vzorek, měřený přístrojem *CarboQC*, byl odebrán přímo z ležáckého tanku, ale vzorek který byl měřen navrženým zařízením pocházel již ze sudu, který neměl nad hladinou ochranou atmosféru CO₂, ale vzduch. Rozpuštěný CO₂ mohl při převozu uniknout. Každopádně lze tvrdit, že se výše zmíněné úpravy příznivě ovlivnily na přesnosti měření.

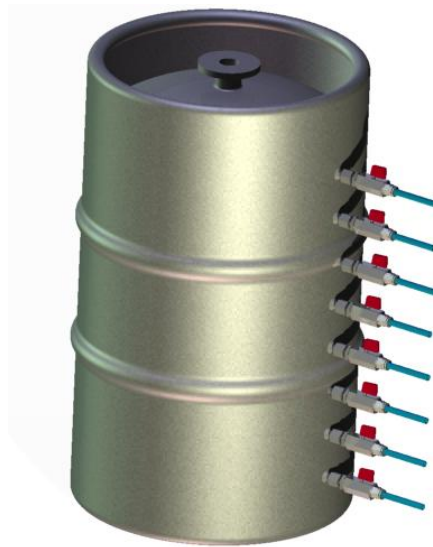
8.3 Návrh experimentální zařízení.

V předchozích kapitolách byla provedena teoretická simulace distribuce rozpuštěného CO₂ v pivním sudu. Z výsledků vyplývá, že by v čase, po který bývá sud naražený, tedy maximálně do několika dnů, nebylo možné pivo až ke dnu sudu přesytit. V této kapitole je popsáno experimentální zařízení umožňující zjistit časový průběh sycení v sudu.

Měřicí zařízení bylo navrženo tak, aby bylo možné odebírat vzorky piva v různých výškách sudu, jelikož bylo předpokládáno, že je pivo syceno plynem od hladiny ke dnu sudu pouze difúzním přenosem hmoty, tedy že koncentrace bude nejvyšší u hladiny a postupně bude směrem ke dnu klesat.

Zařízení je zobrazeno na Obr. 8.11 a Obr. 8.12. Tělo zařízení je pivní sud o objemu 50 l, ve kterém jsou po 60 mm nevařené nerezové trubičky o vnitřním průměru 8mm, zapuštěné 128 mm do sudu (viz přílohu 1 - výkres svařence upraveného sudu). Padesátilitrový sud byl volen proto, aby bylo možné konstruovat více odběrových míst a také proto, že se jedná o nejčastěji používaný sud. Zvolený průměr trubiček by měl splňovat podmínku malého objemu odběru, jelikož je nutné vždy před dalším měření tento objem odpustit, aby byl vždy odebrán čerstvý vzorek. Zapuštění trubiček do sudu by mělo eliminovat chyby, které by mohly vznikat v případě odběru vzorku u stěny sudu. Odběrové trubičky jsou opatřeny kulovými kohouty, ze kterých vedou přes rychlospojky připojovací hadičky, které se zavedou od dříve navrženého přístroje na měření obsahu CO₂ v pivu.

Před měřením byla na zařízení provedena **tlaková zkouška** těsnosti. Sud byl přes výčepní hlavu plně naplněný vodou. Následně se k sudu připojila tlaková láhev se stlačeným CO₂ a na redukčním ventilu se nastavil přetlak 3 bary. Na sudu nebyly vidět jakékoliv známky netěsnosti.



Obr. 8.11

Měřicí zařízení ¹¹

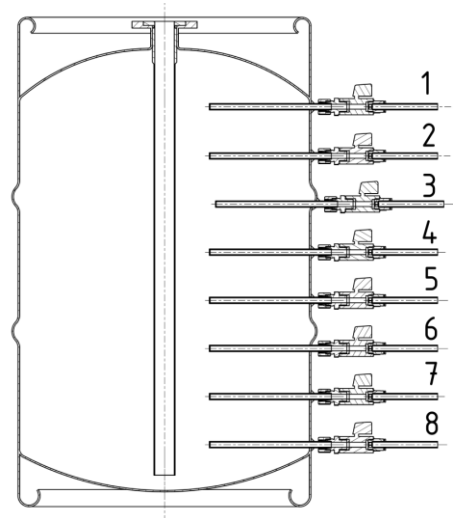
8.4 Měření na experimentálním zařízení

Testovací vzorek byl stejný dvanáctistupňový nefiltrovaný ležák stočený do sudu v pivovaru Kácov, který byl použitý při experimentu v kapitole 6. Smyslem experimentu bylo sytit pivo oxidem uhličitým po dobu čtyř dnů tak, aby při dosažení rovnováhy bylo tímto plynem přesyceno o několik jednotek oproti počáteční koncentraci. Následně v určitém časovém intervalu měřit koncentraci CO_2 ze všech odběrných míst a získat tak kinetiku sycení piva hnacím plynem.

Sud byl uložený do chladničky (Obr. 8.12), která udržovala teplotu piva přibližně konstantní. Z chladničky je vyvedeno pивní potrubí k výčepnímu kohoutu, umožňující v průběhu experimentu čepovat pivo. Pivo o teplotě $6\text{ }^\circ\text{C}$ bylo na počátku experimentu sycené čistým potravinářským oxidem uhličitým o přetlaku $p = 2,5\text{ bar}$, tomu odpovídá podle kapitoly 7.1 rovnovážná koncentrace $x_{\text{CO}_2} = 9,32\text{ g}_{\text{CO}_2} \cdot \text{l}^{-1}$. Jednalo se tedy o simulaci případu, kdy hrozí silné přesycení piva.

Podle Obr. 8.12 sud umožňuje odebírat vzorky 1- 8. V předešlém experimentu "*Vliv tlaku na tvorbu bublin v pивním potrubí*" bylo však vyčepováno několik piv a vzhledem k tomu, že byl k dispozici pouze jeden vzorek piva, v upraveném sudu klesla hladina piva až k odběru 3 a již nebylo možné odebírat z míst 1 a 2.

¹¹ Výkresy byly vytvořené ve studentské verzi programu Autodesk Inventor 2015



Obr. 8.12

Sestava upraveného sudu s vyznačenými odběry

Celé měření probíhalo po dobu 96 hodin, přičemž odběr a měření vzorků bylo provedeno vždy jednou za den. Koncentrace CO_2 byla vyhodnocena navrženým zařízením v kapitole 8.2.2. Před každým měřením bylo z jednotlivých odběrů odebráno 7 ml, aby nebylo měření zkreslené starým vzorkem, který zůstal v odběrové trubičce. V Tabulka 7 jsou vypsány průměrné hodnoty koncentrace změřené v jednotlivých odběrech na začátku experimentu.

Tabulka 7
Koncentrace na začátku experimentu

Čas [h]	Odběr	Koncentrace [g/l]
0	3	4,46
	4	4,48
	5	4,72
	6	4,69
	7	4,67
	8	4,81
	ϕ	4,6

Koncentrace stanovené na počátku měření přibližně odpovídají počáteční koncentraci změřené v pivovaru přístrojem *CarboQC*, s výslednou hodnotou 4,91 g_{CO_2}/l . V následujících tabulkách 8 - 10 jsou vypsané hodnoty koncentrací stanovené v dalších dnech.

Tabulka 8
Koncentrace po 24 hodinách

Čas [h]	Odběr	Koncentrace [g/l]
24	3	6,05
	4	6,10
	5	6,13
	6	6,50
	7	6,40
	8	6,17
	ϕ	6,2

Tabulka 9*Koncentrace po 53 hodinách*

Čas [h]	Odběr	Koncentrace [g/l]
53	3	/
	4	7,84
	5	8,09
	6	7,87
	7	7,68
	8	8,00
	∅	7,9

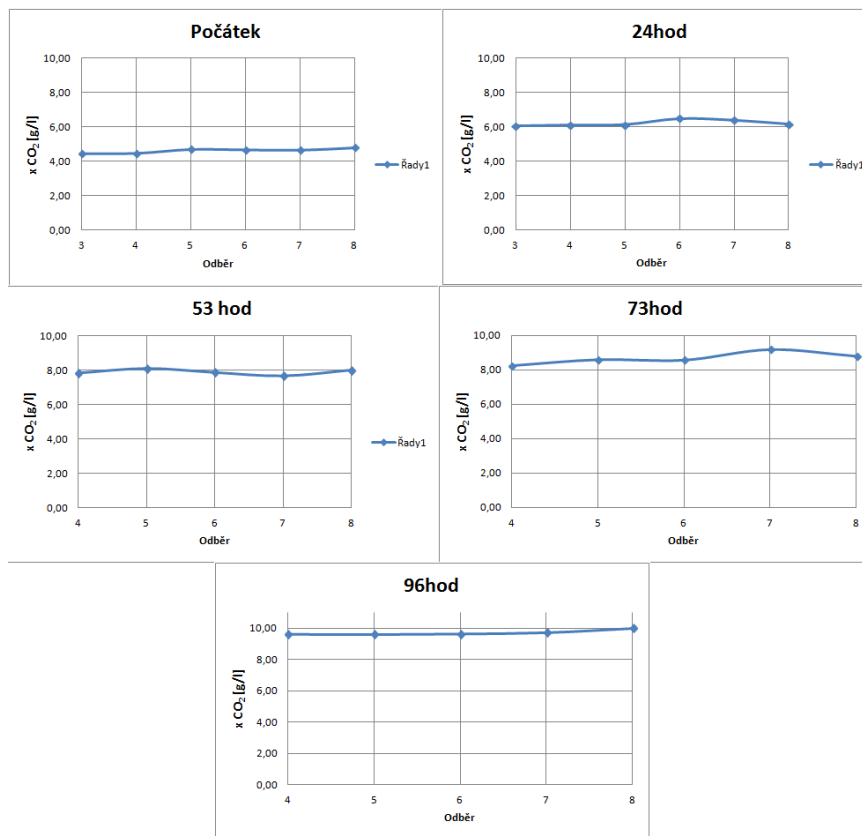
Hladina piva poklesla po 24 hodinách až pod odběr číslo 3, jelikož v průběhu měření bylo načepováno vždy několik vzorků piva. Důvodem byl průzkum chování piva v průběhu čepování při odlišných hodnotách koncentrace CO₂ a také proto, že další experiment vyžadoval po změřené koncentraci odběr minimálně 1 litru piva.

