

ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE

FAKULTA
STROJNÍ



ZÁVĚREČNÁ
PRÁCE

2017

Svatopluk
Sýkora

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Sýkora** Jméno: **Svatopluk** Osobní číslo: **424086**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav procesní a zpracovatelské techniky**
Studijní program: **Strojírenství**
Studijní obor: **Energetika a procesní technika**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Návrh cylindro-kónického fermentačního tanku s nepřímým chlazením

Název bakalářské práce anglicky:

Design of cylindrical-conical fermentation tank with indirect cooling

Pokyny pro vypracování:

Zpracujte literární rešerši zaměřenou na fermentaci piva, uspořádání fermentačních tanků a požadavky na fermentační tanky. Dále se zaměřte na vhodné kritériální vztahy ($Nu=f(Ra...)$) pro popis přirozené konvekce ve vertikálních válcových nádobách.

Na základě poznatků z literární rešerše proveďte basic design cylindro-kónického fermentačního tanku (CKT) s nepřímým chlazením včetně nezbytných výpočtů pro návrh CKT pro pivovar s výstavem do 10 000 hl/ročně. Návrh konstrukčně zpracujte ve formě výkresu sestavy.

Seznam doporučené literatury:

Chládek, Ladislav. Pivovarnictví, Grada 2007
Basařová a kol. Pivovarnictví: teorie a praxe výroby piva, VŠCHT 2010
Internetové zdroje a články v odborných časopisech

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

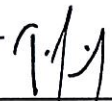
Ing. Jaromír Štancl Ph.D., ústav procesní a zpracovatelské techniky FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **10.04.2017** Termín odevzdání bakalářské práce: **09.06.2017**

Platnost zadání bakalářské práce: _____


Podpis vedoucí(ho) práce


Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

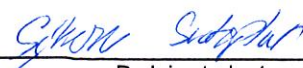

Podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

18-04-2017

Datum převzetí zadání



Podpis studenta

Čestné prohlášení:

Tímto prohlašuji, že předkládanou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů na základě konzultací a pod vedením vedoucího bakalářské práce.

V Praze, 24.srpna 2017

.....
Svatopluk Sýkora

Anotační list

- Jméno autora:** Svatopluk
- Příjmení autora:** Sýkora
- Název práce česky:** Návrh cylindro-kónického fermentačního tanku s nepřímým chlazením
- Název práce anglicky:** Design of cylindrical-conical fermentation tank with indirect cooling
- Rozsah práce:** počet stran: 56
počet obrázků: 13
počet tabulek: 5
počet příloh: 2
- Akademický rok:** 2016/2017
- Jazyk práce:** český
- Ústav:** Ústav procesní a zpracovatelské techniky
- Studijní program:** Strojírenství
- Vedoucí práce:** Ing. Jaromír Štancl Ph.D.
- Konzultant práce:**
- Zadavatel:** Ing. Jaromír Štancl Ph.D.
- Anotace česky:** Tato práce se zabývá problematikou fermentace piva a návrhem cylindro-kónického fermentačního tanku (CKT) s nepřímým chlazením. Postup návrhu se skládá z určení maximálního chladicího výkonu, zvolení vhodných kritériálních vztahů ($Nu=f(Ra...)$) pro popis volné konvekce ve vertikální válcové nádobě, nalezení vhodných Nusseltových korelací pro popis nucené konvekce v trubkovém hadu. Na základě těchto vztahů proběhl návrh a konstrukce CKT, s požadovanou teplosměnnou plochou.
- Anotace anglicky:** This thesis deals with beer fermentation and the design of cylindrical-conical fermentation tank with indirect cooling. The procedure of the design consist of the determination of maximal cooling power, selecting proper correlations ($Nu=f(Ra...)$) for description of the free convection in a vertical cylinder and finding adequate Nusselt's correlation for description of the forced convection in helically coiled tubes. The calculated heat transfer area was used for design of cylindro-conical fermentation tank.
- Klíčová slova:** pivo, kvašení piva, volná konvekce, nucená konvekce, cylindricko-kónický tank
- Klíčová slova anglicky:** beer, beer fermentation, free convection, forced convection, cylindro-conical fermentation tank

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat panu Ing. Jaromíru Štanclovi, Ph.D. za cenné rady, vedení a připomínky v průběhu přípravy celé bakalářské práce.

1. Seznam použitých symbolů.....	8
2. Úvod.....	10
3. Kvašení mladiny a dokvašování piva	11
3.1 Hlavní kvašení	12
3.2 Dokvašování a ležení piva	13
3.3 Postupy fermentace piva za použití CKT.....	14
3.3.1 Jednofázová výroba piva.....	14
3.3.2 Dvoufázová výroba piva.....	17
4. Cylindricko-kónické tanky (CKT).....	18
4.1 Konstrukce CKT	18
4.2 Umístění a uspořádání CKT	20
4.3 Příslušenství CKT	22
4.4 Chlazení CKT.....	23
4.5 Chladicí média.....	24
5. Teplo vzniklé při kvašení mladiny a teorie výpočtu chlazení CKT	25
5.1 Teplo vzniklé při kvašení mladiny	25
5.2 Teorie výpočtu chlazení CKT	26
5.2.1 Výpočet Nusseltova čísla a součinitele přestupu tepla na straně piva.....	31
5.2.1.1. Obor $Ra < 10^4$	32
5.2.1.2. Obor $10^4 < Ra < 10^9$	32
5.2.1.3. Obor $Ra > 10^9$	33
5.2.2 Výpočet Nusseltova čísla a součinitele přestupu tepla na straně chladicího média	33
5.2.2.1. Obor $Re < R_{crit}$	35
5.2.2.2. Obor $R_{crit} < Re < 2.2 \cdot 10^4$	36
5.2.2.3 Obor $Re > 2.2 \cdot 10^4$	36
6. Vlastní návrh cylindricko-kónického tanku (CKT).....	37
6.1 Volba výstavu pivovaru a hlavních rozměrů CKT	37
6.2 Parametry vsádky a chladicího média.....	40
6.2.1 Vsádka	40
6.2.2 Chladicí kapalina	41
6.3 Výpočet chladicího výkonu	41
6.4 Výpočet přestupu tepla a určení velikosti teplosměnné plochy.....	44
6.4.1 Výpočet součinitele přestupu tepla na straně piva	45
6.4.2 Výpočet součinitele přestupu tepla na straně chladicího média	46
6.4.3 Výpočet součinitele přestupu tepla	47

6.4.4 Výpočet potřebné teplosměnné plochy pro přenos chladícího výkonu	47
6.5 Tlakové ztráty	48
6.6 Shrnutí návrhové a výpočtové části	50
7. Pevnostní výpočty	51
8. Závěr	52
9. Seznam použité literatury	54

1. Seznam použitých symbolů

$c_{p=Cp1}$	měrná tepelná kapacita piva	$[\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$
c_{p2}	měrná tepelná kapacita chladícího média	$[\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$
C	tvarový součinitel	$[-]$
d_{hyd}	hydraulický průměr	$[\text{m}]$
D	průměr spirály	$[\text{m}]$
Gr	Grasshofovo kritérium	$[-]$
k	součinitel prostupu tepla	$[\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}]$
L	výška válce	$[\text{m}]$
L_{char}	charakteristický rozměr	$[\text{m}]$
m_p	Hmotnost piva	$[\text{kg}]$
$\dot{m}_p = \dot{m}_1$	hmotnostní průtok piva	$[\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}]$
$\dot{m}_2 = \dot{M}_A$	hmotnostní průtok chladiva	$[\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}]$
m	Součinitel mezní vrstvy a proudění	$[-]$
Nu	Nusseltovo kritérium	$[-]$
\overline{Nu}	střední hodnota Nusseltova čísla	$[-]$
Nu_l	Nusseltovo kritérium v laminárním proudění	$[-]$
Nu_t	Nusseltovo kritérium v turbulentním proudění	$[-]$
O	smáčený obvod trubky	$[\text{m}]$
Pr	Prandtlovo kritérium	$[-]$
\dot{q}	hustota tepelného toku	$[\text{W}\cdot\text{K}^{-1}]$
Q	teplo	$[\text{J}]$
\dot{Q}	Tepelný výkon	$[\text{W}]$
Ra	Rayleighovo číslo	$[-]$
Re	Reynoldsovo kritérium	$[-]$
Re_{crit}	Kritická hodnota Reynoldsova kritéria	$[-]$
S	teplosměnná plocha	$[\text{m}^2]$
S_p	Plocha průřezu trubky	$[\text{m}^2]$
t_1	Teplota piva	$[\text{°C}, \text{K}]$
t_2	Teplota chladiva	$[\text{°C}, \text{K}]$

t_{s1}	teplota povrchu stěny ze strany piva	[°C, K]
t_{s2}	teplota povrch stěny ze strany chladicího media	[°C, K]
ΔT_{LM}	střední logaritmická teplota, kterou spočteme	[°C, K]
T_{in}	vstupní teplota chladicího media	[°C, K]
T_{out}	výstupní teplota chladicího media	[°C, K]
$T_{t,in}$	teplota stěny trubky na vstupu	[°C, K]
u_{∞}	rychlost proudění kapaliny v trubkách	[m·s ⁻¹]

Řecké symboly

α_1	součinitel přestupu tepla na straně piva	[W·m ⁻² ·K ⁻¹]
α_2	součinitel přestupu tepla na straně chladicího media	[W·m ⁻² ·K ⁻¹]
β	objemová tepelná roztažnost	[°C ⁻¹]
γ	konstanta poměru turbulentního a laminárního proudění	[-]
δ	tloušťka stěny válce	[mm]
λ	součinitel tepelné vodivosti stěny válce	[W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]
ν_1	kinematická viskozita piva	[m ² ·s ⁻¹]
ν_2	kinematická viskozita chladicího média	[m ² ·s ⁻¹]
μ_1	dynamická viskozita piva	[Pa·s]
μ_2	dynamická viskozita chladicího media	[Pa·s]
ξ	Korekční faktor pro turbulentní proudění	[-]
ρ	Hustota	[kg·m ⁻³]
τ	čas	[s]

Zkratky

CKT	cylindricko-kónický tank
EPM	extrakt původní mladiny

2. Úvod

Než se v pivovaru ze vstupních surovin uvaří chutné pivo, musí se uskutečnit mnoho činností a technologických procesů. Od úpravy vstupní vody na požadovanou kvalitu, předpřípravení chmele a přípravy sladiny, která se skládá z mletí sladu, vystírání a následném rmutování. Po scezení sladiny a vyslazení mláta následuje vaření sladiny s chmelem (tzv. chmelovar) v mladinové pánvi, kdy vzniká tzv. mladina. Jakmile jsou z mladiny odloučeny kaly a je zchlazena, přepustí se do kvasných kádí, nebo cylindricko-kónických tanků, kde jsou přidány kvasnice, a probíhá hlavní kvašení mladiny. Po skončení procesu hlavního kvašení se mladé pivo nechává ležet v ležáckých tancích. Posledním, ale ne nezbytným krokem, je filtrace případně pasterace piva, čímž se prodlužuje doba životnosti piva.

Na výsledné chuti piva se podílí jak kvalita vstupních surovin (voda, chmel, slad, ...), tak výrobní postup daného pivovaru. Kvalitu surovin si jednotlivé pivovary velmi hlídají, jelikož každé odchýlení má za následek změnu kvality piva (barva, chuť, vůně).

Tato práce se zabývá fází výroby piva zvanou fermentace, jinak kvašení piva, a návrhem cylindricko-kónického tanku využívaného k tomuto účelu. Kvašení piva je jednou z nejdůležitějších, a technologicky nejsložitějších procedur během výroby piva. V této práci je stručný popis celého děje a druhů technologických postupů, které se dají využít, včetně vybavení potřebného k fermentaci piva.

Během kvašení se cukry obsažené v mladině mění na alkohol, kvůli kterému tento nápoj pijeme. Tento proces se dá rozdělit do dvou hlavních částí, a to hlavní kvašení a dokvašování. Během celého procesu je nutné odvádět ze vsádky teplo. Během hlavního kvašení musíme odvést „kvasné teplo“ uvolňující se při vzniku alkoholu, poté následuje prudké zchlazení na teploty kolem 1 °C a při této teplotě se nechá pivo ležet požadovanou dobu.

Pro návrh cylindricko-kónického tanku je nutné stanovení velikosti teplosměnné plochy, kterou lze určit ze znalosti procesu, a využitím správných výpočtových nebo modelačních prostředků. V práci jsem vypsala základní tepelné pochody a výpočtové metody aplikovatelné na ně. Pro samotný konstrukční návrh fermentačního tanku je také nezbytné provést pevnostní výpočty.

