

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV PROCESNÍ A ZPRACOVATELSKÉ TECHNIKY



**PŘESTUP TEPLA V CYLINDRO-KÓNICKÉM
FERMENTAČNÍM TANKU**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Vedoucí práce: Ing. Jaromír Štancl, Ph.D.

2019

BC. KAREL ILAVSKÝ

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Ilavský** Jméno: **Karel** Osobní číslo: **420458**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav procesní a zpracovatelské techniky**
Studijní program: **Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Procesní technika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Přestup tepla v cilindro-kónickém fermentačním tanku

Název diplomové práce anglicky:

Heat transfer in a cylindrical-conical fermentation vessel

Pokyny pro vypracování:

Proveďte literární rešerši zaměřenou na popis přirozené konvekce ve štíhlých válcových vertikálních nádobách (např. ve formě $Nu=f(Ra, Pr...)$). Proveďte tepelný výpočet cilindro-kónického fermentačního tanku s využitím standardních kritériálních vztahů dostupných v literatuře s využitím poznatků z literární rešerše a získané výsledky porovnejte s výsledky numerické simulace, případně s experimentem.

Seznam doporučené literatury:

Basařová a kol. Pivovarství - Teorie a praxe výroby piva, VŠCHT Praha, 2010. Články v odborných vědeckých časopisech a dále dle doporučení vedoucího práce.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

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

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

Ing. Jan Skočilas, Ph.D., ústav procesní a zpracovatelské techniky FS

Datum zadání diplomové práce: **23.04.2019**

Termín odevzdání diplomové práce: **02.08.2019**

Platnost zadání diplomové práce: _____

Ing. Jaromír Štancl, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

prof. Ing. Tomáš Jirout, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Anotační list

Jméno autora:	Karel
Příjmení autora:	Ilavský
Název práce česky:	Přestup tepla v cylindro-kónickém fermentačním tanku
Název práce anglicky:	Heat transfer in a cylindrical-conical fermentation vessel
Rozsah práce:	Počet stran: 64 Počet obrázků: 43 Počet tabulek: 7 Počet příloh: 0
Akademický rok:	2018/2019
Jazyk práce:	Čeština
Studijní program:	B2345 Strojní inženýrství
Studijní obor	Procesní technika
Vedoucí práce:	Ing. Jaromír Štancl, Ph.D.
Konzultant práce:	Ing. Jan Skočilas, Ph.D.
Zadavatel:	ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ú12118

Anotace česky:

Diplomová práce se zabývá chlazením piva v cylindro-kónických fermentačních tanků z kvasné teploty na teplotu ležení. Nejprve byly pro výpočet přenosu tepla nalezeny korelace Nusseltova čísla uvnitř tanku. Dále byl vytvořen CFD model cylindro-kónického tanku, který zkoumal přenos tepla v tanku. Cílem této diplomové práce je porovnat výsledky korelací Nusseltova čísla s CFD simulací a zjistit tak přibližnou chybu těchto korelací.

Anotace anglicky:

The diploma thesis focuses on beer cooling inside cylindrical-conical fermentation vessels from fermentation temperature to lagering temperature. First, research on Nusselt number correlation inside the tank was conducted. Further CFD model of the cylindrical-conical vessel was created for the purpose of heat transfer analysis. The objective of the diploma thesis is to compare Nusselt number correlation with the results of CFD simulation, thereby determine the approximate deviation of Nusselt number correlations.

Klíčová slova: Přestup tepla, Přirozená konvekce, cylindro-kónický tank, pivo, Nusseltovo číslo, CFD

Klíčová slova anglicky: Heat transfer, Natural convection, cylindrical-conical vessel, beer, Nusselt number, CFD

Čestné prohlášení

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

V Praze dne:

.....
Karel Ilavský

Poděkování:

Rád bych tímto poděkoval Ing. Jaromíru Štanclovi, Ph.D. za cenné rady, připomínky a odborné vedení této diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Janu Skočilasovi, Ph.D. za pomoc s CFD simulací.

1 OBSAH

1	Obsah	1
2	Úvod	3
3	Proces	4
3.1	Jednofázová výroba piva	4
3.2	Dvoufázová výroba piva	5
4	Chlazení.....	6
5	CKT.....	7
5.1	O CKT	7
5.1.1	Vlastnosti širokých tanků.....	7
5.1.2	Vlastnosti vysokých tanků.....	8
5.2	Konstrukční řešení.....	8
5.3	Výhody CKT	9
6	Přenos tepla	9
6.1	Přirozená konvekce.....	9
7	Bezrozměrná čísla pro přirozenou konvekci	10
7.1	Nusseltovo číslo	11
7.2	Prandtlovo číslo	11
7.3	Rayleightovo číslo	11
8	Korelace Nusseltova čísla	12
8.1	Rodríguez	12
8.2	Y.S.LIN - AKINS	13
8.3	Oliveski	14
8.4	Hiddink	15
8.5	W.LIN - ARMFIELD.....	16
9	CFD.....	17
9.1	O CFD	17
9.2	Jak to probíhá.....	17
9.3	Rovnice řešené při CFD	18
9.4	Metoda konečných objemů	19
10	Výsledky z článku	20
11	Výpočet tepla	22
12	Závěry z rešerše.....	23
13	CFD simulace	24
13.1	Geometrie.....	24
13.2	Sít'	24
13.2.1	Ortogonální kvalita.....	25

13.2.2	Skewness kvalita	26
13.3	Nastavení Výpočtu	27
14	Výsledky z CFD Modelu	30
14.1	Ověření výsledků	30
14.2	Výsledky	34
15	Výsledky z Korelací	41
15.1	Rodriguez	42
15.2	Y.S.LIN - AKINS	45
15.3	Oliveski	47
15.4	Hiddink	49
16	Porovnání výsledků	52
17	Závěr	54
18	Seznam použitých zkratk a symbolů	55
19	Seznam obrázků	57
20	Seznam tabulek	58
21	Reference	59

V českých zemích se již od nepaměti vaří pivo, přičemž v roce 1842 se v Plzni začalo vařit pivo spodně kvašené, které potřebuje pro své kvašení a následné ležení nízké teploty. Těchto teplot bylo nejdříve dosahováno ve sklepních lednicích, které byly přes zimu zaváženy ledem. S vývojem technologií bylo nahrazeno chlazení ledem průmyslovým chlazením. Další rozvoj pak nahrazuje spilky, ve kterých doposud pivo kvasilo, Cylindro-kónickými tanky s chlazeným pláštěm [1]. Tyto tanky byly nejčastěji vybaveny chlazeným pláštěm s přímým odparem amoniaku. Chlazení amoniakem má dobré vlastnosti s ohledem na přenos tepla, ale amoniak je dráždivá látka a pokud dojde k expozici vysoké koncentrace může dojít k poškození plic, a dokonce ke smrti. Jelikož pivovary mají velké nároky na chlazení, musí mít velké zásoby amoniaku [2]. Tento fakt přináší administrativní komplikace. Navíc s technickým rozvojem a růstem měst se pivovary, které dříve byly na okraji měst, se nyní nachází v centrech měst, a tedy v případě havárie by došlo k ohrožení mnoha lidí a následným velkým finančním ztrátám pro pivovar. Proto se hledají způsoby, jak chlazení amoniakem nahradit. Bohužel nejsou použitelné žádné látky, které by měly vhodný výparný bod, a tedy je třeba využít nepřímého chlazení. Jeden z nápadů bylo použít ledovou vodu. Zde však dochází k problému příliš velkého potřebného průtoku, když je třeba zchladit pivo k teplotám blízkých 0 °C. Další možností je do vody přidat soli, které sníží její bod tuhnutí, čímž je odstraněn problém s velkým průtokem, ale vzniká nový problém, že soli ve vodném roztoku budou působit na tank korozivně. Prozatím nejvýhodnější používanou látkou je propylen-glykol v roztoku s vodou. Kde voda dává dobré teplosměnné vlastnosti a propylen-glykol snižuje bod tuhnutí [3].