Tabulka 10*Koncentrace po 73 hodinách*

Čas [h]	Odběr	Koncentrace [g/l]
73	3	/
	4	8,26
	5	8,60
	6	8,58
	7	9,19
	8	8,81
	∅	8,7

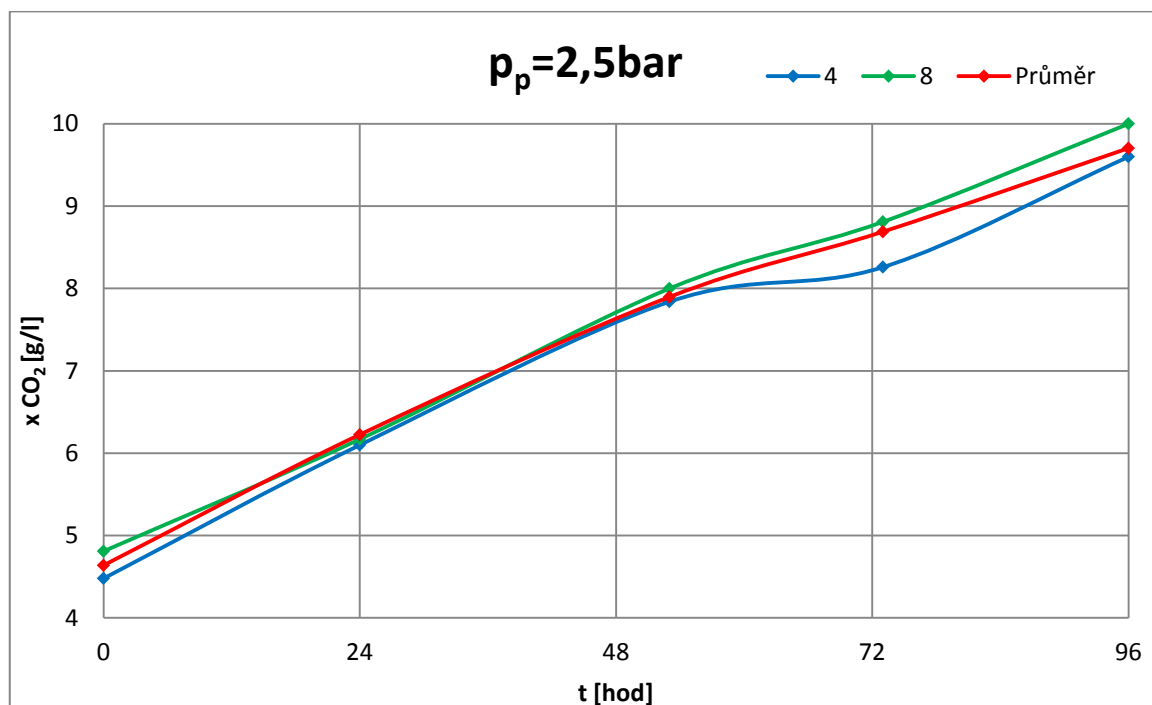
Tabulka 11*Koncentrace po 96 hodinách*

Čas [h]	Odběr	Koncentrace [g/l]
96	3	/
	4	9,60
	5	9,58
	6	9,62
	7	9,71
	8	10,00
	∅	9,7



Obr. 8.13

Hodnoty koncentrací jednotlivých odběrů sudu, pro různou dobu sycení.



Obr. 8.14

Časový průběh sycení piva v odběrech 4, 8 a průměr ze všech odběrů.

Diskuze k výsledkům této kapitoly

Obr. 8.13 zobrazuje hodnoty koncentrací v jednotlivých odběrech sudu pro různou dobu sycení. Výsledné hodnoty koncentrací nemají směrem ke dnu sudu pravidelně klesající nebo stoupající trend. Naměřené hodnoty v odběrech pro jednotlivé časy mají odchylku maximálně $0,55 \text{ g}_{\text{CO}_2}/\text{l}$, která může být způsobena chybou měření koncentrace CO_2 . Obr. 8.14 uvádí časový průběh sycení piva v odběrech 4, 6 a 8¹². Pivo se dle těchto křivek sytí rovnoměrně, přičemž v průměru vzrostla koncentrace za 96 hodin o $5 \text{ g}_{\text{CO}_2}/\text{l}$.

Rozdíl výsledků teoretické simulace a výsledného experimentu je signifikantní. Podle teoretické simulace (Obr. 8.3) by v hloubce 60 mm vzrostla koncentrace rozpuštěného plynu za 53 hodin pouze o $0,006 \text{ g}_{\text{CO}_2}/\text{l}$. Podle experimentálně stanovené křivky odpovídající odběru 4, který je také 60 mm pod hladinou, vzroste koncentrace za 53 hodin o $3,36 \text{ g}_{\text{CO}_2}/\text{l}$. Tyto velké rozdíly mohou být způsobeny zanedbáním konvektivního přenosu hmoty u teoretické simulace. Konvektivní přenos hmoty může být vyvolán změnou teploty piva (přirozená konvekce) nebo nuceným prouděním piva v sudu, které vzniká při čepování a výrazně urychluje jeho sycení.

V průběhu experimentu byly po každém měření koncentrace načepovány 3 kontrolní piva. Na začátku experimentu nebyl problém načepovat najednou pivo bez nežádoucí pěnivosti. Již za jeden den, když koncentrace vzrostla na průměrnou hodnotu $6,2 \text{ g}_{\text{CO}_2}/\text{l}$, docházelo k nežádoucímu pění a půllitr byl většinou zaplněn více než z poloviny pěnou. Po čtyřech dnech, kdy koncentrace dosáhla průměrné hodnoty $9,7 \text{ g}_{\text{CO}_2}/\text{l}$, nebylo možné pivo načepovat. Nežádoucí pění bylo natolik intenzivní, že byl vždy půllitr zcela naplněn pěnou.

Tyto výsledky zcela vyvrací předchozí předpoklad, že by byla nejvyšší koncentrace u hladiny a postupně směrem ke dnu klesala a nasvědčují tomu, že je v celé výšce sudu stejná koncentrace CO_2 . Dále potvrzují, že je možné pivo v sudu přesytit již za jeden den, jenž má za následek nežádoucí pění. Doporučuji sytit pivo oxidem uhličitým o takovém přetlaku, kterému za určité teploty piva odpovídá rovnovážná koncentrace stanovená pivovarem. V případě, kdy hrozí přesycení, je možné volit některou ze směsí plynů CO_2 a N_2 .

¹² Vykreslením všech křivek by se stával graf nepřehledný, proto je uveden ve velkém měřítku v příloze 3

9 Stabilita pивní pěny.

Podle zkušeností doc. Brányika z Ústavu pivovarnictví a sladařství na VŠCHT může měření úbytku pěny vykazovat značné chyby (až 20 %) v závislosti na zkušenosti experimentátora.

Podle mého názoru by se mohla metoda zpřesnit v případě použití kompletně vypěněného vzorku piva nalitého do vysoké sklenice, aby bylo možné sledovat úbytek v co nejdélším čase. Toho lze docílit při čepování piva na takzvaný styl "mlíko", kdy je do sklenice načepovaná pouze velmi hustá pěna, určená k okamžité konzumaci. Mimo úbytek pěny byl také pozorován **vznik kapalně fáze piva** (dále jen piva) na fázovém rozhraní pěna - kapalina.

9.1 Úbytku pěny v závislosti na čistotě a teplotě sklenice

Cílem experimentu bylo nejprve zjistit, zda lze tuto metodu použít. Následně byl vyšetřen úbytek pěny a rychlost vzniku piva pro různě ošetřenou sklenici. Úvodní experiment byl proveden na jednom výčepním zařízení v krátké době, je tedy nepravděpodobné, že by byl ovlivněn případnými změnami koncentrace CO₂ v pivu. Testovacím vzorkem bylo 10° pivo Gambrinus.