3. Kvašení mladiny a dokvašování piva

Fermentace mladiny za vzniku piva probíhá ve dvou hlavních fázích:

- Hlavní kvašení
- Dokvašování a ležení piva

Při fermentaci mladiny se používají a historicky používaly kvasné kádě z různých materiálů, ležácké sudy a tanky a dnes nejvíce využívané cylindricko-kónické tanky.

Fermentace lze rozdělit podle technologie hlavního kvašení, a to na **hlavní spodní a svrchní kvašení** [1]. Liší se v použitém zařízení pro výrobu, a především technologickými postupy, respektive použitými kvasinkami při fermentaci. Svrchní kvašení probíhá nejčastěji v otevřených kvasných kádích při vyšších teplotách (od 15 do 20 °C). Spodní kvašení piva probíhá za teplot od 8 do 15 °C, dnes probíhá nejčastěji v cylindricko-kónických tancích.

Při využití CKT je rozhodující požadovaný výrobní postup pivovaru. Podle průběhu kvašení a ležení piva v CKT rozeznáváme jednofázovou a dvoufázovou výrobu piva [2]:

- pokud proces hlavního kvašení probíhá v CKT, ze kterého se pouze po skončení procesu separují usazené kvasnice a zbylé mladé pivo se nechá ve stejném CKT dokvasit, jedná se o **jednofázovou výrobu piva**.
- pokud proces hlavního kvašení probíhá v CKT, ze kterého se po skončení procesu mladé pivo přečerpá do druhého CKT, kde proběhne proces dokvašování, jedná se o **dvoufázovou výrobu piva**.

3.1 Hlavní kvašení

Účelem hlavního kvašení mladiny je kontrolovaně zkvasit vyrobený cukernatý roztok, tedy vyrobit z nealkoholické mladiny mladé pivo, které již obsahuje alkohol. Během tohoto procesu se díky činnosti kvasnic uvolňuje teplo, které je nutno odvést tak, aby hlavní kvašení probíhalo při požadované teplotě. V historii probíhalo hlavní kvašení mladiny v **kvasných kádích** z různých materiálů, dnes se k nim připojily **cylindricko-kónické tanky** pro hlavní kvašení. Průběh hlavního kvašení určují tyto faktory [1]:

- složení mladiny a její koncentrace,
- vlastnosti použitých kvasinek,
- teplotní průběh kvašení a jeho regulace,
- doba kvašení,
- stupeň kvasnic a způsob zakvašování,
- dosažený stupeň homogenizace směsi kvasnic a mladiny,
- druh fermentoru a jeho geometrie,
- způsob a intenzita cirkulace,
- podmínky tlaku (kvašení za atmosférického tlaku nebo s mírným přetlakem).

Kvasné kádě se umísťují do prostoru pivovaru zvaných **spilka**. Původně se tyto prostory nacházely ve sklepích pod chladícími stokami, dnes jsou kvasné kádě umísťovány v tepelně izolovaných a chlazených budovách. Při hlavním kvašení se využívají otevřené a uzavřené kvasné kádě různých konstrukcí [2].

Dřevěné kvasné kádě – byly vyráběny nejčastěji z dubu nebo modřínu. Na tvaru kádí v průběhu kvašení nezáleželo. Nejčastěji se však vyráběly ve tvaru komolého kužele. Pokud se vyrábělo svrchně kvašené pivo, které probíhá při vyšších teplotách, přibližně kolem 20 °C, nebyl s chlazením problém. Pokud se však vyrábělo spodně kvašené pivo byla nutnost chladit kvasící mladinu. Před vynálezem strojního chlazení se v pivovarech používaly nádoby s ledem, které plavaly na povrchu mladiny.

Ocelové kvasné kádě – se začaly ve velkém využívat na přelomu 19. a 20. století. V českých zemích jako první instaloval ocelovou kvasnou kád' na Moravě pan František Černý, později je začala využívat naprostá většina pivovarů u nás. Bylo nutné kádě opatřit vnitřním nátěrem,

aby se zabránilo reakci kovové stěny s kyselinami z piva. Pokud byla kvasná kád' vybavena na spodu výpustí, vkládala se do ní „panenka“, což byla krátká trubka, která sahala nad hladinu usazených kvasnic a zamezila při stáčení jejich společnému strhnutí spolu s pivem.

Hliníkové kvasné kádě – se používaly v první polovině 20. století, poté co vznikla technologie bezešvého svařování hliníku, což umožnilo výrobu bezešvého hladkého vnitřního povrchu, což je z biologického hlediska požadováno. Souběžně s ocelovými a hliníkovými kvasnými káděmi se také využívali **betonové kádě**, u nichž samozřejmě byla nutnost vnitřní stěnu opatřit ochranným nátěrem, nebo byly obloženy nerezovými plechy.

V druhé polovině 20. století se pro proces hlavního kvašení (také pro dokvašování a ležení piva) začaly využívat **cylindricko-kónické tanky**, vyráběné z korozivzdorné oceli. Vyrábějí se ve velikostech řádově od několika hektolitrů až po tisíce hektolitrů. Tyto tanky jsou vybaveny na vnějším plášti několika na sobě nezávislými chladíci zónami. Chlazení probíhá buďto přímým odparem čpavku, nebo cirkulací chladícího média, např. glykolu, nebo glycerinu. Jelikož proces hlavního kvašení v CKT probíhá většinou při vnitřním přetlaku vyšším než 0,07 MPa, jedná se o tlakovou nádobu.

3.2 Dokvašování a ležení piva

Hlavním kvašením mladiny vyrobené mladé pivo má dosud nevyrovnanou chuť, není vyčeřené a dostatečně nasycené oxidem uhličitým, a ještě obsahuje nezkvašené cukry. Proto musí při nízké teplotě dokvasit. Dříve se pivo nechávalo dokvasit v **ležáckých sudech** nebo tancích, umístovaných do chladných prostorů zvaných ležácké sklepy. Dnes se nejvíce využívají **ležácké tanky** a **cylindricko-kónické tanky** pro ležení piva, které jsou většinou umístěny na volném prostranství [2]. Teplota ležení piva je kolem 1 °C.

Ležácké sudy – dnes už zřídka používané, se vyráběly z tlustých dubových dužin, které se stahovaly kovovými obručemi. Vyráběly se o obsahu 30 až 150 hl a snesly maximální vnitřní přetlak až 0,25 MPa. Vnitřní stěny sudu se pokrývaly pivovarskou smolou, která se musela v pravidelných intervalech obnovovat. Vybaveny byly dvěma otvory. Jeden byl určen pro narážení a druhý pro „mazání“ piva, kdy se nechal otevřený a nechala se unikat pěna, a potom pro „kroužkování“, tedy přidání kvasící mladiny v průběhu kvašení.

Ležácké tanky – se nejčastěji vyrábí z korozivzdorné oceli, používají se však i železobetonové nebo ocelové ležácké tanky, ty však musí být opatřeny vnitřním povlakem inertním vůči pivu. Ležácké tanky se vyráběly i z hliníku, ale kvůli ceně materiálu se od toho upustilo. Obvykle se vyráběly tanky o velikostech 40 až 400 hl. Protože během dokvašování a ležení piva se tlak, v nádobě pohybuje nad hranicí 0,07 MPa, jedná se tedy o tlakové nádoby.

cyklindricko-kónické tanky – využívané při dvoufázové výrobě piva pro proces dokvašování a ležení se od CKT pro proces hlavního kvašení liší především v chlazení. Chladicí zóny nebývají instalovány na celé válcové a kuželové stěně tanku, ale pouze v jeho horní části, nebo se CKT umístí do chlazených prostorů, stejně jako ležácké sudy a tanky.

3.3 Postupy fermentace piva za použití CKT

Jak jsem již zmínil, existují dva postupy fermentace piva v CKT, **jednofázová a dvoufázová výroba piva**. Liší se požadovanými teplotami během výrobních fází, dobou setrvaní mladiny v tanku a době zchlazení.

3.3.1 Jednofázová výroba piva

Pro tuto metodu je potřebný pouze jeden tank, ve kterém probíhá jak fáze hlavního kvašení, tak dokvašování. Mezi fázemi se z kuželové části tanku odčerpají usazené kvasnice. Jednofázová výroba má tyto přednosti [1]:

- Mladé pivo se po hlavním kvašení nepřečerpává z tanku do tanku, čímž zamezujeme infekci a nechtěnému provzdušnění při transportu, což by vedlo k novému růstu kvasinek a zvýšené tvorbě biacetylu.
- Snižují se ztráty piva díky lepší možnosti separace kvasnic.
- Díky možnosti separace usazených kvasnic mezi procesy dochází ke snížení nebezpečí autolýzy.

- Ekonomické úspory na investičních nákladech za tanky, v energii na přečerpávání mladého piva a v sanitaci, kde náklady mohou být až poloviční oproti dvoufázové výrobě piva.
- Vyšší produkce piva.

Jednofázová výroba piva se vyznačuje vyšší teplotou během hlavního kvašení (teploty zde dosahují hodnot kolem 13 až 14 °C, výjimečně i 20 °C) a vyšším hradícím přetlakem (0,14 až 0,18 MPa). Následuje prudké zchlazení k 0 °C. Díky vyšším teplotám a přetlakům dochází k výrazné úspoře času během fermentace piva.

Pro jednofázovou výrobu byly např. shrnuty nejdůležitější technologické parametry do několika bodů [6]:

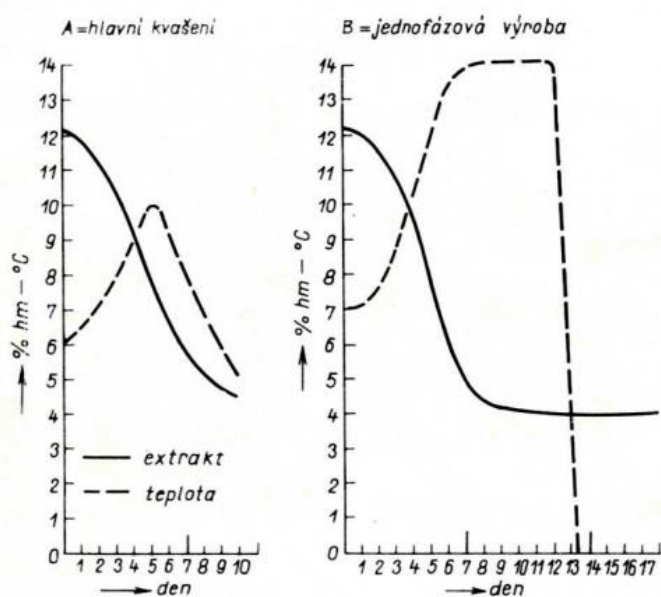
1. Na vstupu je mladina o teplotě 6 až 7 °C.
2. Konečná koncentrace kvasinek: 50 až 70 mg sušiny na 100ml mladiny.
3. Udržovat koncentraci rozpuštěného kyslíku ve spílané mladině okolo 6 mg l⁻¹.
4. Tanky plnit na 92 % celkového objemu, a to nejdéle za 24 hodin. Optimální dobu plnění stanovuje na 15 až 18 hodin.
5. Po naplnění tanku ihned zahradit a udržovat kolem 90 až 100 kPa.
6. Při hlavním kvašení nechat vzrůst teplotu samovolně na 14 °C a na této teplotě (± 1 °C) udržovat během celé doby zrání piva.
7. Usazené kvasnice separovat při maximální teplotě po 144 až 240 h (počítáno od zahrazení tanku). Odběr prováděn do sběrného tanku, ve kterém je nastaven protitlak, o 20 kPa nižší, než je tlak u dna CKT. Po separaci usazených kvasnic se může nechat pivo zrát další den až dva.
8. Zralé pivo je nutno rychle schladit na teplotu 2 až 3 °C, během nejlépe 30 hodin.
9. Po dochlazení na 0 °C se pivo nechá 3 až 7 dní ležet a je připraveno ke stáčení.

Při zachování stejné nebo lepší kvality výsledného produktu, byla pozorována až 60 % úspora výrobního času

U jednofázové výroby piva je fáze dokvašování defacto zbytečná, jelikož mladina díky vyšším teplotám během procesu prokvasí prakticky až na konečný stupeň prokvašení. Hlavním cílem dokvašování a ležení piva při 0 °C je tedy vyloučení a sedimentace kalících látek, které zůstaly v pivě po odčerpání sedimentu. Současně se při nízké teplotě zlepšuje vazba oxidu

uhličitého. Uvedená doba ležení může být libovolně prodloužena, a tím můžeme vyrovnávat běžné výkyvy odbytu piva. Nedoporučuje se však k tomuto kroku sahat z ekonomického hlediska. Vyrovnávání výkyvů je běžně zajištěno dostatečným počtem tanků.