Jelikož je snaha přejít z přímého chlazení na nepřímé, je potřeba zjistit jaké konstrukční zásahy je třeba provést do stávajících tanků. Proto se tato práce zabývá korelacemi Nusseltova čísla pro vnitřek tanku. Díky těmto korelacím můžeme zjistit součinitel přestupu tepla uvnitř tanku a se součinitelem přestupu tepla chladícího média určit, zda v případě předělání tanku bude stávající teplosměnná plocha dostačující. Pro tento účel byla provedena rešerše vhodných korelací Nusseltova čísla na jejichž základě byly spočítány součinitele přestupu tepla uvnitř nádoby. Tyto součinitele byly porovnány s výsledky CFD simulace. Tato simulace byla provedena s parametry, které použil Takamota [4] při svém experimentu. Simulace byla ověřena na základě průběhu teplot, které naměřil Takamota ve svém experimentu. Pro všechny výpočty byly použity stejné parametry pro jasné porovnání výsledků. Úmyslem bylo provést ověření výsledků také vlastním experimentem na CK tanku na České zemědělské univerzitě. Bohužel na jejich aparatuře došlo k závadě, a tak experiment nebylo možné v rámci předkládané práce provést.

3 PROCES

Při výrobě piva se setkáme s různými procesy. Nejprve dojde ke smíchání horké vody s našrotovaným sladem, tento proces se nazývá vystírání. Následuje proces rmutování, kdy dochází k postupnému ohřevu a k povaření celého díla nebo jeho části. Při rmutování je důležité dodržet konkrétní rychlosti ohřevu a prodlevy na důležitých teplotách. Následným procesem je scezování, kdy se z díla odstraní pluchy, což jsou nerozpustitelné obaly zrn, kterých je třeba se před následnými procesy zbavit. Scezená část se nazývá sladina. Následujícím procesem je chmelovar. Při chmelovaru dochází k vaření sladiny s chmelem. Výsledkem je mladina. Poté je potřeba vytvořit příznivé podmínky pro kvasnice. Mladina se musí provzdušnit a zchladit na teplotu příznivou pro kvasnice. Když je mladina zchlazena a provzdušněna, jsou přidány kvasnice a dochází k fermentaci, která probíhá několik dní. Na konci fermentace vzniká takzvané zelené pivo, které obsahuje poměrně málo navázaného oxidu uhličitého. Proto je zelené pivo prudce zchlazeno, aby mohl následovat proces ležení piva, za kterého dojde k navázání oxidu uhličitého a stabilizaci chuti piva. Prudké zchlazení navíc způsobí sedimentaci kvasnic, které jsou následně odstraněny. Po ležení se může provádět filtrace. Na konec dochází ke stáčení a expedici.

Tato práce se zabývá procesem prudkého zchlazení na konci fermentace. Podle Kratochvíle [5], je pro dosažení dobré stability piva vhodná fáze dokvašování za teploty $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ po dobu jednoho týdne nebo za teploty $-0,5$ až $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ po dobu dvou týdnů. Tyto teploty se dodržují jen u piv spodně kvašených, u svrchně kvašená piva se dokvašují za teplot $13-16\text{ }^{\circ}\text{C}$ po dobu 8 až 15 dní. Zelené pivo se zchlazuje z teploty hlavního kvašení, která se běžně pohybuje od 13 do $14\text{ }^{\circ}\text{C}$, ale může být až $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Toto zchlazení je důležité provést do 30 hodin.

Cílem dokvašování, jak uvádí Basařová [3], je syčení a fixace CO_2 se současným vyčeřením piva a zajištěním organoleptické stability. Dále také zmiňuje důležitost rychlosti zchlazení. Jelikož při rychlém zchlazení vysrážené látky tvoří velké shluky, což usnadňuje jejich separaci.

Pro tento proces existují dva nejpoužívanější technologické postupy: jednofázová a dvoufázová výroba piva.

3.1 JEDNOFÁZOVÁ VÝROBA PIVA

Při jednofázové výrobě piva probíhá hlavní kvašení i dokvašování v jedné nádobě. To přináší některé výhody:

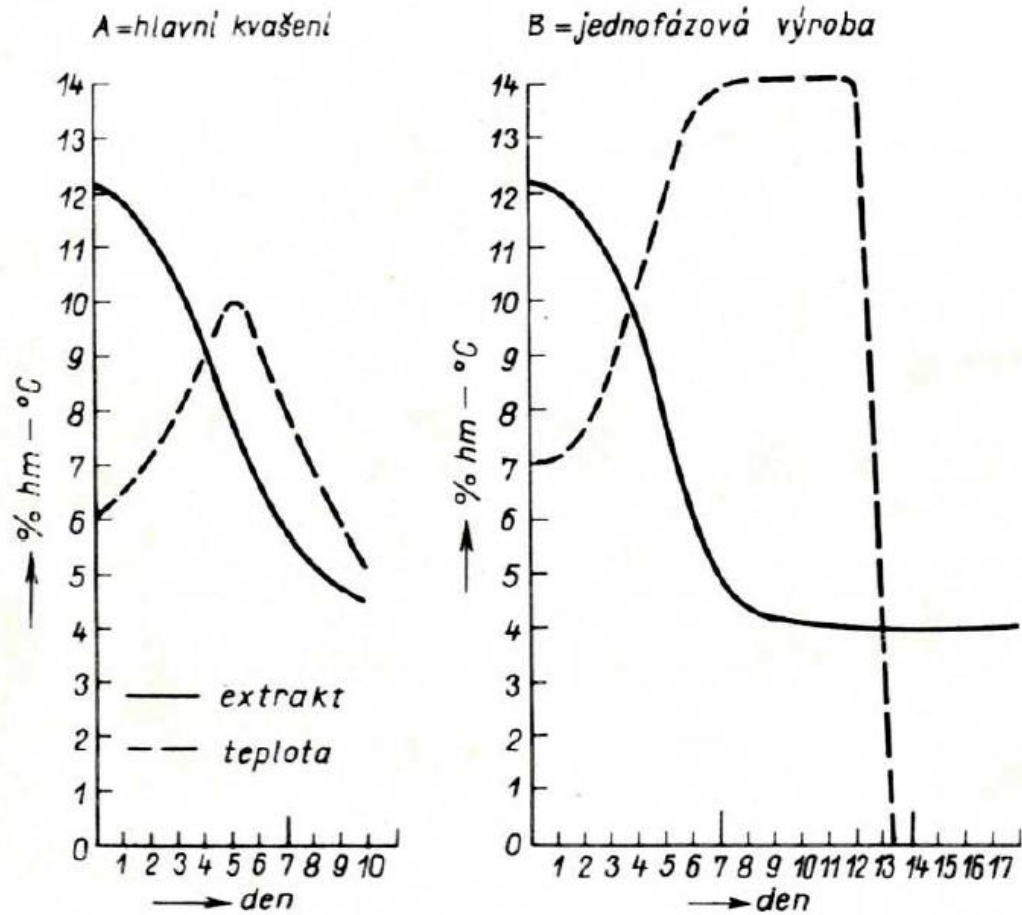
- Díky tomu že se pivo nepřecherpává z nádoby do nádoby se snižuje riziko kontaminace produktu a také nežádoucího provzdušnění
- Přináší lepší možnost oddělování kvasinek což má za následek redukci ztrát
- Zvyšuje produktivitu výroby
- Ekonomický úspornější díky menším nákladům na tank, na energii pro přečerpávání a na sanitaci.