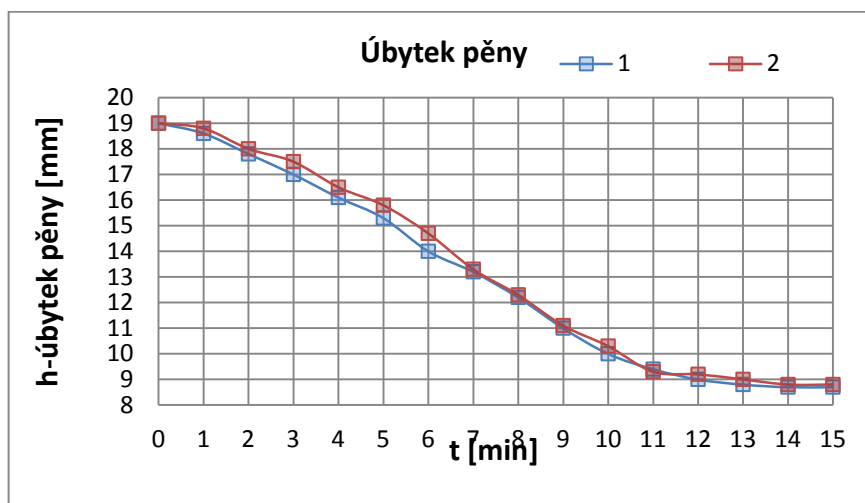
Vzhledem k proměnnému průřezu většiny sklenic byl místo běžné sklenice pro experiment použit odměrný válec. Válec má takřka konstantní profil po celé jeho výšce i při malém objemu 250 ml. Nejedná se tedy o standardní výčepní sklo, ale můžeme jej zvolit jako naše referenční.

Nejprve proběhla dvě měření do odmaštěného, vypláchnutého a vychlazeného válce. Jako odmašťovač byl použitý prostředek na mytí nádobí *Pur*, vyplachování bylo provedeno kohoutkovou vodou a válec byl vychlazený v chladničce na 7°C. Cílem bylo získat závislosti úbytku pěny a tvorby piva v čase, které by měly podobný průběh, a zjistit, zda lze experiment reprodukovat, aby bylo možné následně měnit kvalitu ošetření a sledovat změny.

Další vzorky byly načepovány do čisté, teplé sklenice o teplotě 37 °C (simulující situaci čerstvě vytaženého püllitru z myčky), následně do zaprášené sklenice (simulující situaci špatně umytého nebo vypláchnutého püllitru) a jako poslední do mastné sklenice, která byla namaštěná stopově vepřovým sádlem. Dle praktických poznatků by nejrychlejší úbytek pěny měl nastat v mastném püllitru, tato situace může nastat; když není sklo po

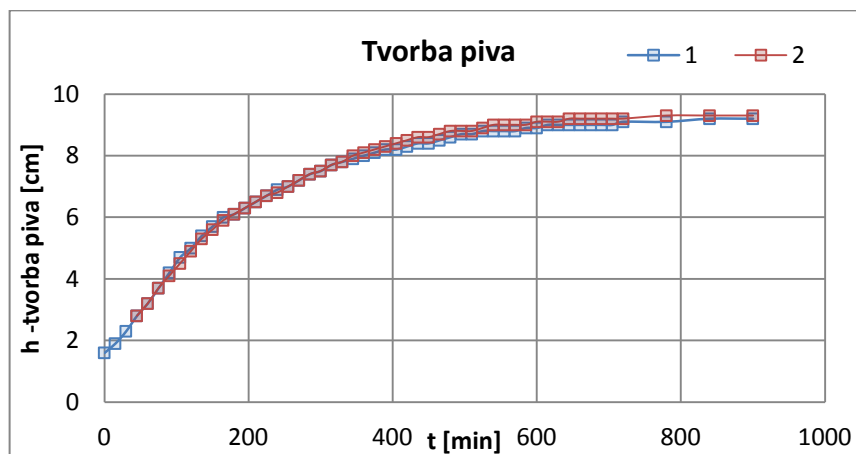
vrácení řádně umyté a může obsahovat stopy mastnoty z jídla, které bylo společně s pivem konzumováno.

Na Obr. 9.1 a Obr. 9.2 jsou vyneseny experimentální body v závislosti na čase pro řádně očištěné sklo. Body mají jen lehké odchylky z čehož usuzují, že výsledky **jsou reprodukovatelné**.



Obr. 9.1

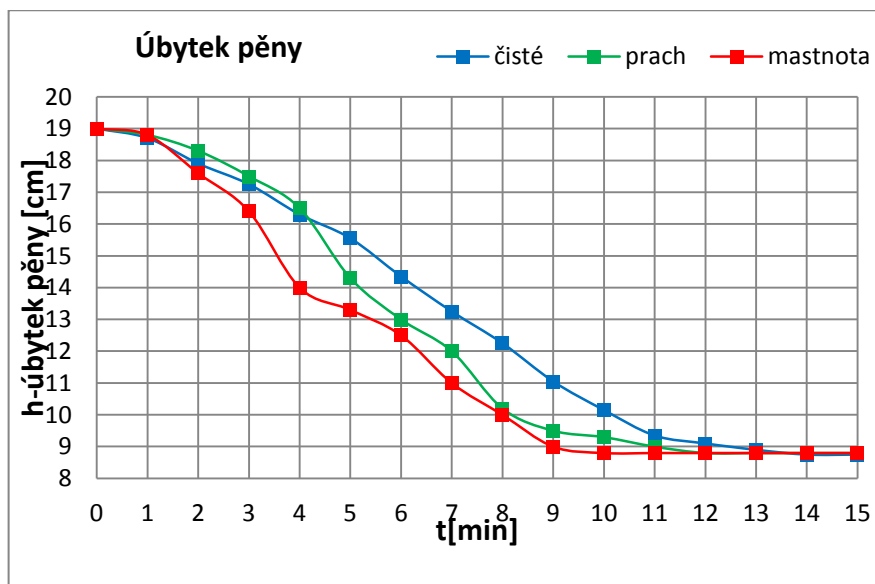
Opakovaný experiment úbytku pěny na čase v řádně očištěném skle.



Obr. 9.2

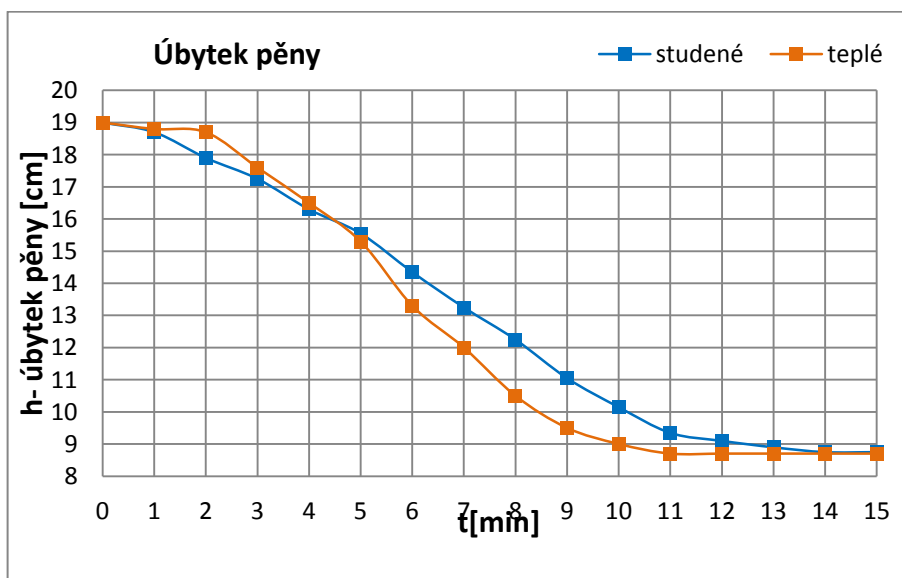
Opakovaný experiment tvorby piva na fázovém rozhraní v čase v řádně očištěném skle.

Na Obr. 9.3 a Obr. 9.4 jsou vykreslené experimentálně stanovené body pro různě ošetřená skla.



Obr. 9.3

Experiment měření úbytku pěny v čas pro řádně ošetřené sklo (průměr hodnot z Obr. 9.1), zaprášené sklo a sklo se stopami mastnoty.



Obr. 9.4

Experiment měření úbytku pěny v čase pro řádně ošetřené studené sklo (průměr hodnot z Obr. 9.1) a teplé, čisté sklo.

Úbytek pěny

Úbytek pěny v závislosti na čase byl popsán pomocí matematického modelu S-křivky, ve kterém byla výška pěny vyjádřena bezrozměrně (viz níže).