Přes nesporné ekonomické výhody jednofázové výroby piva v CKT většina pivovarů dává přednost dvoufázové výrobě, a to jak ze strachu případné změny charakteristických vlastností piva, tak potřeby inovace, či rozšíření pouze části fermentačního procesu. Problematikou jednofázové výroby piva se podrobněji věnuje například Stichauer [14]. Na obrázku 1 je znázorněn příklad diagramu průběhu úbytku extraktu (koncentrace zkrasitelných cukrů v mladině) a průběhu teploty během jednoho technologického cyklu v případě využití CKT na hlavní kvašení (dvoufázová výroba piva) a jednofázové výroby piva. Díky znalosti fyzikálně-chemických vlastností mladiny (piva) a průběhu kvašení, je možné z podobných diagramů stanovit chladicí výkon potřebný během procesu.



Obr. 1 Příklad možného využití CKT při výrobě 12% piva znázorněné diagramem úbytku extraktu a průběhu teploty v průběhu jednoho technologického cyklu. [12]

3.3.2 Dvoufázová výroba piva

Tento postup je svým provedením podobný tradiční výrobě v kvasných kádích. Začal se využívat především z požadavku využití ležáckých tanků v pivovarech, kde jejich kapacita byla dostatečná a technický stav velmi dobrý. Díky nutnosti přečerpání mladého piva se zvyšují ztráty produktu minimálně o 1 % [6]. Při využití CKT pro dvoufázovou výrobu je možné uvažovat několik variant.

Proces hlavního kvašení probíhá v CKT při podmínkách podobných klasickému kvašení v kvasných kádích. Zákvasná teplota je 5 až 6 °C a maximální teplota kvašení 9 °C, suduje se při zdánlivém prokvašení 65 až 69 % a teplotě 5,5 °C. Dokvašení probíhá po přečerpání v ležáckých tancích při teplotě 1 až 2 °C. CKT pro hlavní kvašení se mohou plnit pouze na 80 % celkového objemu, což snižuje jejich využití. Nižší plnicí objem CKT je potřebný z důvodu pění mladiny během kvašení [1].

Další varianta počítá s fází hlavního kvašení podobnou jednofázové výrobě piva. Po zchlazení piva v CKT na 10 °C je pivo přečerpáno přes průtokový dochlazovač do ležáckého tanku, kde se 6 až 12 dní nechá ležet při teplotě 1 až 2 °C. U těchto dvou variant nastává problém při přechodu ze sterilního prostředí CKT do nesterilního prostředí ležáckých tanků či kvasných kádí.

Poslední varianta počítá s využitím dvou tanků. Technologie hlavního kvašení zůstává shodná s předchozí variantou. Místo do ležáckých tanků se mladé pivo přečerpá do druhého tanku bez chladicího duplikátoru (CKT umístěn v chladném prostředí). U této varianty je dosaženo požadovaného sterilního prostředí během fermentace piva. Tato varianta výroby piva vyžaduje vyšší počet tanků, což vede ke rapidnímu zvýšení investičních nákladů, a to i přes to, že CKT pro ležení piva jsou levnější, díky nižším nárokům na chlazení a výrobní pracnost.

4. Cylindricko-kónické tanky (CKT)

4.1 Konstrukce CKT

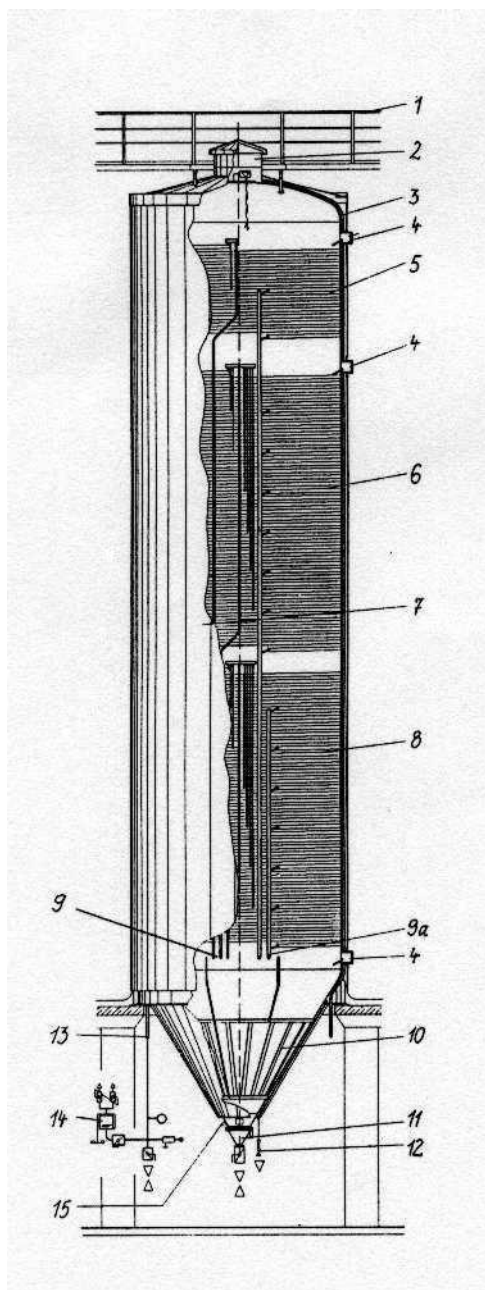
Cylindricko-kónické tanky [1] jsou štíhlé válcové nádoby s horní částí zvanou dóm a s kuželovým dnem. Poměr celkové výšky CKT k průměru válcové části se pohybuje od 1:3 do 1:6. Všeobecně se uznává, že by výška CKT neměla být nad 20 m. Na úhel kuželové části CKT existuje mnoho názorů, většinou se pohybují od 55° do 75°. Vnitřní povrch kuželové části musí být dokonale hladký, aby se zamezilo záchytu kvasnic v nerovnostech.

Pro výrobu CKT se využívají korozivzdorné oceli, nejčastěji oceli označené podle ČSN 17 248 (ekvivalentní označení viz tab.1), což je austenitická, chromniklová ocel, která je stabilizována titanem. Tato ocel je vhodná pro chemický a potravinářský průmysl, dá se použít pro tlakové nádoby do 800°C. Tato ocel je dobře svařitelná a obrobitelná. Z důvodu přísady titanu nelze tuto ocel vyleštit do vysokého lesku. Pro součásti, které nepřijdou do kontaktu s chladivem ani chlazenou suspenzí, se z pravidla využívají levnější korozivzdorné oceli označení ČSN 17 240. Jedná se o nejvíce rozšířenou a používanou korozivzdornou ocel na trhu, která je díky nízkému obsahu uhlíku dobře svařitelná. Odolává povětrnostním podmínkám, mimo přímořských oblastí nebo prostředí, se zvýšenou koncentrací agresivních chemických látek.

	USA	Německo	Česká republika
DIN W.Nr	ASTM ASME AISI	DIN 17 440 DIN 17 441	ČSN ekvivalent
1.4301	304	X5CrNi18 10	17 240
1.4541	321	X6CrNiTi18 11	17 248

Tab. 1 Ekvivalentní označení vybraných ocelí.

Vrchlík CKT, dóm, je řešen jako nástavba CKT a je v něm umístěna řada armatur: přívod a odvod vzduchu a CO₂, přívod mycích roztoků do hlavic, ty mohou být pevné nebo otočné, podtlakové a přetlakové ventily. Jelikož CKT mohou být postaveny na volném prostranství a musí v zimě odolávat chladu, jsou prostory dómu vyhřívány, aby nedošlo k jejich zamrznutí. Je zde také umístěn kontrolní průlez do tanku [1].



1. obslužná lávka
2. dóm
3. odvodnění dómu
4. teploměr
5. chladicí zóna I
6. chladicí zóna II
7. izolace
8. chladicí zóna III
9. přívod chladicího média
- 9a. odvod chladicího média
10. chlazení kónusu
11. uzávěr tanku s plnicím a vyprazdňovacím uzávěrem
12. vzorkovací kohout
13. potrubí na CO₂, vzduch a sanitaci
14. hradicí přístroj
15. sonda prázdného tanku

Obr. 2 Schéma cylindricko-kónického tanku (<http://pivnirecenze.cz>)

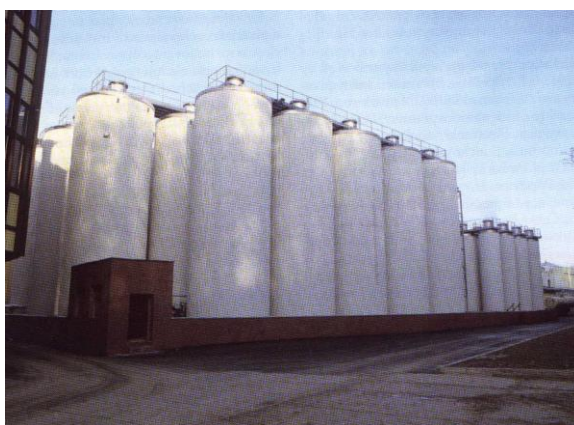
Pokud je CKT umístěn na volném prostranství, instaluje se kolem válcové části tanku izolační vrstva, kterou tvoří tenkostěnný plechový, nebo plastový korpus a vzniklá vzduchová mezera se zaplní polyuretanovou pěnou, která musí být správně nanesena, aby dokonale vyplnila celý prostor a nevznikaly tak tepelné ztráty.

4.2 Umístění a uspořádání CKT

Umístění a uspořádání CKT v provozu je závislé na výrobních postupech a objemu výroby daného podniku. Umístění CKT v provozu je možné, podle [12], řešit dvěma způsoby:

1. CKT, jsou umístěny na volném prostranství. Každý tank musí být opatřen izolačním pláštěm kolem válcové části tanku. Kuželové části tanků jsou umístěny ve společné obslužné místnosti. Pokud je obslužná místnost chlazená, nemusí být tato část tanku opatřena izolačním pláštěm. Díky izolaci tanku, můžeme, při výpočtech spotřeby chladu, zanedbat výměnu tepla mezi tankem a okolím.
2. CKT jsou umístěny uvnitř izolované budovy, ve které se udržuje teplo odpovídající přibližně střední teplotě technologického procesu. Přestože jednotlivé tanky nedisponují izolačním pláštěm, můžeme při výpočtech spotřeby chladu zanedbat výměnu tepla mezi tankem a okolím, nesmíme však zanedbat výměnu tepla mezi vnitřním a vnějším prostředím objektu. Návrhu se podrobněji věnuje [13].

Co se týče uspořádání CKT je otázkou úspory prostoru, možnosti technické proveditelnosti instalace zařízení v provozu, a požadavky na okolní prostor pro obsluhu zařízení. Venkovní instalace se většinou provádí do obdélníkových, či čtvercových tvarů (viz. Obr. 3 a Obr. 4). Vnitřní instalace může vypadat obdobně jako venkovní (viz. Obr. 5), nebo v menších pivovarech podél stěn (viz. Obr. 6).



Obr. 3 Instalace CKT v pivovaru Braník (www.branik.cz)



Obr. 4 CKT Pivovar Ragutis, Litva (<http://www.aedproject.cz>)



Obr. 5 Instalace tanků v budově v pivovaru Prazdroj (www.prazdroj.cz)



Obr. 6 Instalace CKT minipivovar Antoř Slaný (<http://www.pivovarantos.cz>)

4.3 Příslušenství CKT

Jelikož fermentace piva probíhá při přetlaku větším než 0,07 MPa, musí být CKT klasifikovány jako tlakové nádoby. Součástí tlakové nádoby je výrobní štítek s povinnými údaji o tanku a jeho výrobcí, registrační číslo tlakové nádoby s uvedením normy, podle které byla nádoba certifikována. Tlakové nádoby musí být opatřeny pojistným ventilem. Další zařízení potřebná ke správné funkčnosti CKT jsou [25]

přetlakový pojistný ventil – slouží k ochraně tanku před přetlakem vyšším, než pro který je dimenzován a certifikován.

Podtlakový pojistný ventil – zamezuje destrukci tanku při vzniku podtlaku (například při vyčerpávání obsahu tanku čerpadlem). U malých tanků může být nahrazen zpětnou klapkou.

Kvasná zátka – armatura sloužící k vzduchotěsnému uzavření nádoby, chrání pivo před stykem se vzduchem a patogeny v něm. Zajišťuje malý přetlak CO₂ v tanku během procesu kvašení a zároveň zabraňuje jeho přetlakování. U CKT bývá součástí **tzv. hradícího přístroje**.