Typický příklad jednofázové výroby piva uvádí Kahler [6]:

- Nejprve naplníme CKT zchlazenou a provzdušněnou mladinou společně s potřebnými kvasnicemi (mladina je zchlazena na 6 až $7\text{ }^{\circ}\text{C}$). CKT má být naplněn z 92% za nejdéle 24 hodin. Optimální doba plnění je 15-18 hodin.
- Po naplnění tanku dochází k jeho zahrazení a udržuje se v něm přetlak $90-100\text{ kPa}$.
- Následuje kvašení, při kterém se vyvíjí teplo. Teplotu necháme samovolně vystoupit na $14\text{ }^{\circ}\text{C}$. A na této teplotě jí budeme udržovat.

- Po uplynutí kvašení (doba závisí na technologii), se odpustí usazené kvasnice.
- Nakonec dojde k zchlazení na teplotu 1 až 2 °C. A následuje ležení.

Na obr.1 je znázorněn průběh teplot a úbytek extraktu při jednofázové výrobě a při využití CKT pouze k hlavnímu kvašení (dvoufázová výroba piva).



Obrázek 1 - Průběh teplot a úbytku extraktu při kvašení piva [7]

3.2 DVOUFÁZOVÁ VÝROBA PIVA

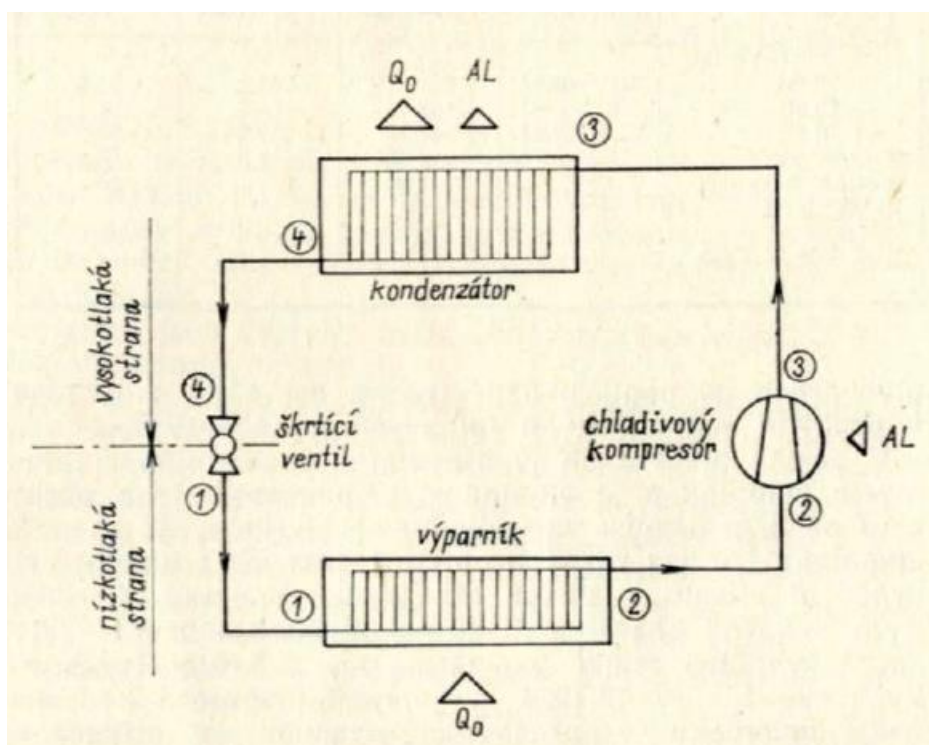
Při dvoufázové výrobě se po konci hlavního kvašení a po odpuštění kvasnic pivo přečerpává buď do maloobjemových ležáckých nádob, velkoobjemových ležáckých nádob anebo do ležáckých CKT.

Typickým příkladem podle Basařové [3] je hlavní kvašení v CKT za teploty 5 až 6 °C, kdy maximální teplota nesmí překročit 9 °C. Tato část fermentace trvá deset až dvanáct dní. Poté se mladé pivo přečerpá do ležáckého CKT, přičemž se ochladí průtokovým chladičem na 0 až -1 °C a nasýtí se intenzivně CO₂. Poté probíhá dokvašování po dobu pěti až sedmi dní.

4 CHLAZENÍ

V potravinářském průmyslu se setkáváme s potřebou výroby chladu (podle první termodynamické věty bychom měli spíše říci k odvodu tepla). Proto se využívají chladicí oběhy, které mohou být buď kompresorové nebo absorpční. Podle Kratochvíle [8], se s absorpčním chlazením v pivovarnické praxi nesetkáme, proto se jí dále nebudeme věnovat.

Schéma kompresorového chlazení je možné vidět na obr. 2. Na schématu lze vidět, že v bodě 1 je chladicí látka v kapalné fázi o nízké teplotě a tlaku přiváděna do výparníku kde je jí předáno teplo a díky nízkému tlaku dojde k jejímu výparu. V bodě 2 je chladicí látka přiváděna na kompresor kde je zvýšen její tlak. V bodě 3 je chladicí látka v plynné fázi přivedena na kondenzátor a díky vyššímu tlaku dochází k její kondenzaci a současně odvodu tepla do okolí. V bodě 4 přichází chladicí látka na škrtkovací ventil, kde dojde ke snížení jejího tlaku a celý proces se opakuje.