$$h^*(t) = \frac{h(t) - h_{min}}{h_{max} - h_{min}} = \frac{1}{1 + \exp(a_0 + a_1 t)}$$

kde:

h^* je bezrozměrná výška pěny v čase t ,

$h(t)$ je výška pěny v čase t ,

h_{max} je maximální výška pěny v čase $t = 0$ (počáteční výška pěny)

h_{min} je minimální výška pěny (konečná výška pěny)

a_0, a_1 jsou regresivní koeficienty

Vznik piva

Nárůst výšky piva byl popsán pomocí exponenciální funkce, ve které byla výška piva vyjádřena také bezrozměrně

$$h^*(t) = \frac{h(t) - h_{min}}{h_{max} - h_{min}} = 1 - \exp\left(\frac{-t}{t_{char}}\right)$$

kde:

h^* je bezrozměrná výška piva v čase t ,

$h(t)$ je výška piva v čase t ,

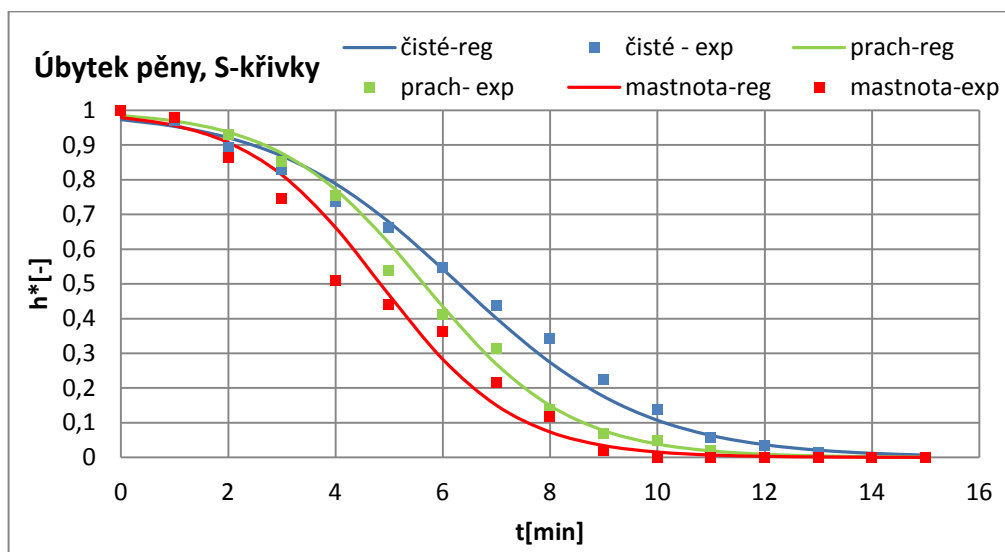
h_{min} = minimální výška piva v čase $t = 0$ (počáteční výška piva)

h_{max} = maximální výška piva (konečná výška pěny)

t je čas

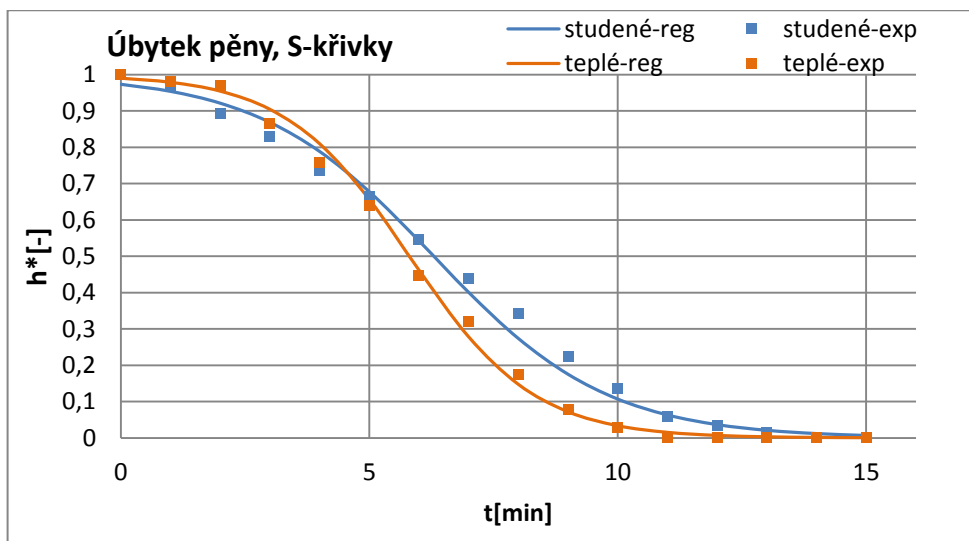
t_{char} je charakteristický čas, za který dosáhne bezrozměrná výška h^* hodnoty 63,21%

Srovnání experimentálních hodnot a regresních křivek je zobrazené na Obr. 9.5 až Obr. 9.8.



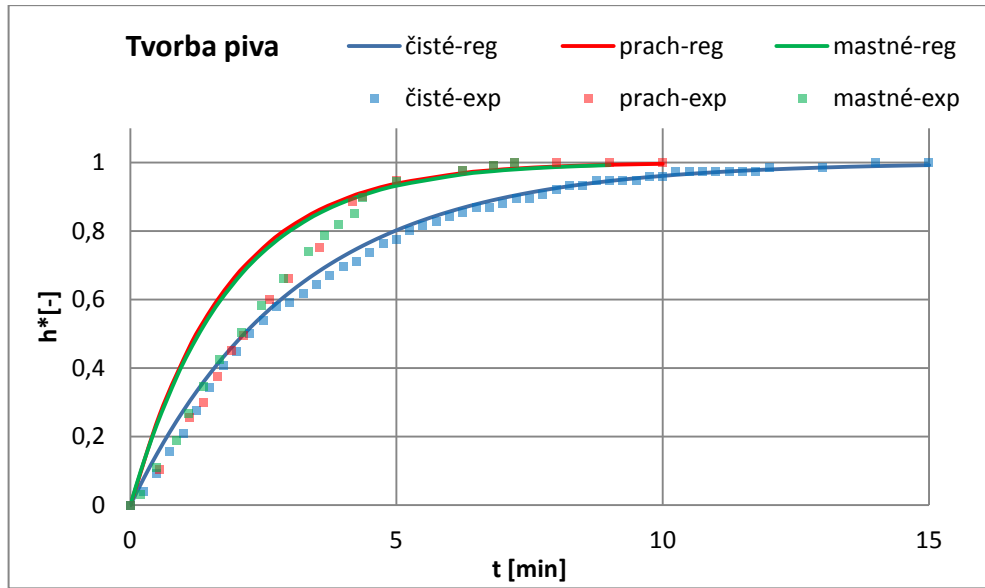
Obr. 9.5

Úbytek pěny: Srovnání experimentálních hodnot a regresních křivek. Řádně ošetřené sklo, zaprášené sklo a sklo se stopami mastnoty.



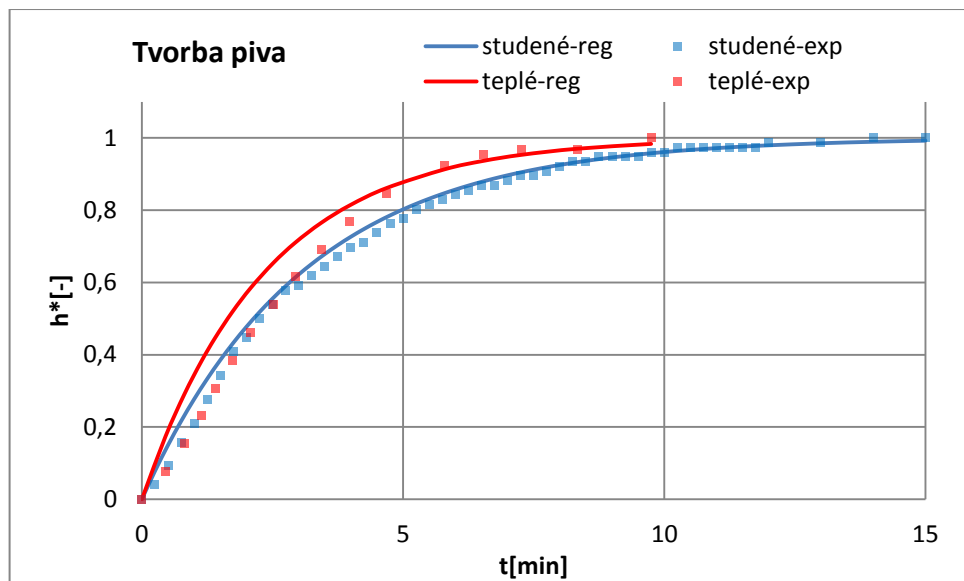
Obr. 9.6

Úbytek pěny: Srovnání experimentálních hodnot a regresních křivek. Řádně ošetřené studené sklo a teplé, čisté sklo.



Obr. 9.7

Růst piva: Srovnání experimentálních hodnot a regresních křivek . Řádně ošetřené sklo, zaprášené sklo a sklo se stopami mastnoty.



Obr. 9.8

Růst piva: Srovnání experimentálních hodnot a regresních křivek. Chladné a teplé sklo

Regresní model navržený pro popis vzniku piva popisuje velmi dobře vznik piva v případě řádně očištěného, chladného skla. V případě teplého, mastného nebo zaprášeného skla model růst **nadhodnocuje**. Naopak regresní model navržený pro popis úbytku pěny popisuje úbytek pěny velmi dobře ve všech případech.

Dle Obr. 9.3 - Obr. 9.6 je zřejmé, že rychlost úbytku pěny závisí na čistotě sklenice, přičemž nejrychleji došlo k rozpadu pěny v případě mastného skla, ke kterému došlo již v 9 minutě měření oproti 12-ti minutám, případě řádně očištěného skla. Dle Obr. 9.3 se pěna nakonec úplně rozpadne vždy ve stejné výšce odpovídající množství piva, které z pěny vzniklo. Pěna tedy obsahovala vždy stejné množství piva. Velmi signifikantní je také rozdílný vzhled pивní pěny a piva celkově (viz obrázky níže).



Obr. 9.9

a) Pivní pěna v zaprášeném skle, pěna je řídká, obsahující velké bublinky a sklo je plné bublinek.

b) Pivní pěna v ošetřeném skle, pěna je velmi hustá, obsahující malé bublinky a sklo je čisté.