Hradící přístroj – zařízení pro nastavení tlaku vzduchu zahrnuje nafukovač, nastavovací prvek, pojistný ventil, pružný prvek a lisovací prvek. Nastavovací otvor, vstup a výstup jsou definovány v nafukovacím stroji. Nastavovací otvor, vstup a výstup se navzájem komunikují. Nastavovací prvek je pohyblivý v nafukovacím zařízení. Přetlakový ventil překrývá nastavovací otvor, aby se zabránilo úniku vzduchu z nastavovacího otvoru. Přítlačný prvek je připevněn k nastavovacímu prvku. Elastický prvek je umístěn mezi pojistným ventilem a lisovacím prvkem, v němž je přítlačný prvek jemně nastavitelný tak, že dovoluje uvolnění přebytečného tlaku ventilem. Zároveň plní funkci kvasné zátky.

Inspekční tlakový průřez – vyrábí se kruhový nebo oválný. Jsou to dvířka opatřená gumovým nebo silikonovým těsněním, uzavřená šrouby. Umísťují se do horní části nebo na boční stranu tanku (u menších rozměrů).

Sanitační sprcha– slouží k účinné sanitaci vnitřních ploch tanku. Mycí hlavice, obvykle kulového tvaru, rozstříkuje vodu se sanitačním roztokem a tím čistí a dezinfikuje vnitřní prostor tanku. Mohou být buď pevné, nebo rotační. Přes mycí hlavici a její přípojnou armaturu lze provádět vytlačování piva z tanku pomocí natlakovaného oxidu uhličitého, biogonu nebo dusíku. V praxi se používá sterilní vzduch v kombinaci s malým množstvím vpuštěného oxidu uhličitého, který izoluje hladinu piva od vzduchu.

4.4 Chlazení CKT

Jeho hlavním účelem je [25]:

- Odvod tepla během fermentace při dodržení teplotní křivky.
- Ochlazení hotového produktu na požadovanou teplotu následujícího procesu (dokvašování a ležení, nebo sudování).
- Eliminovat okolní zdroje tepla, např. vnější ohřev CKT umístěného na volném prostranství (zavedení izolace).

Pro cylindricko-kónické tanky se využívají různá chladicí media a různá konstrukční řešení chladících ploch.

Válcová část tanku je zpravidla vybavena jednou až třemi na sobě nezávislými chladíci zónami. U cylindricko-kónických tanků využívaných pro jednofázovou výrobu piva je chlazená i kuželová část tanku. Chlazení může být v praxi realizováno několika způsoby, podle potřebného chladicího výkonu, konstrukce tanku, nebo použitého chladicího media. Mohou to být např. [1]:

- duplikátory s vnitřními přepážkami k usměrnění toku chladicího média,
- nepřímé chlazení na vnější straně CKT z navařených tyčí s profilem půlkruhu, kruhové úseče menší než půlkruh, či nekruhového tvaru (v praxi nejčastější),
- duplikátory s volně stékajícím filmem chladicího media.

Přesné umístění chladících zón na CKT závisí na rozměrech tanku a znalosti maximálních hladin v tanku při požadovaných technologických procesech. Jak jsem již zmínil, chlazení je realizováno soustavou dvou až čtyř samostatně regulovatelných zón. Jedna je umístěna na kónusu a až tři na válcové části tanku. Horní zóna se umísťuje v prostoru s maximální hladinou media v tanku. Pokud je hladina při procesu nad chladicí zónou, nelze v této zóně plně regulovat průběh hlavního kvašení piva a tím může dojít k ovlivnění kvality produktu, nebo jeho znehodnocení. Při aplikaci dvoufázové výroby piva jsou rozdílné výšky hladin při hlavním kvašení a při následném dokvašování (vyšší) a musí se zohlednit při návrhu CKT. Chlazení kuželové části tanku je v současnosti považované za nutnost, zajišťuje celistvou vrstvu sedimentovaných kvasnic a omezuje jejich autolýzu.

4.5 Chladící media

Pokud je tank umístěn v dobře izolovaném prostoru, lze k chlazení využít nucenou cirkulaci vzduchu. Pokud je potřeba chlazení do teplot $+3\text{ }^{\circ}\text{C}$, je možné využití **ledové vody**, pro nižší teploty ekonomicky nepřijatelné, z hlediska nutnosti cirkulace velkého množství vody. Z nutnosti nižších pracovních teplot (kolem 0 až $2\text{ }^{\circ}\text{C}$), se pro chlazení CKT používají **chladící média na bázi solí, směsi glykolu a vody nebo alkoholu** a vody, hojně používaný je přímý **odpar amoniaku** [10].

Chladící média na bázi solí – jinak **solanky** zajišťují provoz s nižšími teplotami. Jsou roztoky anorganických solí (chlorid sodný, vápenatý, hořečnatý), jejich koncentrace ve vodě může být různá od $3,5\%$, což je obvyklá koncentrace mořské vody, do 23% . Koncentrace soli ve vodě definuje bod tuhnutí (od -3 do $-21\text{ }^{\circ}\text{C}$), s rostoucí koncentrací soli ve vodě klesá teplota tuhnutí roztoku. Solanky obsahují chloridy, proto jsou korozivní vůči ocelím.

Směsi glykolů a vody – využívá se především etylenglykol a propylenglykol, který je toxicky nezávadný. Jelikož tyto směsi mají korozivní účinky, přidávají se do nich inhibitory. Etylenglykolové roztoky, ačkoli mají výhodnější hydraulické vlastnosti (nižší viskozita), se v praxi nevyužívají, jelikož etylenglykol je toxický. Typické teploty tuhnutí těchto roztoků jsou -20 až $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Směs vody a alkoholu – je směs vody a ethanolu. Stejně jako u solanky s rostoucí objemovou koncentrací ethanolu v roztoku klesá teplota tuhnutí směsi. Čistý ethanol má teplotu tuhnutí $-114,1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Koncentrace ethanolu ve vodě se pohybuje od 10 do 50 %, což odpovídá teplotě tuhnutí od -4 do $-36\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Přímý odpar amoniaku – u tohoto způsobu odpadá potřebná teplotní diference pro chladicí média. Typická odpařovací teplota je $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ a neměla by být nižší. Největší přednost tohoto chladiva je ve vyrovnané teplotě podél celé chlazené plochy a takovéto chlazení je ekonomicky nejvýhodnější. Jsou s ním ale spojeny vyšší investiční náklady. Přestože je amoniak toxická látka, která při vdechnutí poškozuje dýchací cesty, hojně se v průmyslu využívá.

5. Teplo vzniklé při kvašení mladiny a teorie výpočtu chlazení CKT

5.1 Teplo vzniklé při kvašení mladiny

Pod pojmem „vzniklé kvasné teplo“ si můžeme představit teplo uvolněné z mladiny podle exotermní reakce, zapříčiněné přeměnou cukru v alkohol [15], snížené o energii potřebné k růstu kvasničných buněk a ohřátí kvasného media. Při kvasném procesu nás zajímá množství tepla, které potřebujeme odvést do okolí nebo do chladicího média. Hodnota kvasného tepla se ve většině publikací pohybuje v rozmezích od 120 do 180 kcal.kg⁻¹.

Problematice alkoholového kvašení se věnoval na počátku 20. století věnoval Rubner, který publikoval své závěry a výsledky [23], včetně výsledků měření jiných autorů:

Dubrunfaut 120,9 kcal·kg⁻¹ = 505,12 kJ·kg⁻¹ sacharózy

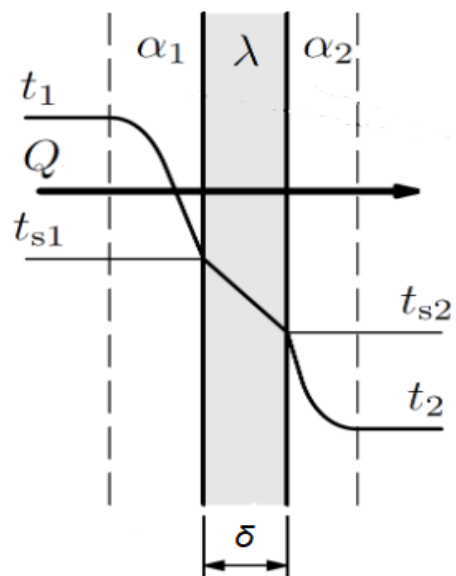
Bouffard 131,5 kcal·kg⁻¹ = 549,41 kJ·kg⁻¹ glukózy

Brown 119,2 kcal·kg⁻¹ = 498,12 kJ·kg⁻¹ maltózy

Rubner 149,5 kcal·kg⁻¹ = 624,61 kJ·kg⁻¹ sacharózy

5.2 Teorie výpočtu chlazení CKT

Při návrhu chlazení CKT se pro předávání tepla dají užít tři základní mechanismy, tj. kondukce, konvekce a sálání, přičemž se uplatňuje především kondukce a konvekce. Jako předloha se uvažuje vedení tepla stěnou nádoby, pokrytou tenkými filmy chladiva a mladiny uvnitř tanku (Obr.7). Na tyto filmy navazují promíchávaná média o konstantních teplotách v celém jejich objemu [1].



Obr. 7 Model Prostup tepla rovinnou stěnou

Základní rovnicí popisující výměnu tepla vedením v rovinné stěně je Fourierův zákon:

$$dQ = -\lambda \frac{dt}{dx} S d\tau \quad (5.1)$$

kde: Q [kJ] – teplo

λ [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$] – součinitel tepelné vodivosti

$\frac{dt}{dx}$ [$\text{K}\cdot\text{s}^{-1}$] – teplotní gradient

S [m^2] – teplosměnná plocha

τ [s] – čas

Pro rovinnou stěnu, s konstantním tepelným tokem platí

$$\dot{Q} = \frac{\lambda}{\delta} (t_{s1} - t_{s2}) S \tau \quad (5.2)$$

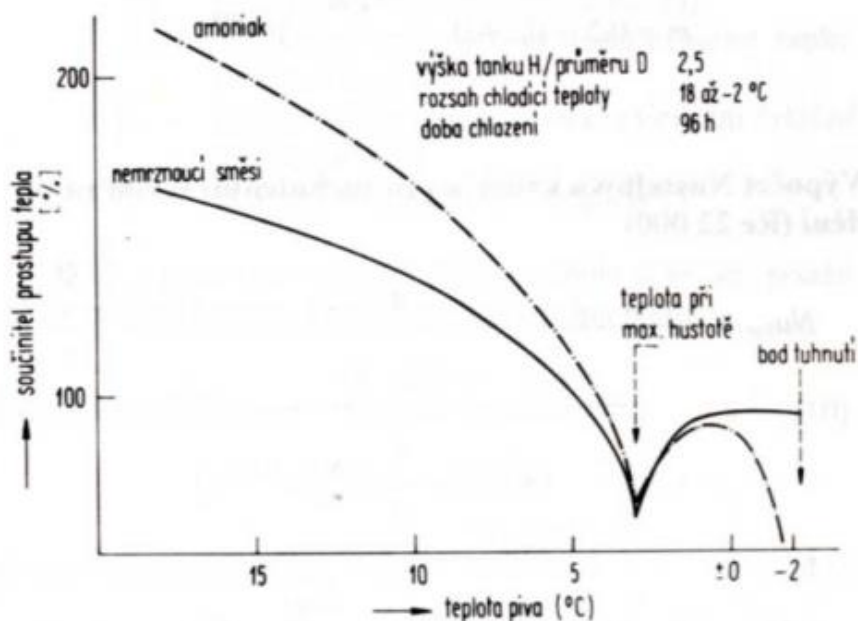
kde: t_{s1}, t_{s2} [°C] – teploty povrchů stěny

δ [m] – tloušťka stěny

\dot{Q} [kW] – tepelný tok

Při kvašení se uvažuje stěna skládající se z filmu piva, vlastní stěny tanku a filmu chladicího média. Usazeniny, které ulpívají na stěnách nádoby jak na vnitřní straně piva, tak na straně chladicího média, představují další odpory při vedení tepla. Kvasnice usazené v tanku jsou znatelný tepelný odpor. Jejich sediment má zhruba poloviční tepelnou vodivost než pivo. Při odvodu tepla je kladen větší odpor na straně piva.

Popis teplotních pochodů komplikuje fakt, že teplotní vodivost kapalných filmů závisí na intenzitě samovolného míchání a rozdílu teplot mezi pivem a stěnou. Samovolné míchání závisí na rozdílu hustot piva u stěny a na vývinu oxidu uhličitého. Minimálních hodnot nabývá v rozmezí od 2,5 do 3,5 °C (viz obr.8), [5].