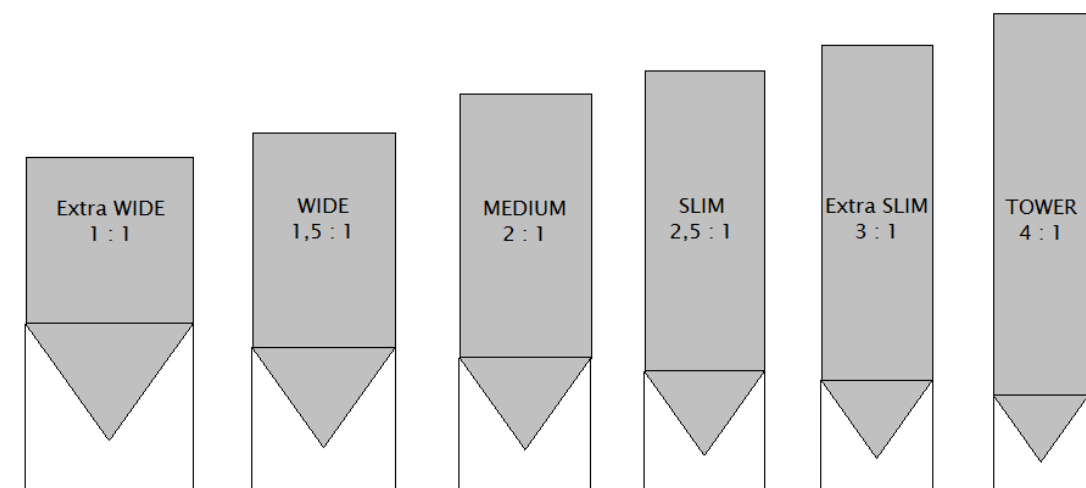
Obrázek 2 - Schéma kompresorového chlazení [8]

Chlazení lze dále rozdělit na přímé a nepřímé chlazení. K přímému chlazení dochází, když výparník odebírá teplo přímo z chlazeného prostředí (v tomto případě z CKT). U nepřímého chlazení dochází k odnímání tepla jiné teplotonosné látce, která následně ochlazuje chlazené prostředí. Přímé chlazení je energeticky účinnější, kdežto nepřímé chlazení je výhodnější, z provozních důvodů. Ku příkladu při provozu více CKT by každý CKT musel být vybaven vlastním chladicím oběhem, což by bylo ekonomicky náročné, a navíc by komplikovalo servisní zákroky. Navíc jako chladicí látka se mohou používat látky zdraví nebezpečné, a tak je výhodné, aby tyto látky nebyly v přímém kontaktu s pivem. Proto podle Basařové [3] je v novodobých pivovarech nejčastěji využíváno přímé chlazení, kvůli energetické výhodnosti.

5.1 O CKT

CKT neboli cylindrokónické tanky jsou válcové nádoby s horní částí zvanou dóm a kuželovým dnem, ve kterých probíhá hlavní kvašení piva případně i ležení za mírného přetlaku. Pro jejich výrobu se používá kvalitní nerezová ocel pro její chemickou stabilitu, dobrou čistitelnost a korozivzdornost, bohužel s výjimkou halogenů. Zvláště závažné jsou chloridy v kapalině, které by mohly při koncentraci větší jak 0,1g/l způsobit korozi.

Pro návrh rozměrů CKT neexistují příliš jednotné názory. Jediným společným faktem, na kterém se odborníci shodují je, že výška CKT by neměla překročit 20 metrů. Dále existuje pestrá škála poměrů mezi výškou CKT a jeho průměrem. Na obr.3 je znázorněná výrobní škála firmy Czech Brewery System [9]. Převládá však názor, že ideálním poměrem celkové výšky k průměru válcové části je 1:4. Cylindrická část je vybavena jednou až třemi chladicími zónami.



Obrázek 3 - Škála CK tanků dle firmy Czech Brewery System [9]

Nejednotnost je i v názorech na úhel kuželového dna, ale zde v praxi převládá řešení s úhlem 70° nebo 75°. Kuželová část musí být zcela hladká, aby nedocházelo k zachytávání kvasnic.

Firma Czech Brewery System [9] udává vlastnosti širokých i vysokých tanků:

5.1.1 VLASTNOSTI ŠIROKÝCH TANKŮ

- Jsou šetrnější k pivním kvasnicím
- Nižší výška potřebného prostoru
- Zabírají větší podlahovou plochu
- Menší teplosměnná plocha (nižší chladicí účinek)