Rozdíl v pivech na Obr. 9.9. je ihned patrný. Pivo **b)** je viditelně bližší vzoru na Obr. 5.4. Pivo **a)** rozhodně nepůsobí dobrým dojmem, především pěna, která obsahuje velké bubliny a nezůstává na stěnách skla, tudíž by pivo ani takzvaně

"nekroužkovalo"¹³(Obr. 9.10 - zobrazené "kroužky" po vypití piva z řádně ošetřené sklenice). Charakter pěny tak může být příčinou rychlejšího úbytek pěny. Celkový dojem v poslední řadě kazí bublinky na stěnách skla.



Obr. 9.10

Kroužky vytvořené pěnou po vypití piva v řádně očištěném skle [archív autora]

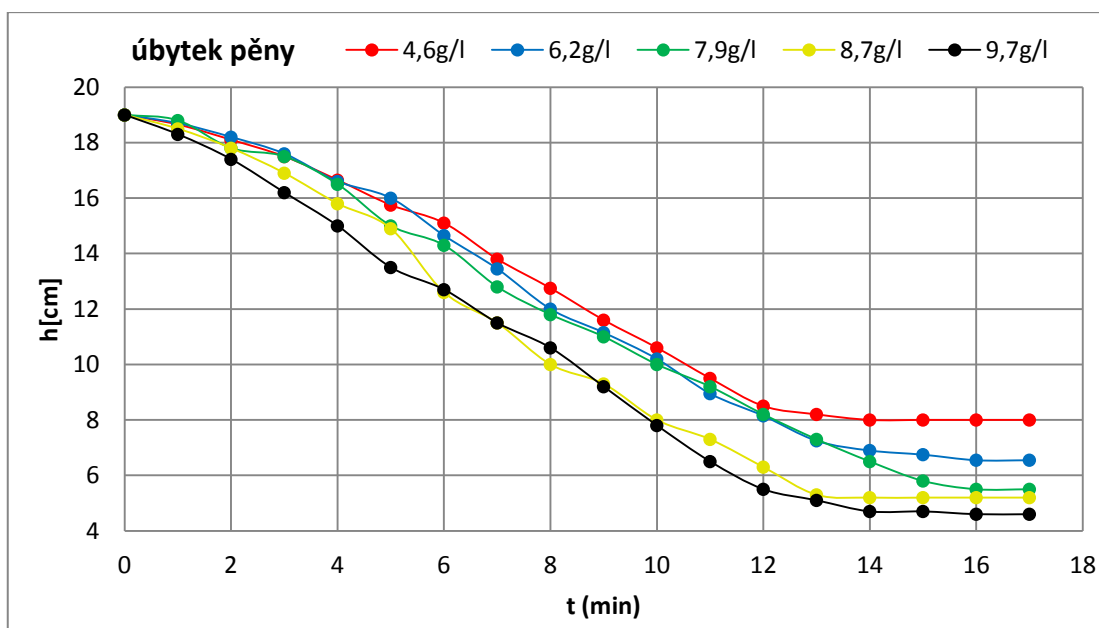
9.2 Stabilita pивní pěny v závislosti na koncentraci CO₂

V průběhu experimentu popsaného v kapitole 8.4 byla vyšetřována stabilita pивní pěny a rychlost tvorby piva v závislosti na koncentraci rozpuštěného CO₂ v pivu. Dle předchozí kapitoly již víme, že lze použít pro stanovení úbytku pěny navrženou metodu kompletně vypěněného piva, a že je možné experimentální data proložit regresivní křivkou.

Celkem bylo provedeno 5 experimentů v pěti dnech, vždy po změření koncentrace CO₂ v pивním sudu jak bylo popsáno v kapitole 8.4. Níže jsou vykreslené experimentální body a regresní křivky úbytku pěny a vzniku piva pro jednotlivé koncentrace.

¹³ Pivařský termín, kdy pivo po napití zanechává kroužky pěny na půllitru, což je považováno za žádoucí.

Úbytek pěny



Obr. 9.11

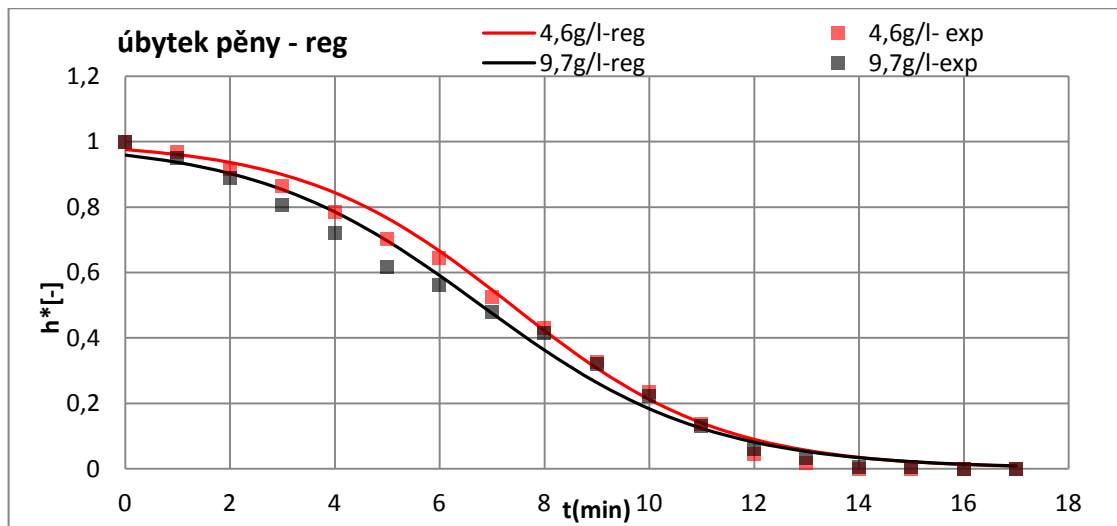
Experiment měření úbytku pěny v čase pro různé koncentrace rozpuštěného CO_2

Z Obr. 9.11 lze odhadnout čas, za který dosáhla pěna svého minima pro různé koncentrace (Tabulka 12).

Tabulka 12

X_{CO_2} [g/l]	4,6	6,2	7,9	8,7	9,7
t_{rozpad} [min]	14	16	16	13	14

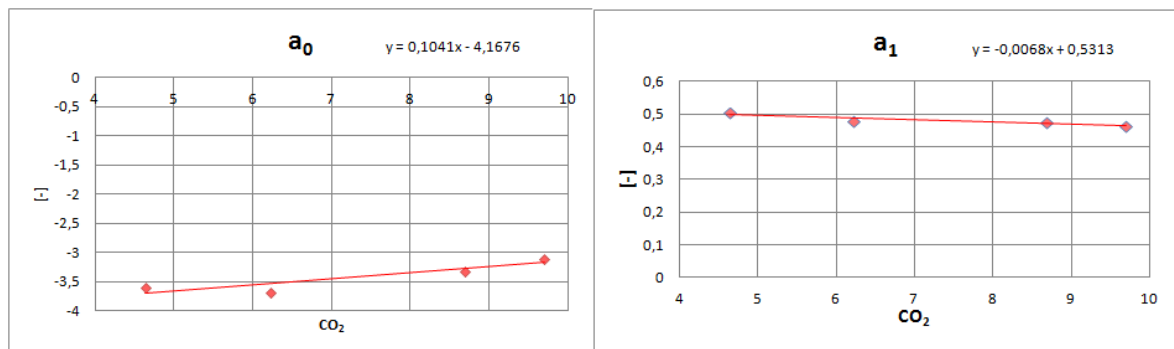
Na Obr. 9.12 je uvedeno srovnání experimentálních dat a regresivního modelu pro koncentrace CO_2 4,6 a 9,7 g/l. Srovnání pro všechny koncentrace je uvedeno v příloze 4.



Obr. 9.12

Úbytek pěny: Srovnání experimentálních hodnot a regresních křivek.

Regresní křivky leží velmi blízko u sebe především proto, že je regresní koeficient a_1 takřka konstantní. Na Obr. 9.13 jsou zobrazené regresní koeficienty a_0 a a_1 v závislosti na koncentraci CO_2 .