Obr. 8 Závislost hodnoty koeficientu prostupu tepla k na teplotě piva a druhu chladicího média [5]

Model prostupu tepla předpokládá tři vrstvy (viz Obr.7) s proměnnými hodnotami koeficientů α_1 a α_2 . Celkové sdílení tepla rovinnou stěnou lze vyjádřit jako:

$$\dot{Q} = k(t_1 - t_2)S\tau \quad (5.3)$$

kde: k [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$] – součinitel prostupu tepla

(t_1-t_2) [$^{\circ}\text{C}$] – rozdíl teplot mezi chladicím médiem a pivem

Převrácená hodnota součinitele prostupu tepla je rovna součtu převrácených hodnot koeficientů přestupu tepla:

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2} \quad (5.4)$$

kde: α_1 [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$] – součinitel přestupu tepla na straně piva

α_2 [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$] – součinitel přestupu tepla na straně chladicího media

Množství tepla, které je nutno odvést chlazením je rovno

$$Q = m_p \cdot c_p \cdot \Delta t \quad (5.5)$$

kde: m_p [kg] – hmotnost piva

c_p [$\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$] – měrná tepelná kapacita piva

Δt [K] – rozdíl, o který je potřeba zchladit pivo

Dále jsou potřebné pro výpočet součinitele prostupu tepla použít bezrozměrná kritéria, která jsou definována takto:

$$\text{Nusseltovo kritérium} \quad Nu = \frac{\alpha \cdot L_{char}}{\lambda} \quad (5.6)$$

$$\text{Reynoldsovo kritérium} \quad Re = \frac{u_{\infty} \cdot L_{char}}{\nu} = \frac{u_{\infty} \cdot L_{char} \rho}{\mu} \quad (5.7)$$

$$\text{Prandtlovo kritérium} \quad Pr = \frac{\nu}{a} = \frac{c_p \cdot \mu}{\lambda} \quad (5.8)$$

$$\text{Grasshofovo kritérium} \quad Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot L_{char}^3 \cdot (t_{\infty} - t_s)}{\nu^2} \quad (5.9)$$

kde: u_{∞} [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$] – rychlost proudění kapaliny v trubkách

L_{char} [m] – charakteristický rozměr

ν [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$] – kinematická viskozita

μ [Pa·s] – dynamická viskozita

c_p [$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$] – měrná tepelná kapacita

β [K^{-1}] – objemová tepelná roztažnost

α [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$] – součinitel přenosu tepla

t_{∞} [$^{\circ}\text{C}$] – teplota tekutiny

t_s [$^{\circ}\text{C}$] – teplota stěny

Při popisu nestacionárního přestupu tepla jsou potřebné následující vztahy. V první řadě je to tepelný výkon, který je potřeba ze vsádky odvést, se určí dle následujícího vztahu [8]:

$$dQ = mc_p dT \quad (5.10)$$

Chladicí výkon přiváděný chladicím médiem

$$dQ = \dot{M}_A c_A (T_{A,in} - T_{A,out}) dt \quad (5.11)$$

Spojením předešlých vztahů (5.10 a 5.11) vznikne „nestacionární tepelná bilance“ která má tvar:

$$dQ = mc_p dT = \dot{M}_A c_A (T_{A,in} - T_{A,out}) dt \quad (5.12)$$

kde: \dot{M}_A [kgs⁻¹] – hmotnostní průtok chladiva

c_A [kJ·kg⁻¹·K⁻¹] – měrná tepelná kapacita chladicího média

c_p [kJ·kg⁻¹·K⁻¹] – měrná tepelná kapacita piva

$T_{A,in}$ [K] – teplota chladicího média na vstupu

$T_{A,out}$ [K] – teplota chladicího média na výstupu

Tepelný výkon přivedený chladicím médiem je následně nutné přenést přes teplosměnnou plochu vsádce:

$$dQ = kS \Delta T_{ln} dt = kS \frac{T_{A,in} - T_{A,out}}{\ln \frac{T_{A,in} - T}{T_{A,out} - T}} dt \quad (5.12)$$

Tyto vztahy je možné použít pro popis nestacionárního vedení tepla bez vnitřního tepelného zdroje. Pro popis nestacionárního přestupu tepla s vnitřním tepelným zdrojem (např. kvasné teplo během fermentace) je postup stejný, pouze tepelná bilance uvedená rovnicí 5.12 přejde do tvaru:

$$dQ = mc_p dT = [\dot{M}_A c_A (T_{A,in} - T_{A,out}) + Q^{(g)}] dt \quad (5.13)$$

5.2.1 Výpočet Nusseltova čísla a součinitele přestupu tepla na straně piva

Pro popsání přirozené konvekce ve vertikální válcové nádobě jako je CKT, je vhodné využít pro výpočet střední hodnotu Nusseltova čísla. Pro výpočet lze využít korelaci obecného tvaru [26]

$$\overline{Nu} = C \cdot Ra^m \quad (5.14)$$

kde: Ra [-] – Rayleighovo číslo, které je definováno,

$$Ra = Gr \cdot Pr = \frac{g \cdot \beta \cdot L_{char}^3 \cdot (t_s - t_\infty)}{\nu \cdot \alpha} \quad (5.15)$$

Hodnota konstanty C závisí především na tvaru tělesa, umístění v prostoru a okrajových podmínkách. Hodnota exponentu m závisí především na mezní vrstvě a proudění v ní, které je vyvoláno teplotním polem [26]. Hodnoty konstanty C a exponentu m jsou pro vertikální stěny a válce uvedeny v tabulce 2.

Geometrie	Ra	C	m
Vertikální stěny a válce (výška L)	Pro hodnotu $Ra < 10^4$ metoda nelze použít		
	10^4 až 10^9	0,59	0,25
	10^9 až 10^{13}	0,021	0,40

Tab. 2 Hodnoty C a m v rovnici (5.9), převzato [26]

V tabulce 2 jsou uvedeny některé hodnoty konstant C a m potřebné pro výpočet střední hodnoty Nusseltova čísla (rovnice 5.14) pro svislou stěnu výšky L a svislý válec s $D/L > 35/Gr^{0,25}$. Při výpočtu svislých stěn a válců dosazujeme do \overline{Nu} , Gr a Ra za L_{char} jejich výšku L . Volba kritéria pro výpočet \overline{Nu} závisí především na hodnotě Rayleighova čísla Ra .

5.2.1.1 Obor $Ra < 10^4$

Mezní vrstva na povrchu je příliš silná a z toho důvodu nelze využít k výpočtu použít vztahy 5.14 a 5.15. Analytické a numerické metody jsou složité, proto se pro výpočet použije kritériální vzat, který navrhly Churchill a Chu [24]

$$\overline{Nu} = 0,68 + \frac{0,67Ra^{1/4}}{[1 + (0,492/Pr)^{9/16}]^{4/9}} \quad (5.16)$$

Ověřenou v oborech: $Pr = 0,022$ až 7640

$$Ra = 8 \cdot 10^{-5} \text{ až } 10^8$$

Pro konstantní hustotu tepelného toku, stanovili tito autoři korelaci

$$\overline{Nu} = 0,68 + \frac{0,67Ra^{1/4}}{[1 + (0,437/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \quad (5.17)$$

Ověřenou v oborech: $Pr = 0,022$ až 10^6

$$Ra = 10^{-4} \text{ až } 10^8$$

Při porovnání vztahů 5.16 a 5.17 je viditelné, že při orientačních výpočtech je vliv okrajových podmínek na střední hodnotu Nusseltova čísla je zanedbatelný.

5.2.1.2 Obor $10^4 < Ra < 10^9$

V této oblasti jsou použitelné výpočtové vztahy 5.14 a 5.15 s příslušnými hodnotami konstant C a m z tab. 2. Charakter proudění v mezní vrstvě je laminární. Lze též pro výpočet aplikovat vztah 5.16, nebo 5.17.

Přechod režimu proudění v mezní vrstvě z laminárního do turbulentního, závisí na hodnotě Pr a nelze jej přesně stanovit. Pro vzduch je kritická hodnota Ra přibližně rovna $4 \cdot 10^8$. Pro hodnoty $Pr = 10^3$ až 10^4 se hodnoty Ra pohybují kolem $Ra = 10^{13}$ [4].

5.2.1.3 Obor $Ra > 10^9$

V této oblasti jsou také použitelné výpočtové vztahy 5.14 a 5.15 s příslušnými hodnotami konstant C a m z tab. 2. Pro hodnoty Pr přibližně rovné 1 je při $Ra > 10^9$ režim proudění v mezní vrstvě turbulentní, hodnota m je tak oproti laminárnímu režimu stanovena na $m = 1/3$. Součinitel přestupu tepla α zde nezávisí na výšce nádoby L [4].

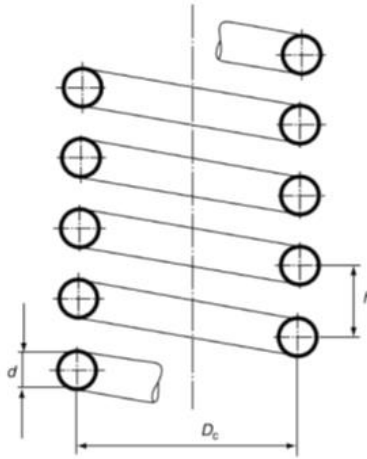
5.2.2 Výpočet Nusseltova čísla a součinitele přestupu tepla na straně chladicího média

Jak již bylo řečeno v kapitole 4.4, chladicí médium může proudit v duplikátoru, nebo v kanálcích různých průřezů, navinutých ve šroubovici a navařený na boku válcové části tanku. Pro popis nucené konvekce ve šroubovici se nejlépe hodí výpočet nucené konvekce podle Gnielinského [21], který je však pro trubice o kruhovém průřezu. Pro náš příklad však bude chladicí had tvořen spirálou o průřezu tvaru kruhové úseče. Pro dosažení do bezrozměrných kritériálních rovnic Nu , Re , Pr , musíme za charakteristický rozměr dosazovat hydraulický průměr trubice d_{hyd} , který se určí dle:

$$d_{hyd} = \frac{4 \cdot S_p}{O} \quad (5.18)$$

kde: S_p [m²] – plocha průřezu nekruhového kanálu

O [m] – smáčený obvod



Obr. 9 Geometrie trubkového hadu – zde znázorněn kruhový průřez, v řešeném případě nekruhového průřezu je průměr trubky nahrazen hydraulickým průměrem převzato z [17]

Při proudění kapaliny zakřivenou trubkou (obrázek 9) vznikají sekundární toky. Ty se pohybují směrem od středu ke stěně trubky a zde utvoří symetrickou dvojici vírů. To vede k intenzifikaci konvektivního přenosu tepla oproti rovné trubce. Největší intenzifikace je docíleno v oblasti laminárního proudění.

Intenzita sekundárního toku je závislá na relativním zakřivení (d_{hyd}/D) šroubovice, kde d_{hyd} je hydraulický průměr trubice a D je průměr spirály.

Díky účinku sekundárních toků dochází ke stabilizaci laminárního toku a tím dochází k posunutí hranice mezi laminárním a turbulentním prouděním k vyšším hodnotám Re se zvyšujícím se relativním zakřivením (d_{hyd}/D).

Kritická hodnota Reynoldsova čísla se tak spočte podle Schmidta [16] jako

$$Re_{crit} = 2300 \left[1 + 8.6 \left(\frac{d_{hyd}}{D} \right)^{0.45} \right] \quad (5.19)$$

Nusseltovo číslo pak vypočteme ze vztahu:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot d_{hyd}}{\lambda} \quad (5.20)$$

kde: α [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$] – součinitel přestupu tepla

d_{hyd} [$kg \cdot s^{-1}$] – hydraulický průměr trubky

λ [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$] – součinitel tepelné vodivosti

Pro výpočet Reynoldsova čísla využijeme vztahu:

$$Re = \frac{u_{\infty} \cdot d_{hyd}}{\nu} \quad (5.21)$$

kde: u_{∞} [m·s⁻¹] – rychlost proudění kapaliny v trubkách

ν [m²·s⁻¹] – kinematická viskozita

Fyzikální vlastnosti chladiva z tabulek odčítáme při střední teplotě T_s , kterou spočteme jako aritmetický průměr vstupní a výstupní teploty chladiva

$$T_s = \frac{(T_{in} + T_{out})}{2} \quad (5.22)$$

Volba kritéria pro výpočet Nu závisí především na hodnotě Reynoldsova čísla Re .