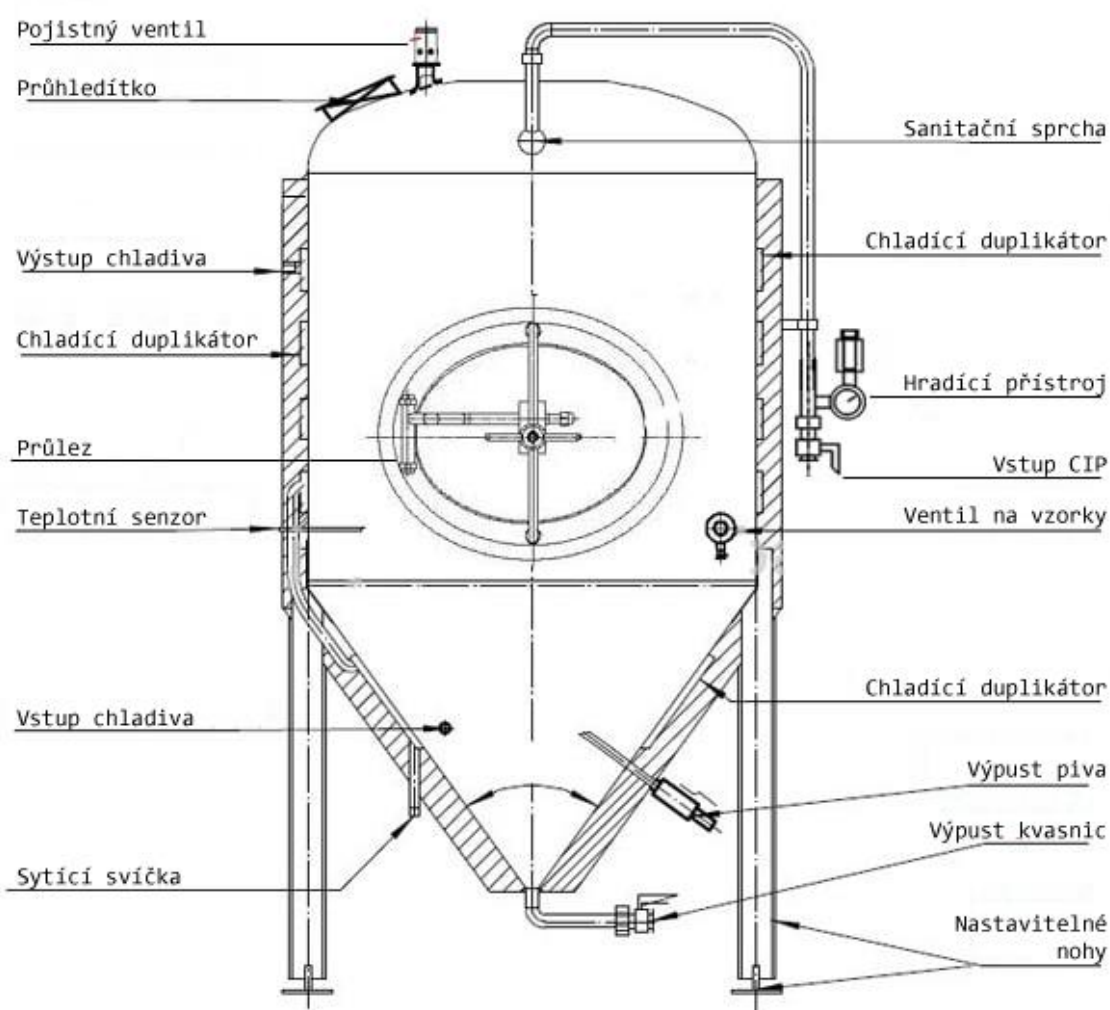
5.1.2 VLASTNOSTI VYSOKÝCH TANKŮ

- U větších objemů, kvůli velkému hydrostatickému tlaku je třeba odolnějších kmenů kvasnic
- Větší teplosměnná plocha (větší chladicí účinek)
- Vyšší výška potřebného prostoru
- Zabírají menší podlahovou plochu
- Větší spotřeba materiálu a větší počet duplikátorů (větší cena)

5.2 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ

Příkladem konstrukčního řešení je obr.4.

Cylindro-kónický fermentační tank: 0 - 3 bar



Obrázek 4 - Konstrukční řešení CK tanku [9]

Pro tuto práci je nejdůležitější rozložení chladících zón. Horní zóna musí být v úrovni s hladinou piva v tanku, jelikož kdyby byla hladina piva nad chladicí zónou znemožňuje to regulaci objemu, který je nad chladicí zónou. Jak uvádí Basařová [3], CKT se vyrábí s 2-4 zónami. Nejčastěji pak se volí konstrukční řešení s třemi chladíci zónami samostatně regulovanými

na cylindrické části a jedné na části kónické. Chladicí zóna na kónické části je důležitá kvůli dobré sedimentaci kvasnic a aby nedocházelo k autolýze kvasnic. Horní zóna je dimenzována tak aby byla schopna sama uchladiť hlavní kvašení. Více zón se přidává, aby nedocházelo k nárazům chladu, což kvasnicím nedělá dobře. Dále pak pro rozrušování teplotních vrstev a regulaci cirkulace.

Přibližné hodnoty teplosměnné plochy pro přímé a nepřímé chlazení

- Přímé chlazení - 40 až 50 m²/1000 hl (vypařovací teplota amoniaku -4 °C)
- Nepřímé chlazení - 50 až 62 m²/1000 hl (teplota media -2 °C)

Konstrukce pláště:

- Duplikátor s usměrněným tokem
- Duplikátor se se stékajícím filmem
- Navařené půl trubky

5.3 VÝHODY CKT

Basařová [3] uvádí výhody CKT oproti spilkám a velkoobjemovým ležáckým nádobám:

- Redukce investičních nákladů
- Redukce nároků na obsluhu a operace
- Snížení ztrát piva
- Rychlejší fermentace díky intenzivnějšímu promíchávání vlivem konvekce a delší trasy CO₂ bublin
- Díky větší homogenizaci se zlepšuje průměrná kvalita piva
- Snížení rizika kontaminace
- Snížení ztrát hořkých látek
- Zlepšení podmínek kontroly procesu
- Lepší možnost chlazení
- Zajištění účinného automatického mytí a sanitace

6 PŘENOS TEPLA

Při řešení přestupu tepla je nutné znát součinitel přestupu tepla uvnitř tanku. Tento součinitel je závislý na intenzitě pohybu látky uvnitř tanku. Tedy čím více látku promícháváme, tím intenzivnějšího přenosu tepla dosáhneme. Ideálním případem pro přenos tepla v tanku by byla nucená konvekce. Bohužel při chlazení piva dochází k usazování kvasnic a jakékoli intenzivní promíchávání látky by toto usazování narušilo. Proto při chlazení CK tanků je látka víceméně v klidu, a jediný pohyb ke kterému v látce dochází je způsoben rozdílem hustoty. Tedy vyplývá, že hlavním mechanismem přenosu tepla je přirozená konvekce.

6.1 PŘIROZENÁ KONVEKCE

Podle Theodora [10], při styku tekutiny s tělesem o odlišné teplotě, než je kapalina, dochází k změně teploty kapaliny což, má za následek změnu hustoty. Díky změně hustoty a vnějším silám dochází k vytvoření pohybující se vrstvy. Tomuto fenoménu se říká volná nebo přirozená konvekce.

Pro řešení přirozené konvekce je zapotřebí řešit tepelnou bilanci společně s bilancí hybnosti. Například Ghiaasiaan [11] uvádí rovnice pro řešení čisté, Newtonské látky v ustáleném stavu pro 2D:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) = 0 \quad (1)$$

$$\rho u \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) + \rho v \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right) = - \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \rho(g_x) \quad (2)$$

$$\rho C_p \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial y} \left(U \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 \quad (3)$$

Dále jsou zavedeny tyto předpoklady:

- Teplotní změny díky disipaci jsou zanedbatelné, tedy poslední člen z rovnice 3 odpadá.
- V dostatečné vzdálenosti od povrchu je konstantní hustota:

$$-\frac{dP_\infty}{dx} + \rho_\infty g_\infty = 0 \quad (4)$$

- Předpoklad nestlačitelnosti tekutiny, kromě gravitačního členu v rovnici hybnosti (rovnice 2) (Tento předpoklad původně navrhl Boussinesq, a proto se častou označují za Boussinesqův model)
- Konstantí vlastnosti tekutiny

Díky těmto předpokladům přejde rovnice 2 v:

$$\rho u \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) + \rho v \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right) = -(\rho_\infty - \rho)g_x - \left(\frac{dP}{dx} - \frac{dP_\infty}{dx} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (5)$$

Dále Ghiaasiaan uvádí vztah:

$$d\rho = -\rho\beta dT \quad (6)$$

Díky kterému:

$$\rho_\infty - \rho = \rho\beta(T - T_\infty) \quad (7)$$

Tedy rovnice 1,2 a 3 přechází do tvaru:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (8)$$

$$u \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) + v \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right) = -g_x\beta(T - T_\infty) - \frac{1}{\rho} \left(\frac{dP}{dx} - \frac{dP_\infty}{dx} \right) + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (9)$$

$$\rho C_p \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = U \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \quad (10)$$

Tento způsob řešení však nezohledňuje vliv času a Boussinesqův model dle příručky Fluent [12] dosahuje přijatelného výsledku pro kapaliny při rozdílu teplot maximálně 2 °C. Dále Boussinesqův model nezohledňuje anomální závislost hustoty vody na teplotě.

Při řešení přirozené konvekce se tedy uchylujeme k experimentům, případně pak numerickým výpočtům pomocí CFD.