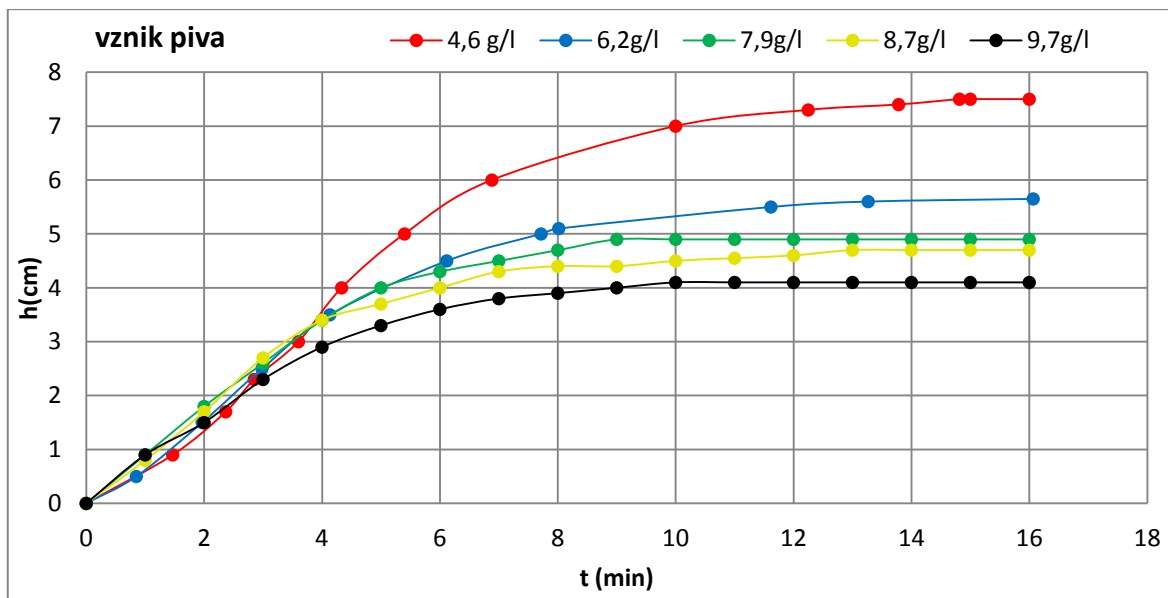


Obr. 9.13

Regresní koeficienty

Na Obr. 9.11 je vidět, že závislosti mají minima v různých výškách. Pěna se tedy úplně rozpadla vždy v jiné výšce, které odpovídá množství piva vzniklého z pěny. Lze tedy tvrdit, že pěna s rostoucí koncentrací rozpuštěného CO_2 v pivě obsahuje méně piva a je stejně jako pivo více nasycená (přesycená) plynem. Není tedy možné načepovat například chutné "mlíko", které by tudíž obsahovalo méně piva. Dále je z Obr. 9.11 patrné, že se pěna rychleji rozpadá s rostoucí koncentrací CO_2 . Přesyceným pivem tedy vzniká méně chutná pěna, která se rychleji rozpadá.

Vznik piva



Obr. 9.14

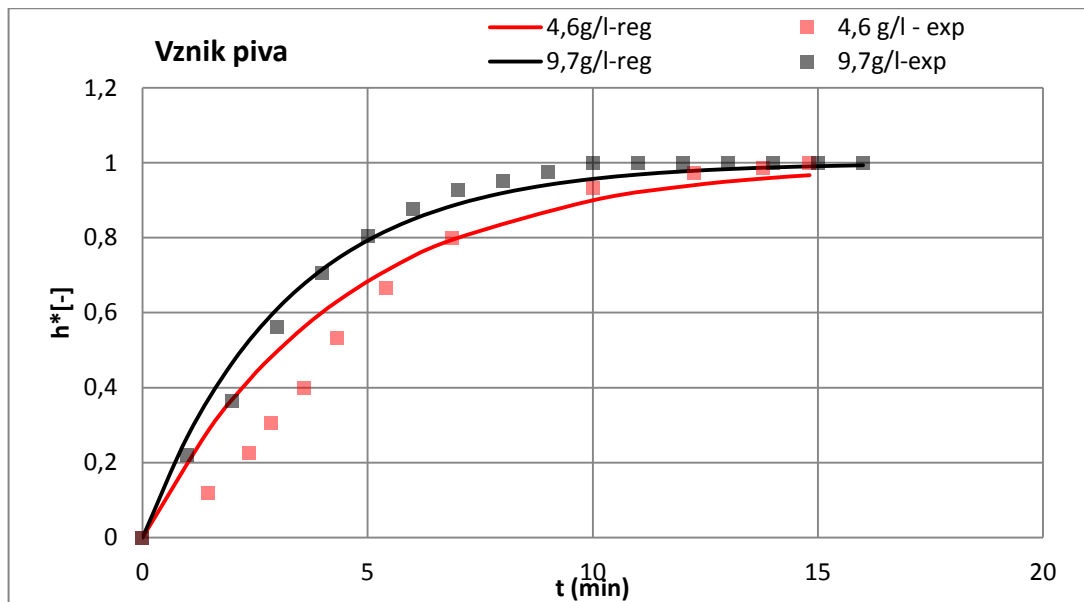
Experiment měření rychlosti vzniku piva v čase pro různé koncentrace rozpuštěného CO_2

Z Obr. 9.14 lze odhadnout čas, za který dosáhlo pivo svého maxima pro různé koncentrace (Tabulka 13).

Tabulka 13

X_{CO_2} [g/l]	4,6	6,2	7,9	8,7	9,7
t [min]	16	16	9	12	10

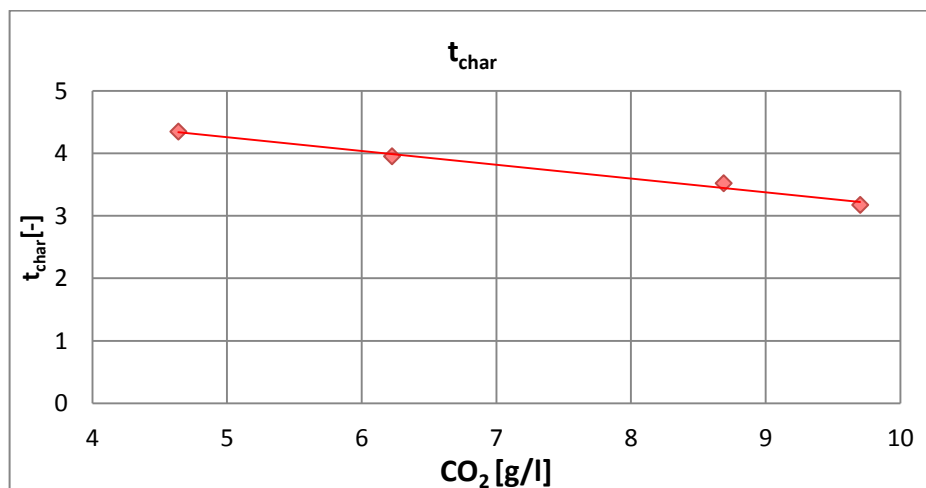
Na Obr. 9.15 je uvedeno srovnání experimentálních hodnot a modelu pro vznik piva za různých koncentrací. Shoda mezi experimentálními daty a modelem je dobrá na konci doby. V počátečních časech model nadhodnocuje vznik piva. Přesto jsem vyhodnotil charakteristické časy.



Obr. 9.15

Růst piva: Srovnání experimentálních hodnot a regresních křivek pro různé koncentrace CO_2

Na Obr. 9.16 je zobrazená závislost charakteristického času na koncentraci, která má s vyšší koncentrací CO_2 klesající trend, což znamená, že s vyšší koncentrací CO_2 dosáhne vznik piva šedesáti tři procent svého maxima v kratším čase a lze říci, že je rychlejší.



Obr. 9.16

Z Obr. 9.14 je vidět, že závislosti mají maximální hodnoty v různých výškách, které odpovídají množství piva vzniklého z pěny. Čím více je v pivu rozpuštěného CO_2 tím méně z piva vznikne piva a naopak. Dle regresních křivek na Obr. 9.15, Obr. 9.12 a

charakteristického času (Obr. 9.16) vychází, že se pěna rychleji rozpadá a pivo se z pěny tvoří rychleji při vyšších koncentracích CO_2 .

10 Závěry a doporučení

Cílem práce bylo studium vlivu faktorů ovlivňujících rozpustnost CO_2 v pivu a následného chování piva při čepování. Dále byl cíl zjistit, zda zvýšená koncentrace CO_2 ovlivňuje nežádoucí pění při čepování a stabilitu pивní pěny.

- Byla vypracována literární rešerše se zaměřením na zdroje CO_2 při výrobě piva, teorii rozpustnosti plynů v kapalině, měření koncentrace rozpuštěného CO_2 v pivu a vliv CO_2 na chuť piva, kvalitu pěny a chování piva při čepování.
- Byl navržen a proveden experiment ověřující teorii o snížené pěnívosti piva při čepování v závislosti na tlaku hnacího plynu. Bylo prokázáno, že vyšší tlak eliminuje nežádoucí pění v pivním. Bylo zjištěno, že při dosažení přetlaku 2,5 bar je možné pivo načepovat najednou bez vzniku nežádoucího pění potrubí.
- Byl vyhodnocen vliv tlaku a složení hnacího plynu na rozpustnost plynu v pivu. Bylo zjištěno, že při použití čistého CO_2 může za nižších teplot a vyšších tlaků plynu docházet k přesycení piva. K tomu může nastat především v případě, když je pivní sud chlazený celý a tlak plynu je zvyšován, aby nedocházelo k nežádoucímu pění. V tomto případě doporučuji volit jinou směs plynu, která by neměla pivo i za vyšších tlaků přesytit. Například směs oxidu uhličitého a dusíku.
- Byla provedena simulace distribuce CO_2 v pivním sudu v závislosti na čase a to jak analyticky tak numericky. Cílem bylo ověřit, za jak dlouho lze pivo, o teplotě 6°C a při přetlaku čistého CO_2 2,5 bar, přesytit. Dle výsledků by teoreticky **ne**bylo možné v reálném čase sud přesytit. Podle literatury ([21]) a praktických zkušeností je však možné v reálném čase pivo přesytit. Příčinou může být vliv konvektivního přenosu hmoty, který nebyl ve výpočtech předpokládán.
- Byl navržený a sestavený přístroj umožňující měřit množství CO_2 rozpuštěného v pivu pracující na principu mechanického vytřepání CO_2 . Přesnost měření přístroje byla ověřena porovnáním výsledků měření komerčním přístrojem *CarboQC*. Tento přístroj byl následně použitý v další části práce.
- Bylo navrženo a sestaveno zařízení umožňující stanovení kinetiky sycení piva v závislosti na tlaku hnacího plynu. Měřicí zařízení tvoří upravený pivní sud navržený tak, aby bylo možné odebírat vzorky piva v osmi různých výškách sudu.
- Byla experimentálně stanovená distribuce CO_2 v upraveném sudu. Experiment byl proveden při teplotě 6°C a hnacím plynem byl čistým oxidem uhličitým o přetlaku 2,5 bar. Již za jeden den vzrostla koncentrace ze $4,6 \text{ g}_{\text{CO}_2}/\text{l}$ na průměrnou hodnotu

6,2 g_{CO_2}/l a docházelo k nežádoucímu pění při čepování. Po čtyřech dnech koncentrace v sudu dosáhla průměrné hodnoty 9,7 g_{CO_2}/l . Tyto výsledky potvrzují, že je možné pivo přesytit již za jeden den.