5.2.2.1 Obor $Re < Re_{crit}$

Součinitel přestupu tepla v laminární oblasti se zabývali např. Brauer [19] nebo Janssen [20]. Zjišťovali závislost součinitele přenosu tepla na korekčním faktoru (l/d). Názory na tuto závislost nejsou jednotné. Bylo dokázáno, že korelace, kterou navrhl Schmidt [16], se s naměřenými výsledky shoduje s odchylkou $\pm 15\%$. Hodnoty byly naměřeny ve vodě ($2 < Pr < 5$) a v oleji ($100 < Pr < 200$).

$$Nu = 3,66 + 0,08 \left[1 + 0,8 \left(\frac{d_{hyd}}{D} \right)^{0,9} \right] Re^m \cdot Pr^{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_w} \right)^{0,14} \quad (5.23)$$

a konstantu m spočteme jako

$$m = 0,5 + 0,2903 \cdot \left(\frac{d_{hyd}}{D} \right)^{0,194} \quad (5.24)$$

kde: Pr [-] – Prandtlovo číslo vyhodnoceno při střední teplotě T_s

Pr_w [-] – Prandtlovo číslo vyhodnoceno při teplotě stěny T_{is}

5.2.2.2 Obor $Re_{crit} < Re < 2.2 \cdot 10^4$

Gnielinski [21] dokázal, že v přechodové oblasti $Re_{crit} < Re < 2.2 \cdot 10^4$ platí lineární interpolace Nusseltova čísla mezi Re_{crit} a $Re = 2.2 \cdot 10^4$. Odpovídá tomu rovnice

(5.25)

$$Nu = \gamma \cdot Nu_l(Re_{crit}) + (1 - \gamma)Nu_t(Re = 2,2 \cdot 10^4) \quad (5.25)$$

kde: $Nu_l(Re_{crit}) = Nu$ jako v rovnici 5.23 pro $Re = Re_{crit}$

$Nu_t(Re = 2,2 \cdot 10^4) = Nu$ jako v rovnici 5.27 pro $Re = 2.2 \cdot 10^4$

Konstantu γ spočteme pomocí vztahu

$$\gamma = \frac{2,2 \cdot 10^4 - Re}{2,2 \cdot 10^4 - Re_{crit}} \quad (5.26)$$

5.2.2.3 Obor $Re > 2.2 \cdot 10^4$

Schmidt [16] stanovil také Výpočtový vztah pro plně rozvinuté turbulentní proudění $Re > 2.2 \cdot 10^4$. Měření provedl na vzduchu ($Pr = 0,7$) a ve vodě ($2 < Pr < 5$). Výsledky měření Gnielinského [21] jsou shodné, s odchylkou $\pm 15 \%$ (při plně rozvinuté turbulentním proudění), jako podle korelace

$$Nu = \frac{\left(\frac{\xi}{8}\right) \cdot Re \cdot Pr}{1 + 12,7 \sqrt{\frac{\xi}{8}} \cdot (Pr^{\frac{2}{3}} - 1)} \left(\frac{Pr}{Pr_w}\right)^{0,14} \quad (5.25)$$

Korekční faktor ξ pro turbulentní proudění ve spirálovém potrubí [22] je:

$$\xi = \left[\frac{0,3164}{Re^{0,25}} + 0,03 \cdot \left(\frac{d_{hyd}}{D}\right)^{0,5} \right] \left(\frac{\mu_w}{\mu_s}\right)^{0,27} \quad (5.26)$$

kde: μ_w [Pa·s] – dynamická viskozita chladiva při teplotě stěny

μ_s [Pa·s] – dynamická viskozita chladiva při střední teplotě T_s

6. Vlastní návrh cylindricko-kónického tanku (CKT)

6.1 Volba výstavu pivovaru a hlavních rozměrů CKT

Pro návrh hlavních rozměrů tanku je nutné znát několik základních údajů, jako například výstav pivovaru, technologie výroby piva (jednofázová, nebo dvoufázová), nebo předpokládané umístění tanku v provozu.

Navrhovaný CKT by měl být využit pro **jednofázovou výrobu 12 stupňového piva (tj. extrakt původní mladiny EPM = 12 %)** v minipivovaru s ročním výstavem do 10 000 hl. Pomocí webové stránky (<http://demo.mfox.cz>) byl proveden průzkum pivovarů v ČR zaměřený především na pivovary s výstavem od 1 000 až 10 000 hl·rok⁻¹. Z dostupných dat bylo zjištěno, že v české republice je okolo 240 pivovarů, z čehož většinu (až 200) tvoří pivovary do 10 000 hl·rok⁻¹. Skoro 150 pivovarů má roční výstav menší než 1 000 hl a ze zbytku je na 40 pivovarů s výstavem mezi 1 000 a 3 500 hl·rok⁻¹ a zbytek je s výstavem mezi 6 500 až 10 000 hl·rok⁻¹.

Pro návrh CKT bude uvažován model pivovaru s varnou o produkci 15 hl mladiny na jednu várku. Během varného dne stihne dvě várky, což je 30 hl mladiny za den. V pivovaru se pivo vaří tři dny v týdnu, proto je v provozu instalováno 10 CKT, každý o objemu **37 hl** a celkový roční výstav je **4230 hl piva**.

Doba jednoho cyklu technologického postupu jednofázové výroby byla stanovena podle Štichauera [14]. Na obrázku 10 jsou vypsány doby trvání jednotlivých technologických kroků pro 10 a 12 % mladinu včetně doby potřebné pro sanitaci. Celková doba technologického procesu je tak součtem časů na:

- zaplnění tanku (12 h),
- doba po počátek intenzivního chlazení (240 h),
- ležení při nízké teplotě (144 h),
- manipulace s tankem – plnění, stáčení (48 h),
- sanitace (1 h)

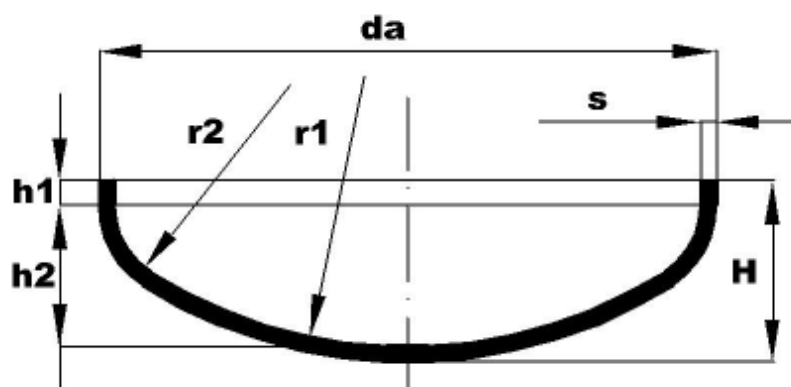
V součtu je tedy na proběhnutí jednoho technologického cyklu potřeba **445 hodin**.

Technologické parametry	10% mladina	12% mladina
Zaplnění tanku (% z celkového objemu)	92	92
Doba plnění tanku [h]	6 až 12	6 až 12
Zákvasná dávka [ml . hl ⁻¹]	500	500
Zákvasná teplota [°C]	6 až 7	6 až 7
Maximální teplota při kvašení a zrání [°C]	14 až 15	14 až 15
Přetlak nad kvasící mladinou [kPa]	98	98
Odpouštění kvasnic	5. až 6. den po zahrazení	7. až 8. den po zahrazení
Doba zrání [h]	48 až 72	72
Počátek intenzivního chlazení	8. až 9. den po zahrazení	10. až 11. den po zahrazení
Ležení při nízké teplotě [h]	72	144
Technologická výrobní doba, dny	11	16
Manipulační doba [plnění, stáčení, sanitace] [h]	48	48
Sanitace	výplach studenou vodou 5 až 10 min cirkulace horkým louhem (2,5%) 30 až 35 min cirkulace horkou vodou (75–80 °C) 15 min výplach studenou vodou 10 min	

Pozn.: Celkový objem tanku: 400 hl

Obr. 10 Technologický postup jednofázové výroby piva [14]

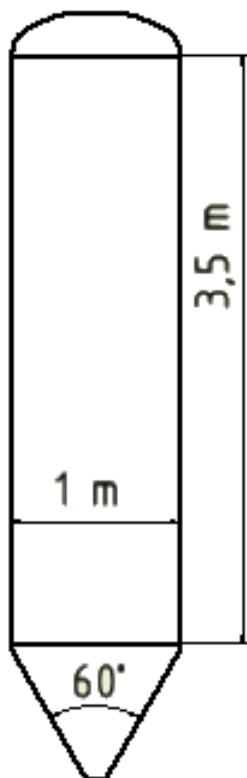
Rozměry tanku – pro navolený průměr tanku bylo zvoleno klenuté víko z online dostupného katalogu na (<http://www.zyksal.cz>), tvar včetně funkčních rozměrů je ukázán na obr.11.



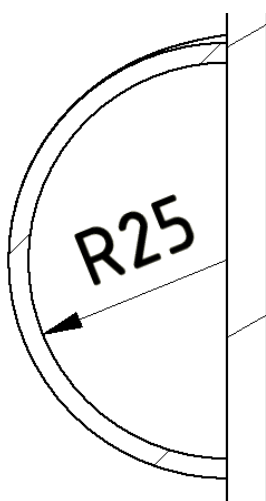
da	1000 mm
s	5 mm
r1	800 mm
r2	154 mm
h1	20 mm
h2	252 mm
H	277 mm
hmotnost ca	50 kg
objem ca	141 l

Obr. 11 Torosférické víko včetně rozměrů převzato z <http://www.zyksal.cz>

Následovalo dopočítání kuželové část CKT, která při podstavě o průměru **0,995 m** a úhlu kužele **60°**, má objem přibližně 225 l, do požadovaného objemu 3500 l tak zbývá 3134 l (po odečtení objemu víka a kuželové části). Výška válcové části tanku je tak stanovena na **3,5 m**. Základní rozměry navrhovaného tanku jsou ukázány na obrázku 12 a na obrázku 13 je ukázaná geometrie chladicího pláště.



Obr. 12 Základní rozměry navrhovaného CKT



Obr. 13 Profil duplikátoru

6.2 Parametry vsádky a chladicího média

6.2.1 Vsádka

Vsádka během procesu stahování a dochlazování mění své vlastnosti, pro výpočet byly použity tepelně-fyzikální vlastnosti mladiny a zeleného piva, vždy při střední teplotě procesu. Což znamená pro mladinu je to teplota 9°C a pro dochlazování je to teplota 2,5°C (viz. tab.3).

Parametr			Mladina E=12% T=9°C	Zelené pivo E=3,3% T=2,5 °C
Hustota	ρ	[kg.m ⁻³]	1055	1030
Měrná tepelná kapacita	c_p	[J.kg ⁻¹ K ⁻¹]	3370	4060
Tepelná vodivost	λ	[W.m ⁻¹ K ⁻¹]	0,62	0,558
Kinematická viskozita	ν	[m ² .s ⁻¹]	2,35x10 ⁻⁷	2,40x10 ⁻⁶
Dynamická viskozita	μ	[Pa.s]	2,48x10 ⁻³	2,47x10 ⁻³
Koeficient objemové roztažnosti	β	[K ⁻¹]	8,8x10 ⁻⁵	8°C = 5,90x10 ⁻⁵ 4°C = 1,60x10 ⁻⁵ 3°C = 0 1°C = -5x10 ⁻⁵

Tab. 3 Tepelně-fyzikální vlastnosti vsádky (zdroj: [9] a internet)

Pro další výpočty byla zanedbána teplotní změna hustoty, tepelné vodivosti, měrné kapacity a viskozity, z důvodu nepatrné změny těchto veličin v daném rozsahu pracovních teplot.

6.2.2 Chladicí kapalina

Jak již bylo uvedeno dříve, jsou 3 základní druhy chladiv (kapitola 4.5). Chladiva na bázi amoniaku a jeho přímého odparu (duplikátor CKT je přímo v roli výparníku), chladiva na bázi glykolu, např. monopropylenglykol a chladiva na bázi glycerinu.

V této práci bylo zvoleno ekologicky nejšetrnější chladivo z těchto tří variant, a to chladivo na bázi glycerinu. Přesněji chladivo dostupné pod obchodním názvem „**Bohemiacool G-12**“. Tepelně-fyzikální vlastnosti tohoto chladiva byly poskytnuty jeho dodavatelem a jsou shrnuty v následující tabulce:

Parametr			BOHEMIACOOOL G-12 glycerin T=-4°C
Hustota	ρ	[kg.m ⁻³]	1089
Měrná tepelná kapacita	c_p	[J.kg ⁻¹ K ⁻¹]	3788
Tepelná vodivost	λ	[W.m ⁻¹ K ⁻¹]	0,466
Kinematická viskozita	ν	[m ² .s ⁻¹]	5,56x10 ⁻⁶
Dynamická viskozita	μ	[Pa.s]	6,05x10 ⁻³

Tab. 4 Tepelně-fyzikální vlastnosti chladiva Bohemiacool G-12

6.3 Výpočet chladicího výkonu

U CKT pro jednofázovou výrobu piva jsou tři různé fáze odvodu tepla, kde každá požaduje jiný chladicí výkon. Pro návrh je stěžejní nejvyšší hodnota chladicího výkonu a pro tu se CKT navrhne. Jednotlivé fáze jsou:

- fermentace – odvod kvasného tepla při 14 °C (udržení přibližně konstantní teploty),
- stahování – ochlazení vsádky z kvasné teploty (14 °C) na teplotu 4 °C (pro sedimentaci a následnou separaci kvasnic),
- dochlazení – dochlazení vsádky ze 4 °C na teplotu ležení 1 °C.