7 BEZROZMĚRNÁ ČÍSLA PRO PŘIROZENOU KONVEKCI

Pro zjednodušení řešení složitých analytických rovnic byla provedena inspekční analýza, díky které vznikají bezrozměrná čísla. Na závislostech těchto čísel vznikají korelace, díky kterým se můžeme dozvědět přibližné hodnoty fyzikálních parametrů zkoumaného procesu. Korelace pro

bezrozměrná čísla se stanovují experimentálně, případně na základě CFD simulací. Pro případy přirozené konvekce jsou používána tato bezrozměrná čísla:

7.1 NUSSELTOVO ČÍSLO

Nusseltovo číslo ukazuje poměr mezi konvektivním a konduktivním přenosem tepla na rozhraní mezi tekutinou a okolím. Tento vztah je definován jako:

$$\overline{Nu} = \frac{\alpha_{in} \cdot L_{ref}}{\lambda_v} \quad (11)$$

Tedy díky korelacím pro Nusseltovo číslo získáváme součinitel přestupu tepla.

7.2 PRANDTLOVO ČÍSLO

Dalším použitým bezrozměrným číslem je Prandtlovo číslo, které nám vyjadřuje poměr mezi rychlostním a teplotním profilem, díky čemuž lze určit, jestli v látce převládá konvektivní nebo konduktivní přenos tepla. Prandtlovo číslo je definováno:

$$Pr = \frac{\vartheta}{a} \quad (12)$$

Toto bezrozměrné číslo je čistě závislé na vlastnostech látky a nezávisí na geometrii.

7.3 RAYLEIGHTOVO ČÍSLO

Dalším bezrozměrným číslem je Rayleightovo číslo. Toto bezrozměrné číslo je spojené s přirozenou konvekcí a je definováno:

$$Ra = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta T_{ref} \cdot L_{ref}^3}{\vartheta \cdot a} \quad (13)$$

Rayleightovo číslo lze také zapsat jako součin Grasshofova čísla a Prandtlova čísla:

$$Ra = Gr \cdot Pr \quad (14)$$

Díky tomu je v Rayleightově čísle vidět poměr hnacích sil způsobených rozílnou teplotou a na ní závisící hustotě (Grasshofovo číslo [13]) a převaha rychlostního nebo teplotního pole (Prandtlovo číslo).

Rayleightovo číslo se používá ke stanovení Nusseltova čísla na základě vztahu:

$$Nu = C_1 \cdot Ra^{C_2} \quad (15)$$

Kde C_1 a C_2 jsou konstanty pro korelaci.

8 KORELACE NUSSELTOVA ČÍSLA

8.1 RODRÍGUEZ

Rodríguez a kolektiv [14] v jejich článku vyšetřují tepelnou ztrátu v domácích zásobnících teplé vody (tyto zásobníky mají maximální objem 0,4 m³). Díky inspekční analýze zjistili tuto závislost Nusseltova čísla:

$$\overline{Nu} = f(\tau, Ra, \hat{U}, H/D, Pr) \quad (16)$$

Kde:

$$\tau = \frac{t \cdot v_{ref}}{L_{ref}} \quad (17)$$

$$v_{ref} = \frac{a}{L_{ref}} \quad (18)$$

$$Ra = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta T_{ref} \cdot L_{ref}^3}{\vartheta \cdot a} \quad (19)$$

$$\Delta T_{ref} = T_o - T_{ch} \quad (20)$$

$$\hat{U} = \frac{U \cdot H}{\lambda_v} \quad (21)$$

$$L_{ref} = H \quad (22)$$

Dále na základě dříve provedených experimentech byla vytvořena hypotéza, že Nusseltovo číslo je nezávislé na Prandtlově čísle. Tato hypotéza byla vyslovena na základě experimentu, kdy bylo vyšetřováno Nusseltovo číslo v nádobě s obdélníkovým průřezem a neprojevila se závislost Nusseltova čísla na čísle Prandtlově. Toto dokládá experiment provedený na válcové nádobě, kde v rozmezí Prandtlova čísla 1-1000, nebyl pozorován vliv na Nusseltovo číslo u válcových stěn a minimální vliv na Nusseltovo číslo u dna nádoby.

Díky této hypotéze a inspekční analýze byl navrhnout vztah:

$$\overline{Nu} = C_1 \tau^{C_2} Ra^{C_3} (H/D)^{C_4} \hat{U}^{C_5} \quad (23)$$

Pro určení konstant C₁-C₅ byly provedeny numerické simulace s různými modely. V potaz byly vzaty tyto nejdůležitější parametry a to:

- Poměr výška ku průměru: H/D = (1; 2; 3 ;3,45)
- Počáteční teplota: T₀ = (40,50,55,60,65,70) °C
- Tloušťka stěny: s = (0; 0,01; 0,02; 0,04) m
- Objem tanku V = (0,1; 0,2; 0,3; 0,4) m³
- Vnější součinitel přestupu tepla a_{out} = (2, 10) W/m².K
- Teplota okolí T_{ch} = 20 °C

Díky těmto parametrům dostaneme oblast platnosti:

- 4,8. 10¹¹ <= Ra <= 10¹³
- 1 <= H/D <= 3,45
- 0,78 <= U <= 26,6

Jelikož pro všechny tyto parametry by bylo potřeba 768 různých modelů a výpočetní síla pro zpracování těchto dat by byla příliš finančně náročná, byly pevně zvoleny parametry:

- Pevné parametry: $V = 0,3 \text{ m}^3$ a $T_0 = 60 \text{ }^\circ\text{C}$. Měněné parametry $H/D = (1 ; 2 ; 3 ; 3,45)$, $s = (0; 0,01; 0,02; 0,04) \text{ m}$ a $a_{out} = (2; 10) \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$.
- Pevné parametry: $H/D = 3,45$, $T_0 = 60 \text{ }^\circ\text{C}$, $s = 0,01 \text{ m}$ a $a_{out} = 10 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$. Měněné parametry $V = (0,1; 0,2; 0,3; 0,4) \text{ m}^3$
- Pevné parametry: $V = 0,3 \text{ m}^3$, $H/D = 3,45$, $s = 0,02 \text{ m}$ a $a_{out} = 10 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$. Měněné parametry $T_0 = (40, 50, 55, 60, 65, 70) \text{ }^\circ\text{C}$

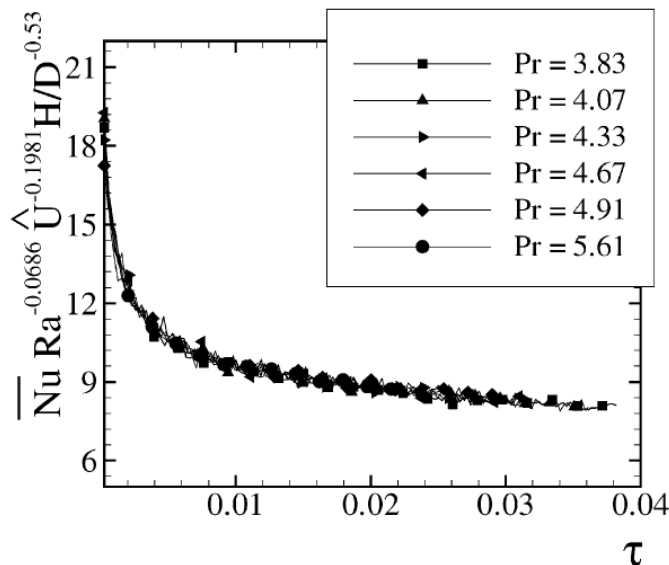
Dostáváme tedy 42 modelů.