- Byl experimentálně zjištěný vliv čistoty sklenice na stabilitu pивní pěny. V experimentu byl vyšetřen úbytek pěny a rychlost vzniku kapalně fáze piva pro různě ošetřenou sklenici. Pro čistou a vychlazenou sklenici, čistou a teplou sklenici, zaprášenou a vychlazenou sklenici a mastnou a vychlazenou sklenici. Bylo zjištěno, že rychlost úbytku pěny závisí na čistotě a teplotě sklenice, přičemž nejrychleji došlo k rozpadu pěny v případě mastného skla.
- Byl experimentálně zjištěný vliv hnacího tlaku CO_2 na stabilitu pивní pěny. V experimentu byl vyšetřen úbytek pěny a rychlost vzniku kapalně fáze piva pro různé koncentrace CO_2 rozpuštěného v pивu. Bylo zjištěno, že při vyšších koncentracích CO_2 se pěna rychleji rozpadá, obsahuje pěna méně piva a pivo se z pěny tvoří rychleji.

Doporučení pro volbu typu a tlaku hnacího plynu

Zvýšením tlaku hnacího plynu lze eliminovat nežádoucí pění vznikající v potrubí, ale zároveň se může zvýšit koncentrace CO_2 rozpuštěného v pивu. Měření prokázalo, že je možné pivo plynem přesytit již za jeden den. Přesycené pivo silně pění při čepování a má špatný vliv na stabilitu pивní pěny a ovlivňuje chuť piva. Doporučený postup volby tlaku a typu plynu je následující:

1. Zjistit hodnotu koncentrace CO_2 , na kterou je pivo, které chceme čepovat, syceno pivovarem.
2. Podle teploty, ve které je sud uložen, a koncentrace CO_2 stanovené pivovarem určit **maximální přetlak** čistého CO_2 , viz kapitola 7, aby nedošlo k přesycení piva.
3. Provozní přetlak stanovit podle kapitoly 6 nebo experimentálně dle následujícího návodu. Nastavit na redukčním ventilu přetlak plynu 0,5 bar, začít čepovat pivo a následně přetlak zvyšovat až se eliminuje nežádoucí pění. Během experimentu dle potřeby upravovat průtok na ve výčepním kohoutu, jelikož při vyšším průtoku může vznikat nežádoucí pění při rychlém dopadu piva na stěnu a dno püllitru nebo vlivem turbulentních vírů v potrubí. Tlak, při kterém pivo přestane nadměrně pění je tlakem provozním.

4. Jestliže je přetlak provozní větší než maximální zvolený přetlak podle bodu 2, je nutné volit plynnou směs, která nebude pivo přesycovat (např. 20 % CO₂ 80 % N₂).

Eventuální pokračování experimentální činnosti stanovení koncentrace CO₂ v pivním sudu, nabízí možnost měření za různých teplot, nebo použití jiných typů hnacího plynu.

Seznam použitých značek a symbolů

A	konstanta pro výpočet ztrát	[1]
ap, aw, ae, aa	koeficienty numerické simulace	$[m \cdot s^{-1}]$
a_0	regresní koeficient	[1]
a_1	regresní koeficient	[1]
C	koncentrace složky v kapalině	$[\%_{\text{mol}}; \frac{\text{g}}{\text{l}}; \frac{\text{g}}{\text{kg}}; \frac{\text{mol}}{\text{kg}}]$
CV	kontrolní objem	$[m^3]$
d	průměr	[m]
D	průměr	[m]
D_{AB}	difúzní součinitel	$[\frac{m^2}{s}]$
Do	hydraulický průměr	[m]
e	měrná energie	$[J \cdot kg^{-1}]$
g	tíhové zrychlení	$[m \cdot s^{-2}]$
h	výška	[m]
H	Henryho konstanta	$[\frac{\text{mol}}{\text{kg} \cdot \text{bar}}; \frac{\text{ml}}{\text{bar}}; \text{bar}]$
$k_{stř}$	střední absolutní drsnost	[mm]
l	délka	[m]
L	délka	[m]
m	hmotnost	[kg, g]
M	molární hmotnost	$[kg \cdot kmol^{-1}]$

n	látkové množství	[mol]
\vec{N}_A	hustota difúzního toku složky A	$\left[\frac{\text{kmol}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}\right]$
p	tlak	[Pa, kPa, bar]
R	univerzální plynová konstanta	$\left[\frac{\text{kJ}}{\text{kmol} \cdot \text{K}}\right]$
R_A	rychlost vzniku složky	$\left[\frac{\text{kmol}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}\right]$
Re	Reynoldsovo číslo	[1]
S	průřez	[m ²]
S	zdroj	[W]
t	čas	[s]
t_{rozpad}	čas rozpadu pивní pěny	[s]
t_{char}	charakteristický čas	[1]
T	termodynamická teplota	[K]
\bar{u}	střední rychlost proudění	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$
u	rychlost proudění	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$
V	objem	[m ³]
\dot{V}	objemový průtok	$[\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$
x	koncentrace složky v kapalině	$\left[\%_{mol}; \frac{\text{g}}{\text{l}}; \frac{\text{g}}{\text{kg}}; \frac{\text{mol}}{\text{kg}}\right]$
x	souřadnice	[m]
y	koncentrace složky v plynu	[% _{mol}]
Γ	difúzní/ kondukční koeficient	

Δ	rozdíl, změna (přírůstek)	
δ	rozdíl, změna (přírůstek)	
ζ	součinitel místních hydraulických ztrát	[1]
η	argument erf funkce	
λ	součinitel hydraulického tření	[1]
μ	dynamická viskozita	[Pa · s]
ν	kinematická viskozita	[m ² · s ⁻¹]
ρ	hustota proudící látky	[kg · m ⁻³]
ϕ	obecná proměnná (teplota, koncentrace, rychlost...)	
∇	diferenciální operátor	

Dolní indexy

<i>A</i>	vztaženo k látce A
<i>0</i>	vztaženo na počáteční hodnotu
<i>c</i>	vztaženo na celek
<i>e</i>	vztaženo k východnímu bodu numerické simulace
<i>h</i>	vztaženo k narážecí hlavě
<i>ch</i>	vztaženo k průtokovému chlazení
<i>k</i>	vztaženo ke koleni
<i>L</i>	kapalina (liquid)

<i>max</i>	vztaženo k maximální hodnotě
<i>min</i>	vztaženo k minimální hodnotě
<i>p</i>	přetlak
<i>p</i>	vztaženo k výčepnímu kohoutu
<i>p</i>	vztaženo k prostřednímu bodu numerické simulace
<i>roz</i>	vztaženo ke ztrátě pozvolným rozšířením
<i>s</i>	vztaženo ke směsi, celku
<i>S</i>	vztaženo ke skokové změně
<i>tř</i>	vztaženo k třetí ztrátě
<i>vs</i>	vztaženo ke vstupu
<i>vz</i>	vzorek
<i>w</i>	vztaženo k západnímu bodu numerické simulace
<i>z</i>	vztaženo ke ztrátě
<i>zúž</i>	vztaženo ke ztrátě pozvolným zúžením

Horní indexy

*	bezrozměrná veličina
-	střední hodnota
/	značení pro odlišení

Seznam použité literatury

- [1] Plzeňský Prazdroj [online]. [cit. 2015-08-21]. Dostupné z: <http://www.prazdroj.cz>
- [2] Euro Zprávy [online]. [cit. 2015-09-22]. Dostupné z:
<http://domaci.eurozpravy.cz/spolecnost/89338-pocet-pivovaru-v-cesku-stoupa-vite-kolik-jich-u-nas-je/>
- [3] HUMMEL, Jaroslav. Průzkum vazby kysličníku uhličitého v pivu. Kvasný průmysl:4/1958 , Výzkumný ústav pivovarský a sladařský, Praha ve spolup. se Sahm, s. r. o, 1958. ISSN 0023-583
- [4] [online]. [cit. 2015-08-26]. Dostupné z:
<https://www.brewersassociation.org/statistics/number-of-breweries/>
- [5] ŠÁMAL, František a PAULŮ, Richard. Zpráva o stavu českého pivovarství a sladařství za rok 2013. Dostupné také z: http://www.ceske-pivo.cz/sites/default/files/dokumenty_tz/2014_04_zprava_hospodarske_vysledky_oru_za_2013-final.pdf
- [6] KŮTNER, Dušan. E15 zprávy [online]. [cit. 2015-09-23]. Dostupné z:
<http://zpravy.e15.cz/byznys/obchod-a-sluzby/pocet-hospod-v-cesku-klesa-mizi-jich-stovky-rocne-1008344>
- [7] HOFFMAN, Pavel. Výrobní linky potravinářského průmyslu: Část 3 – Sladovny a pivovary. Dostupné také z:
https://moodle.fs.cvut.cz/pluginfile.php/9931/mod_resource/content/2/VLP-mag-3-slad%20a%20pivo.pdf
- [8] BASAŘOVÁ, Gabriela. Pivovarství: teorie a praxe výroby piva. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2010, 863 s. ISBN 978-80-7080-734-7
- [9] Jak se vaří Budvar [online]. [cit. 2015-09-24]. Dostupné z:
<http://www.budejovickybudvar.cz/produkty/jak-se-vari-budvar.html>