Chladicí výkon při fermentaci

Chladicí výkon při fermentační fázi je skoro úměrný reakčnímu teplu vzniklému během přeměny cukru na alkoholu. Chladicí výkon lze stanovit podle vztahu 6.1

$$\frac{dQ}{dt} = -\Delta H_r \frac{dc}{dt} \quad (6.1)$$

kde: ΔH_r [kJ·kg⁻¹] - reakční teplo, pro výpočet $\Delta H_r = 624,6 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ což je rovno reakčnímu teplu podle (RUBNER 1904) viz kapitola 5.1 – odpovídá reakčnímu teplu vznikajícímu při exotermické reakci přeměny glukózy, maltózy a maltotriózy na alkohol.

$\frac{dc}{dt}$ – změna koncentrace zkvasitelných cukrů v čase.

Pro zjištění změny koncentrace dc/dt jsem použil semiempirický model kvašení (vztah 6.2), který popsal Volf et al. (viz [7] a [8]).

$$\frac{dc}{dt} = -k \cdot T \cdot c^a (c_0 - c + k_2)^b (1 - k_3 \cdot P) \quad (6.2)$$

kde: a, b, k_1, k_2 a k_3 – empirické konstanty modelu – viz [7] a [8].

T [°C] – Teplota kvašení

t [dny] – doba kvašení

c_0 [kg·kg⁻¹] – počáteční koncentrace zkvasitelných cukrů

c [kg·kg⁻¹] - konečná koncentrace zkvasitelných cukrů

P [kPa] – přetlak v CKT

Pro výpočet chladicího výkonu potřebného k odvedení kvasného tepla byly použity následující parametry:

Počáteční extrakt	$E_0=12,66 \text{ kg/hl}$	$c_0=0,12 \text{ kg/kg}$
Koncový extrakt	$E=3,3 \text{ kg/hl}$	$c=0,033 \text{ kg/kg}$
Teplota kvašení	$T=14 \text{ °C}$	
Přetlak v CKT	$P=36 \text{ kPa}$	
Doba kvašení	$t=5,6 \text{ dní}$	

Chladicí výkon při stahování a dochlazení

Chladicí výkon nutný ke stahování z kvasné teploty 14 °C na teplotu 4 °C lze vypočítat z množství tepla, které musíme ze vsádky odebrat (rovnice 6.3) v požadovaném čase (rovnice 6.4), viz také [5]. V tomto případě je požadovaná doba stahování 20 hodin.

$$Q = m \cdot c_p (T - T_1) \quad (6.3)$$

a

$$\dot{Q} = \frac{Q}{t_s} \quad (6.4)$$

kde: m [kg] – plnicí objem CKT

c_p [kJ·kg⁻¹·K⁻¹] – měrná tepelná kapacita piva

T [°C] – teplota zeleného piva v CKT na konci hlavního kvašení (14 °C)

T_1 [°C] – konečná teplota stahování (4 °C)

t_s [s] – doba stahování

Výpočet chladicího výkonu pro fázi dochlazování na teplotu ležení je zcela identický jako výpočet chladicího výkonu ke stahování piva, pouze se změní výpočtové teploty na $T_1=4^\circ\text{C}$, a $T_2=1^\circ\text{C}$ a doba procesu na 48 hodin. Vztahy pak vypadají

$$Q = m \cdot c_p (T_1 - T_2) \quad (6.5)$$

a

$$\dot{Q} = \frac{Q}{t_d} \quad (6.6)$$

kde: m [kg] – plnicí objem CKT

c_p [kJ·kg⁻¹·K⁻¹] – měrná tepelná kapacita piva

T_2 [°C] – konečná teplota dochlazení (1 °C)

t_d [s] – doba dochlazení

Vypočtené hodnoty chladicích výkonů jsou shrnuty v tabulce 5. Z této tabulky je vidět, že nejvyšší požadavek chladicího výkonu je během fáze stahování a na tento požadovaný chladicí výkon bude dimenzována teplosměnná plocha CKT. Výpočtem určenou hodnotu velikosti teplosměnné plochy je vhodné následně poněkud předdimenzovat z důvodu nepřesnosti některých výpočtových vztahů.

Chladicí výkon	[W]
Hlavní kvašení	433
stahování	1 481
dochlazení	218

Tab. 5 Vypočtené hodnoty chladicího výkonu

6.4 Výpočet přestupu tepla a určení velikosti teplosměnné plochy

Výpočet přestupu tepla byl prováděn pro maximální zjištěný chladicí výkon, který je potřeba během fáze stahování (viz tabulka 5), tj. ochlazení vsádky CKT z teploty během hlavního kvašení (14 °C) na teplotu při níž budou kvasnice sedimentovat a následně se odčerpají, tj. 4°C.

Výpočet přestupu tepla je v tomto případě řešen jako integrální problém, tzn. nebudou určovány lokální hodnoty součinitele přestupu tepla.

Aby bylo možné určit potřebnou velikost teplosměnné plochy (z rovnice 5.12), je nutné nejprve určit hodnotu součinitele prostupu tepla k (dle rovnice 5.4). Pro výpočet součinitele prostupu tepla k je ovšem nejprve nutné vypočítat příslušné součinitele přestupu tepla:

- na straně chladicího média – nucená konvekce ve spirálním kanále
- na straně ochlazovaného zeleného piva – přirozená konvekce

6.4.1 Výpočet součinitele přestupu tepla na straně piva

Jedná se o problematiku přirozené konvekce, která byla popsána v předcházejících kapitolách. Během stahování předpokládáme, že již byla zcela ukončena fáze hlavního kvašení a nedochází tedy k vývinu CO₂, tedy ani k promíchávání vsádky unikajícím CO₂, což by přestup tepla zlepšovalo.

Pro výpočet součinitele přestupu tepla v případě přirozené konvekce ve svislém válci bylo nejprve nutné vypočítat hodnotu Rayleighova čísla dle rovnice 5.15 pro tyto parametry:

L_{char} – výška válce: 3,5 m

t_s – teplota stěny: 10,8 °C

$t_{nekonečno}$ – teplota piva: 14 °C

g – tíhové zrychlení: 9,81 m·s⁻²

$Ra = 2,9 \cdot 10^{11}$

Jedná se tedy o případ turbulentního proudění v mezní vrstvě a pro určení Nusseltova kritéria Nu použijeme vztah 5.14 s hodnotou konstanty $C=0,021$ a exponentem $m=0,4$. Výsledná hodnota $Nu = 807,9$.

Součinitel přestupu tepla pak vypočítáme dle rovnice 5.6 s výše určené hodnoty kritéria Nu.

Součinitel přestupu tepla na straně piva je $\alpha = 143,1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$.

6.4.2 Výpočet součinitele přestupu tepla na straně chladícího média

V tomto případě se jedná o problematiku nucené konvekce v kanále navinutého ve šroubovici – viz kapitola 5.2.2. pro následující geometrii:

Geometrie kanálu – jedná se o polovinu trubky vnitřního průměru 50 mm

Průtočný průřez $S_p = 0,00196\text{m}^2$

$d_{\text{hyd}} = 0,0609\text{ m}$

Průměr spirály $D = 1\text{ m}$

Návrhová rychlost chladícího média v kanále: $u = 0,5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, tomu odpovídá objemový průtok 1 smyčkou (při paralelním řazení) $V = 0,05\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ a hmotnostní průtok chladícího média $M_A = 189,7\text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$.

Nejprve bylo nutné vypočítat hodnotu Reynoldsova kritéria dle rovnice 5.21 a rozhodnout o charakteru proudění.

Vypočtená hodnota $Re = 5779$

Kritická hodnota Re (dle rovnice 5.19) = 7792 -

proudění je tedy laminární, pro určení hodnoty $Nu = f(Re, Pr)$ byly použity rovnice 5.23 a 5.24.

Použitá hodnota Prandtlova čísla $Pr = 49,2$.

Vypočtená hodnota Nusseltova kritéria dle rovnic 5.23 a 5.24: $Nu = 101,1$

Hodnota součinitele přestupu tepla na straně chladícího média (dle rovnice 5.6) vychází $\alpha = 776,4\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$.

6.4.3 Výpočet součinitele prostupu tepla

Pro výpočet hodnoty součinitele prostupu tepla k byla použita rovnice 5.4. Vzhledem k velkému průměru tanku, je prostup tepla zakřivenou stěnou (reálně válec) nahrazen postupem pro rovinnou desku.

Pro výpočet součinitele prostupu tepla k byly použity následující hodnoty:

- součinitel přestupu tepla na straně piva $\alpha = 143,1 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ (kapitola 6.4.1)
- součinitel přestupu tepla na straně chladícího média $\alpha = 776,4 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ (kapitola 6.4.2)
- tloušťka stěny tanku: 5 mm
- tepelná vodivost materiálu tanku: $15 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$

Výsledná hodnota součinitele prostupu tepla: $k = 116,1 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$

6.4.4 Výpočet potřebné teplosměnné plochy pro přenos chladícího výkonu

Potřebná velikost teplosměnné plochy byla vypočtena dle vzorce 5.12, jehož úpravou a řešením této diferenciální rovnice získáváme následující závislost teploty vsádky na čase (viz – citace, skripta Žitný – tepelné pochody 2):

$$\frac{T_A' - T}{T_A' - T_1} = \exp \left[- \frac{\dot{M}_A c_A \tau}{Mc} \left(1 - e^{-\frac{kS}{\dot{M}_A c_A}} \right) \right] \quad (6.6)$$

kde $T(\tau=0) = T_1$ je počáteční teplota vsádky.

Protože v našem případě známe teplotu chladícího média na vstupu (T_A' byla volena – 3 °C), počáteční teplotu vsádky ($T_1=14$ °C) i cílovou teplotu vsádky ($T= 4$ °C) i čas potřebný k vychlazení vsádky, a protože máme určen i součinitel prostupu tepla a známe hmotnostní průtok chladícího média kanálem (viz kapitola 6.4.2), můžeme z této rovnice přímo určit potřebnou velikost teplosměnné plochy S .

Pokud by nám vypočtená velikost potřebné teplosměnné plochy vyšla větší než navržená velikost, bylo by možné např. volit i poněkud vyšší rychlost proudění v kanále. Zde je ovšem limitující tepelný odpor na straně piva. Úprava rychlosti proudění chladicího média v kanále by se na celkovém součiniteli prostupu tepla k projevila pouze nepatrně. Další možností by bylo snížit teplotu chladicího média na vstupu, ale to by mohlo způsobit namrzání vsádky na vnitřní stěně CKT. Tato námraza by se pak negativně projevila jako další tepelný odpor a negativně by ovlivnila i výsledný produkt.

Pokud nám vychází vypočtená velikost potřebné teplosměnné plochy menší než navržená, nejedná se zde o problém, pouze vsádku vychladíme rychleji. Případně je možné snížit rychlost proudění, nebo vhodným směšováním upravit teplotu chladicího média na vstupu.

Vzhledem k tomu, že použité výpočtové vztahy pro určení jednotlivých součinitelů přestupu tepla jsou vztahy semiempirické, čili jejich přesnost se může pohybovat v rozmezí až +/- 15 %, je vhodné skutečnou teplosměnnou plochu poněkud předimenzovat.

6.5 Tlakové ztráty

Pro správný návrh, a to především pro volbu ideální rychlosti proudění chladicího média, je důležité zjištění tlakových ztrát, které vznikají při průtoku chladicího média duplikátorem. Volba vyšších hodnot rychlosti proudění má příznivý vliv na intenzifikaci přenosu tepla (vyšší součinitel přestupu tepla na straně chladicího média a vyšší součinitel prostupu tepla) a zkrácení času k vychlazení vsádky, ale při vyšších rychlostech proudění též významně rostou třecí tlakové ztráty.

Jednotlivé chladicí zóny CKT se sestavují z několika paralelně spojených smyček a také jednotlivé chladicí sekce jsou pak propojeny paralelně. Při sériovém zapojení chladicích zón by tlakové ztráty rapidně vzrostly. Ztráty se potom počítají pouze z jedné chladicí smyčky.