Díky numerickým simulacím a Levenberg-Marquardt algoritmu byly konstanty určeny následovně:

$$\overline{Nu} = 4,5851\tau^{-0,1686}Ra^{0,0686}(H/D)^{0,5304}\hat{U}^{0,1981} \quad (24)$$

Určení konstant je s koeficientem determinace $R^2 = 0,994$ od dat s numerických simulací.

Dále byla vynesena závislost Nusseltova čísla pro různá Prandtlova čísla, z tohoto grafu lze vidět, že Nusseltovo číslo nezáleží na Prandtlově. Tento graf je vidět na obr.5.



Obrázek 5 - Závislost Nusseltova čísla [14]

8.2 Y.S.LIN - AKINS

Y.S.Lin a kol. [15] se ve svém článku zabývají pseudo-stacionárním přenosem tepla. Při jejich rešerši objevili korelaci pro přirozenou konvekci ve válcové nádobě pro nestacionární děj:

$$\overline{Nu} = 0,55 \cdot Ra^{0,25} \quad (25)$$

Tato korelace platí v rozsahu $6 \times 10^5 \leq Ra \leq 6 \times 10^9$. a byla zjištěna na nádobách v rozpětí poměru výšky k průměru 0,75 - 2. Pro výpočet Rayleighova čísla byl vzat průměr nádoby a rozdíl počátečních teplot kapaliny a teplota chladícího média.

Ve svém článku dále vyšetřují pseudo-statický přestup tepla pomocí CFD simulací v rozsahu $0 \leq Ra \leq 10^7$ s použitými parametry $H/D = (0,25; 0,5; 1; 2)$, $Pr = 7$. Byly také provedeny dvě simulace pro ověření nezávislosti Nusseltova čísla na Prandtlově čísle. Tyto simulace proběhly z $Pr = 7$ a $Pr = 180$. Díky těmto simulacím byla potvrzena nezávislost Nusseltova čísla na Prandtlově čísle. Díky těmto simulacím navrhli korelační vztah:

$$\overline{Nu} = 0,519 \cdot Ra^{0,255} \quad (26)$$

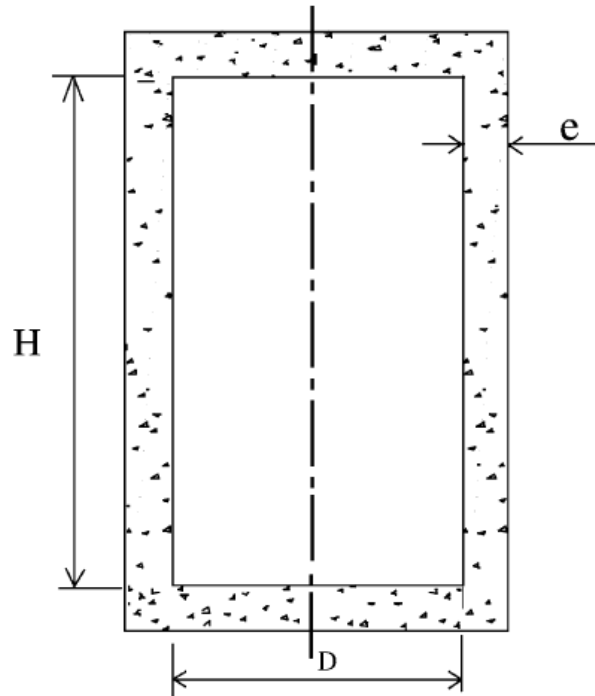
Pro výpočet rozdílu teplot byla použita teplota stěny a teplota středu nádoby. Dále byl použit charakteristický rozměr jako:

$$L_{ref} = 6 \cdot \frac{\text{Objem nádoby}}{\text{Povrch nádoby}} = D \cdot \left[\frac{3 \cdot (H/D)}{1 + 2 \cdot (H/D)} \right] \quad (27)$$

8.3 OLIVESKI

Oliveski a kolektiv [16] vyšetřovali tepelné ztráty pomocí experimentu a následných numerických simulací.

Nejdříve bylo provedeno měření na tanku dle obr.6. Tento tank má rozměry $H = 570$ mm, $D = 420$ mm a tloušťkou stěny $s = 1$ mm. Dále je celý tank vybaven izolací o tloušťce $e = 10$ mm. V tanku jsou pak měřeny teploty dvěma senzory PT100.



Obrázek 6 - Schéma měřeného tanku [16]

Byla provedena tři měření s parametry:

- Počáteční teplota $T_0 = 51,5$ °C a doba měření $t = 15$ h.
- Počáteční teplota $T_0 = 72,5$ °C a doba měření $t = 60$ h.
- Počáteční teplota $T_0 = 82$ °C a doba měření $t = 45$ h.

Tato měření byla použita pro kontrolu numerického modelu.

Po ověření modelu bylo spočítáno 40 dalších modelů s parametry

- Objem $V = (0,1; 0,2)$ m³
- Poměr $H/D = (1; 1,5; 2; 2,5)$
- Tloušťka izolace $e = (40; 30; 20; 10; 1)$ mm

Pomocí vynesení výsledných hodnot Nusseltova čísla z numerických simulací do grafů, a úprav těchto grafů pomocí proměnných nejvíce ovlivňující výsledek byly určeny tyto vztahy pro výpočet Nusseltova čísla:

Pro $V = 0,1$ m³:

$$\overline{Nu}(H/D)^{-0,3} = (9,40739\overline{U}^{0,288329})(1000(T_0 - T_{ch})^{-1} - 20)^{0,00988842\overline{U}^{-0,189428}} \quad (28)$$

Pro $V = 0,2$ m³:

$$\overline{Nu}(H/D)^{-0,3} = (10,6039\overline{U}^{0,310719})(1000(T_0 - T_{ch})^{-1} - 20)^{0,013052\overline{U}^{-0,224677}} \quad (29)$$

Kde U je:

$$\overline{U} = \left(\frac{s}{\lambda_o} + \frac{1}{\alpha_{out}} \right)^{-1} \quad (30)$$

V potaz je ovšem vzít třeba, že tyto korelace jsou závislé na objemu. Dalším problémem této korelace je absence inspekční analýzy, která by jednoznačně určila parametry ovlivňující Nusseltovo číslo. Dále je nezvyklé, že autoři uvádí jako jedinou podmínku platnosti rozsah poměru $H/D = (1 - 2,5)$. Ale i tak autoři věří, že tyto korelace mohou být použity i v širším rozsahu poměrů H/D .