- [10] OLŠOVSKÁ, Jana, ŠTĚRBA Karel a ČEJKA Pavel. Srovnání různých metod stanovení oxidu uhličitého v pivu. Kvasný průmysl: 59 / 2013. , Výzkumný ústav pivovarský a sladařský [online]. [cit. 2015-10-01].
- [11] Lukáš Svoboda - Mistr světa v čepování plzeňského piva, soukromá komunikace
- [12] PTÁČNÍK, Stanislav. Češi pijí v hospodách stále méně piva: Novinky.cz [online]. [cit. 2015-10-01]. Dostupné z: <http://www.novinky.cz/ekonomika/333157-cesi-piji-v-hospodach-stale-mene-piva.html>
- [13] Tjebbes,J. Doorontwikkeling “Totale Gasdruk Meter“. Werktuigbouwkunde, Fontys Technische Hogeschool Venlo, Eindhoven 2007
- [14] DITL, Pavel. Difúzně separační pochody. Vyd. 2. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1999, 231 s. ISBN 80-010-2043-6.
- [15] Journal of research of the national institute of standards and technology. National Institute of Standards and Technology: Standard Reference Data [online]. [cit. 2015-10-12]. Dostupné z: <http://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C124389>
- [16] ŠAVEL Jan. Výpočet obsahu oxidu uhličitého z údajů manometrického měřiče. Kvasný průmysl: 32/1986 , Výzkumný ústav pivovarský a sladařský [online]. [cit. 2015-10-01].
- [17] ŠROGL, Jiří, Stanislav AUGUSTIN a Ladislav NOVOTNÝ. Zjednodušené titrační stanovení kysličníku uhličitého v nápojích. Kvasný průmysl:21/1975, Výzkumný ústav pivovarský a sladařský [online]. [cit. 2015-10-01].
- [18] Pentair Haffman [online]. [cit. 2015-10-29]. Dostupné z: http://www.haffmans.nl/EngineeredProduct_P_CO2Measurement.aspx
- [19] LEA, Andrew Geoffrey Howard a J PIGGOTT. Fermented beverage production. 2nd ed. New York: Kluwer Academic/Plenum Publishers, c2003, xxii, 423 p. ISBN 03-064-7706-8.
- [20] LEWIS, Michael a Tom W YOUNG. Brewing. 2nd ed. New York: Kluwer Academic/Plenum Publishers, 2002, x, 398 p. ISBN 03-064-7274-0.
- [21] SLABÝ Martin, OLŠOVSKÁ Jana, ČEJKA Pavel. Vliv tlačného média na obsah plynů v pivu a senzorické vlastnosti piva. Kvasný průmysl 61/2015(6): odborný

- časopis pro výrobu nápojů a biochemické technologie. Praha: Výzkumný ústav pivovarský a sladařský [online]. [cit. 2015-11-14].
- [22] Luko Strojírny [online]. [cit. 2015-11-18]. Dostupné z: <http://www.lukos.cz/cz/2-produkty/875-zakazkova-vyroba.html>
- [23] Laboratoire-Equipement-Distribution [online]. [cit. 2015-11-19]. Dostupné z: http://www.led-lab.com/fr/detail_prod.php?ID=72
- [24] METTLER TOLEDO [online]. [cit. 2015-11-19]. Dostupné z: <http://cs.mt.com/cz/cs/home.html>
- [25] VERSTEEG, Geed F. a Wlm P. M. VAN SWAAIJ. Solubility and Diffusivity of Acid Gases (CO₂, N₂O) in Aqueous Alkanolamine Solutions. xii, 503 p.
- [26] VERSTEEG, H a W MALALASEKERA. An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method. 2nd ed. New York: Pearson Education Ltd., 2007, xii, 503 p. ISBN 01-312-7498-8.
- [27] ZUCKERMAN ERIC, Georgia university. Henry's Law: A Physical Description of Henry's Law and the Solubility of a Gas in a Liquid [online]. [cit. 2015-12-01]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=eCY3LMuS-VM>
- [28] ADAMEC Josef., VÁRADIOVÁ Blanka., JEŽEK Jan.: Mechanika tekutin, Nakladatelství ČVUT, Praha (2000)
- [29] MAREŠ, Radim, Jaroslav KADRNOŽKA a Oldřich ŠIFNER.: Tabulky vlastností vody a páry podle průmyslové formulace IAPWS-IF97. Vyd. 1. Brno: VUTIUM, 1999, 156 s. ISBN 80-214-1316-6.
- [30] Wikiskripta [online]. [cit. 2015-12-29]. Dostupné z: <http://www.wikiskripta.eu>

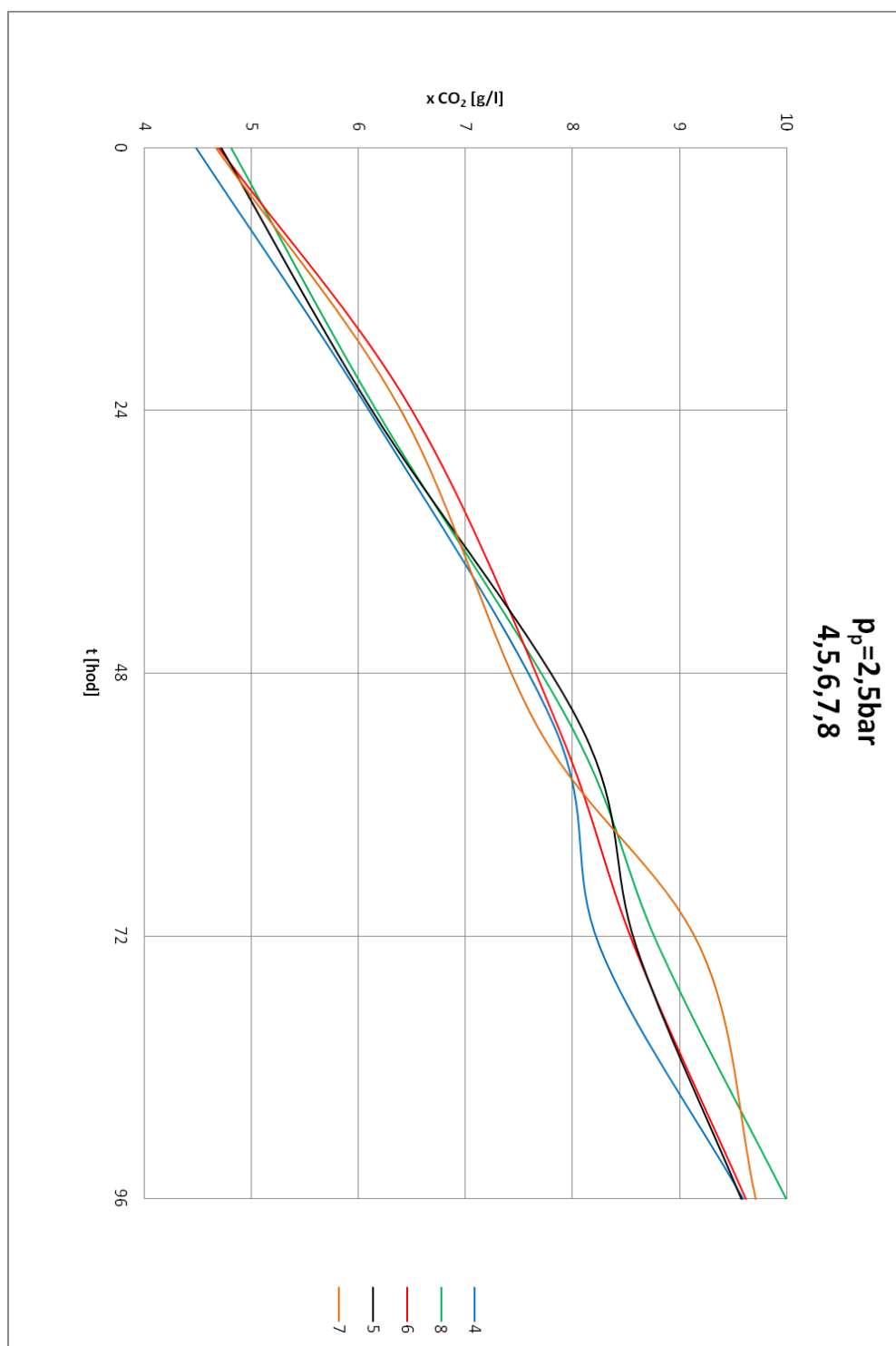
Přílohy

Příloha 1

Výkres svařence (přiložený)

Příloha 2

Časový průběh sycení piva ve všech odběrech



Příloha 3

Úbytek pěny: Srovnání experimentálních hodnot a regresních křivek, různé koncentrace CO_2