Výpočet třecí tlakové ztráty vychází z Darcy-Weissbachovy rovnice [9]:

$$\Delta p_z = \xi \frac{l}{d_{hyd}} \frac{\rho \cdot u_\infty}{2} \quad (6.7)$$

kde: ξ [-] - součinitel třecí ztráty

ρ [kg·m⁻³] – hustota chladicího media

l [m] – rozvinutá délka šroubovicového hadu

d_{hyd} [m] – hydraulický průměr (určený podle rovnice 5.14)

u_∞ [m·s⁻²] – rychlost proudění chladicího media

V případě laminárního proudění se součinitel třecí ztráty určí jako:

$$\xi = \frac{A}{Re} \quad (6.8)$$

kde: A [-] – konstanta závisající na geometrii průřezu kanálu.

Pro náš případ, profilu tvaru kruhové úseče, je hodnota $A=62,3$ [13].

V případě přechodového a turbulentního proudění se použije vztah uvedený v rovnici 5.26.

Nejdelší smyčka chladicího potrubí v tomto případě je dlouhá **26,7 m** a tlaková ztráta v něm je **5,1 kPa**.

6.6 Shrnutí návrhové a výpočtové části

Rozměry tanku

Válcová část: průměr – **1 m**

výška – **3,5m**

Kuželová část: vrcholový úhel kužele **60 °**

Klenuté víko: rozměry na obrázku 10 (viz. Kapitola 6.1)

Celkový objem tanku je **37 hl**, během hlavního kvašení je plněn na zhruba 75 % (denní várka pivovaru 30 hl) a pro fázi ležení je doplněn na požadovaných 92%.

Prosop tepla a teplosměnná plocha

Použité a navolené hodnoty.

Maximální chladič výkon - **1 481,4 W** (pro fázi stahování)

Stahování piva – ze **14 °C** na **4 °C**

Požadovaná doba stahování – **20 h a méně**

Vstupní teplota chladič média - **-3 °C**

Rychlost proudění chladič média – **0,5 m·s⁻¹**

Součinitel prostupu tepla k – **116,1 W·m⁻²·K⁻¹**

Vypočtená teplosměnná plocha – $S = 1,2 \text{ m}^2$

- volená teplosměnná plocha je předimenzována o více než 100 % - **3,2 m²** z důvodu zanedbání výměny tepla mezi tankem a okolím (nejsou známy teplotní podmínky umístění tanku v provozu a vysoké nepřesnosti vztahů použitých pro výpočty (např. vztahy 5.23 a 5.25, jejichž přesnost je $\pm 15 \%$.)
- pro součinitel přestupu tepla α na straně piva byly použity vztahy pro turbulentní režim v mezní vrstvě (viz. Kapitola 5.2.1.3). Součinitel přestupu tepla na straně piva tak vyšel **89,7 W·m⁻²·K⁻¹**

- na straně chladicího média, se při zvoleném hmotnostním průtoku chladiva $2,144 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ a profilu chladicí šroubovice (viz.) jedná o laminární proudění a byly tak použity vztahy 5.23 a 5.24 (viz. Kapitola 5.2.2.1.) a Součinitel přestupu tepla na straně chladicího média tak vyšel **$776,4 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$**

Tlaková ztráta v potrubí je – **5,1 kPa**

7. Pevnostní výpočty

Pro návrh cylindricko-kónického tanku jsou nutné pevnostní výpočty, jelikož jde o tlakovou nádobu (viz. Kapitola 4.3). Pro jejich provedení byla využita norma ČSN 69 0010 Tlakové nádoby stabilní. Pro návrh byly použity zejména tyto části z této normy:

- 4.2 Výpočet pevnosti. Všeobecná část pro nádoby z oceli
- 4.5 Výpočet pevnosti. Válcové části nádob
- 4.6 Výpočet pevnosti. Kuželové části nádob
- 4.7 Výpočet pevnosti. Klenutá dna nádob
- 4.12 Výpočet pevnosti. Vyztužování otvorů
- 4.17 Výpočet pevnosti. Duplikátorové pláště
- 4.21 Výpočet pevnosti. Opěrné uzly nádob
- 7.1 tlak pro tlakovou zkoušku

Navržený cylindricko-kónický tank vyhovuje všem pevnostním výpočtům které byly provedeny. Vlastní pevnostní výpočty jsou uvedeny v příloze č. 1.

Všechny výpočtové vztahy v příloze č. 1. byly převzaty z normy „ČSN 69 0010 Tlakové nádoby stabilní. Technická pravidla.“.

Z provedených pevnostních výpočtů byly stanoveny všechny tloušťky stěn skořepin, přírub a chladicího pláště. Z výpočtů také vzešel maximální dovolený vnitřní přetlak **[p] = 0,73 MPa**, který udává pevnost kuželové části (rovnice 20/příloha 1), a maximální dovolený vnitřní přetlak v duplikátorovém plášti **[p] = 1,53 MPa**.

8. Závěr

Tato práce byla zaměřena na problematiku kvašení piva, které se dělí na hlavní kvašení a ležení piva. V první části byly přiblíženy některé pojmy z procesu výroby piva, jako je jednofázová a dvoufázová fermentace piva, či spodní nebo svrchní hlavní kvašení. Dále byla věnována pozornost používaným nádobám a technologiím při tomto procesu.

V druhé části této práce byl proveden návrh cylindricko-konického tanku. Pro návrh CKT jsou potřebné znalosti procesu (teploty během něj, podtlak a fyzikálně-chemické vlastnosti pивní mladiny a zeleného pivo vzniklého z ní). Pro stanovení rozměrů tanku se vycházelo ze znalosti objemu denní výroby daného provozu. V tomto případě byl stanoven na 30 hl mladiny za den. Jelikož mladina při kvašení pění, plní se tanky v této fázi na 75 % svého objemu. Celkový objem navrženého tanku je tak 37 hl.

Při znalosti celkového objemu, potažmo hlavních rozměrů tanku bylo potřeba stanovit maximální požadovaný chladicí výkon a potřebnou teplosměnnou plochu k odvedení vzniklého tepla. To je potřebné odvádět během fermentace hned 3x. Během hlavního kvašení („kvasné teplo“), zchlazení a poslední je dochlazení. V tomto případě byl nejvyšší požadovaný chladicí výkon rovem 1,481 kW. Ten je potřeba na zchlazení celého objemu ze 14 na 4 °C. Přestože se na chlazení používá hojně čpavek, v této práci bylo zvoleno chladivo na bázi glycerinu, které je šetrnější k životnímu prostředí.

Pro stanovení teplosměnné plochy bylo nutné vyhledat v dostupné literatuře vhodné výpočtové vztahy vzhledem ke zvolené konstrukci aparátu, zejména vztahy pro určení součinitele přestupu tepla při podmínkách přirozené konvekce ve svislých válcových nádobách ve formě $Nu=f(Ra)$. Za použití Fourierova zákona, Nusseltových korelací pro přirozenou konvekci ve svislé válcové nádobě a Nusseltových korelací pro nucenou konvekci v duplikátorovém plášti byl stanoven součinitel prostupu tepla $k = 80,3 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$. Pomocí určeného součinitele prostupu tepla k byla metodou řešení nestacionárního přestupu tepla dopočtena teplosměnná plocha. Protože použité korelace pro výpočet jednotlivých součinitelů přestupu tepla nejsou zcela přesné, proto byla výsledná teplosměnná plocha navržena jako předdimenzovaná s celkovou plochou 3,2 m² (tj. skoro o 100 % více než vypočtená hodnota).

Poslední částí této práce je výkres navrženého CK tanku a série pevnostních výpočtu nutných k potvrzení správnosti konstrukce. Návrh CKT z pevnostního hlediska vyhovuje.

9. Seznam použité literatury

- [1] *Pivovarství: teorie a praxe výroby piva*. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2010. ISBN 978-80-7080-734-7.
- [2] CHLÁDEK, Ladislav. *Pivovarnictví*. Praha: Grada, 2007. Řemesla, tradice, technika. ISBN 978-80-247-1616-9.
- [3] ŠESTÁK, Jiří a Rudolf ŽITNÝ. *Tepelné pochody II: výměníky tepla, odpařování, sušení, průmyslové pece a elektrický ohřev*. Vyd. 2. V Praze: Nakladatelství ČVUT, 1997. ISBN 80-010-3475-5.
- [4] ŠESTÁK, Jiří a František RIEGER. *Přenos hybnosti, tepla a hmoty*. Vyd. 3. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004. ISBN 80-010-2933-6.
- [5] Felgentraeger, W.; Huppmann, Kitzingen, „Výpočet teplosměnné plochy cylindrokónických tanků,“ *Kvasný průmysl*, sv. 38, č. 1, pp. 17-20, 1991.
- [6] M. Kahler, a T. LEJSEK, „Využití cylindrokónických tanků v pivovarství,“ *Kvasný průmysl*, sv. 33, č. 8-9, pp. 269-274, 1987.
- [7] P. Volf, J. Votruba a G. Basařová, „Modelování kvašení piva v CKT 1.část,“ *Kvasný průmysl*, sv. 38, č. 4, pp. 102-105, 1992.
- [8] P. Volf, J. Votruba a G. Basařová, „Modelování kvašení piva v CKT 2. část,“ *Kvasný průmysl*, sv. 38, č. 5, pp. 132-135, 1992.
- [9] J. Šesták, J. Bukovský a M. Houška, *Tepelné pochody - Transportní a termodynamická data (skriptum)*, 5 editor, Praha: ČVUT, 2004.
- [10] A. Kratochvíle, „Chlazení a výroba piva,“ *Kvasný průmysl*, sv. 31, č. 10, pp. 227-232, 1985.
- [11] A. Kratochvíle, „Chlazení a výroba piva I.,“ *Kvasný průmysl*, sv. 31, č. 11, pp. 251-257, 1985.
- [12] A. Kratochvíle, „Chlazení a výroba piva III.,“ *Kvasný průmysl*, sv. 32, č. 3, pp. 52-58, 1986.

- [13] A. Kratochvíle, „Chlazení a výroba piva IV. Chlazení prostorů,“ *Kvasný průmysl*, sv. 32, č. 4, pp. 78-80, 1986.
- [14] J. Štichauer a M. Kahler, „Výroba piva jednofázovým způsobem,“ *Kvasný průmysl*, sv. 32, č. 12, pp. 306-309, 1986.
- [15] T. Lejsek, „Teplo vzniklé při kvašení mladiny,“ *Kvasný průmysl*, sv. 15, č. 12, pp. 266-268, 1969.
- [16] Schmidt EF (1967) *Warmeübergang und Druckverlust in Rohrschlangen*. Chem -Ing -Techn 39:781–789
- [17] VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen, *VDI Heat Atlas*, Heidelberg: Springer, 2010.
- [18] R. W. Johnson, Editor, *The Handbook of Fluid Dynamics*, Boca Raton: CRC Press, 1998.
- [19] Bauermeister K, Brauer H (1979) *Laminare Strömung und Wärmeübergang in Rohrwindeln und Rohrspiralen*. VDI Forschungsh., no. 593, 49 pp., VDI Verlag Düsseldorf
- [20] Janssen LAM, Hoogendorn CJ (1978) *Laminar convective heat transfer in helically coiled tubes*. *Int J Heat Mass Transfer* 21:1197–1206
- [21] Gnielinski V (1986) *Heat transfer and pressure drop in helically coiled tubes*. *Proc 8th Int Heat Transfer Conf, San Francisco, Hemisphere, Washington DC*, vol. 6, pp. 2847–2854
- [22] Mishra P, Gupta SN (1979) *Momentum transfer in curved pipes. I. Newtonian fluids*. *Ind Eng Chem Process Des Dev* 18:130–137
- [23] M. RUBNER, „Die Umsetzungswärme bei der Alkoholigärung.“ *Archiv für Hygiene* pp. 260, 355. 1904
- [24] S.W. Churchill, H.H.S. Chu,: “Correlation equations for laminar and turbulent free convection from a vertical plate.” *I.J. Heat a Mass Transfer*, 18 s. 1323, 1975
- [25] *Cylindrokónické tanky tlakové - Pivní tanky. Úvod - Pivní tanky* [online]. Copyright © Pivní tanky . cz [cit. 14.08.2017]. Dostupné z: <http://www.pivnitanky.cz/nabidka/nadoby/cylindrokonicke-tanky-tlakove/>

- [26] V. B. Tishin, A. Novoselov, A. A. Fedorov a A. V. Chebotar, „Hydrodynamics and heat transfer in free convection conditions,“ Process and Food Production Equipment, sv. 3, pp. 24-31, 2016.