8.4 HIDDINK

Hiddink [17] ve své práci provedl celkem 174 experimentů s různými parametry pro ohřívání kapalin ve válcové nádobě.

- Pro poměr H/D byly hodnoty v rozsahu 0,25 až 2
- Počáteční teplota tekutiny měla hodnoty: $T_0 = (20, 30, 60)$ °C
- Teplota ohřívacího média: $T_{ch} = (105, 114, 120)$ °C
- pro tyto experimenty bylo použito 7 různých tekutin

S těmito hodnotami dostáváme rozsah Rayleighova čísla: $6 \times 10^5 \leq Ra \leq 8 \times 10^9$

Díky těmto experimentům byla vytvořena závislost Nusseltova čísla na čísle Rayleighově:

$$\overline{Nu} = 0,34 \cdot Ra^{0,265} \quad (31)$$

Pro výpočet Rayleightova a Nusseltova čísla byl zvolen charakteristický rozměr jako poloměr ohřívané nádoby.

8.5 W.LIN - ARMFIELD

W.Lin a kol. [18] ve své práci studují chování kapalin při chlazení ve válcovém tanku. V jejich studii provádějí 13 numerických simulací s různými parametry:

Číslo simulace	Ra	H/D	Pr
1	6×10^6	1	7
2	6×10^7	1	7
3	6×10^8	1	7
4	6×10^9	1	7
5	6×10^{10}	1	7
6	6×10^8	1/3	7
7	6×10^8	1/2	7
8	6×10^8	2	7
9	6×10^8	3	7
10	6×10^8	1	1
11	6×10^8	1	50
12	6×10^8	1	200
13	6×10^8	1	1000

Tabulka 1 - Použité parametry při numerických simulacích v článku [18]

Pro výpočet Rayleighova čísla byla použita definice:

$$Ra = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_0 - T_{ch}) \cdot R^3}{\vartheta \cdot \alpha} \quad (32)$$

Díky těmto simulacím byla navrhována závislost mezi bezrozměrnou teplotou a bezrozměrným časem:

$$\theta(\tau) = e^{-1,287[(H/D) \cdot Ra]^{-1/4} \cdot \tau} - 1 \quad (33)$$

Kde bezrozměrná teplota je definovaná jako:

$$\theta(\tau) = \frac{T_a(t) - T_0}{T_0 - T_w} \quad (34)$$

A bezrozměrný čas takto:

$$\tau = \frac{t}{(R/v_{ref})} \quad (35)$$

Kde v_{ref} je charakteristická rychlost, pro kterou byl použit vztah:

$$v_{ref} = \alpha \cdot \frac{Ra^{1/2}}{R} \quad (36)$$

Pro výpočet Rayleightova a Nusseltova čísla byl zvolen charakteristický rozměr jako poloměr ohřívané nádoby.

Tato korelace nezapadá do konceptu této práce, proto dále v práci se s touto korelací nepočítá.

9 CFD

9.1 O CFD

CFD neboli z anglického computational fluid dynamics je vědní obor, který se zabývá výpočtem přenosových rovnic pomocí výpočetní techniky. Toto přináší několik výhod oproti běžně prováděným experimentům:

- Oproti experimentu jsou CFD simulace většinou finančně méně náročné.
- Je možné poměrně jednoduše provést výpočty s různými parametry
- Řešený problém může být zjednodušen

Ale při CFD modelování musíme počítat s tím, že nemusí být vždy zcela správné. Chyby mohou vzniknout:

- Při zadávání vstupních podmínek dochází k nepřesnému odhadu dat.
- Zadávaná data mohou být zcela nepřesná.
- Použitý matematický model může být nedostačující.
- Výsledky jsou limitovány výpočetní silou.

Kvůli tomu je doporučeno si výsledky získané simulacemi ověřit i experimentálně.

9.2 JAK TO PROBÍHÁ

Nejprve dochází k specifikaci problému. Tedy je třeba zjistit co nejvíce o procesu, který chceme modelovat. Je třeba vzít v potaz co vše je o proudění známo, jaké fyzikální veličiny rozhodují o průběhu procesu nebo na něj mají velký vliv. Dále s jakou geometrií budeme pracovat, o jaký druh proudění se jedná (laminární/turbulentní, stacionární/nestacionární), jaký je cíl našeho modelování. Nakonec je našim úkolem určit, jaký je nejjednodušší, nejrychlejší a nejlevnější způsob vytvoření a vypočítání modelu.

Díky těmto počátečním znalostem můžeme vytvořit matematický model, na to je třeba formulovat rovnice popisující probíhající procesy, tedy rovnice zachování hybnosti, tepla a hmoty. Poté určíme hnací síly procesu, počáteční podmínku a geometrické podmínky, ve kterých budeme proces modelovat. Dále kvůli redukci nutné výpočetní síly se pokusíme zjednodušit rovnice v matematickém modelu. Můžeme rozhodnout, jestli chceme zadaný problém řešit jako 1D/2D/3D, poté jestli model nepočítá s veličinami, které mají žádný nebo zanedbatelný vliv a tyto veličiny z modelu vyloučit. Také můžeme pro zjednodušení využít výsledky z experimentu nebo z předchozích modelů.

Vytvořený matematický model se skládá ze soustavy parciálních diferenciálních rovnic, které převedeme na soustavu rovnic algebraických (u transportních rovnic se nejvíce využívá metoda konečných objemů). Dále převedeme zvolenou geometrii na síť uzlů, kde v každém uzlu budeme tyto rovnice řešit.

Jak s vytvořením matematického modelu a jeho následným převedením do soustavy algebraických rovnic nám dnes pomáhají již vytvořené programy. V této práci bylo využíváno programu Ansys Fluent.

Pokud máme soustavu algebraických rovnic, přichází na řadu výpočetní technika. Rychlost výpočtu závisí na několika parametrech:

- Velikost sítě, respektive počet uzlů sítě
- Velikost časového kroku v případě nestacionárních dějů
- Použité algoritmy
- Kritéria pro zastavení výpočtu (požadovaná přesnost výpočtu)
- Kvalita sítě
- A dalších parametrech (např. výpočetní stroj)

Kvalita výsledku pak závisí na:

- Kvalitě sítě
- Kvalitě matematického modelu
- Provedených předpokladech pro výpočet
- Stabilitě numerického schématu
- Kritériích pro zastavení výpočtu (požadovaná přesnost výpočtu)
- Časovém kroku
- A dalších

Nakonec je třeba výsledky ověřit. Ideálním řešením je porovnat výsledky s výsledky experimentu nebo s přibližným analytickým řešením.

9.3 ROVNICE ŘEŠENÉ PŘI CFD

Jelikož bilanční rovnice jsou složité, neexistuje pro ně analytické řešení. Proto tyto rovnice řešíme pomocí CFD. Mezi tyto rovnice patří rovnice přenosu hybnosti, rovnice přenosu tepla a rovnice přenosu hmoty. Jelikož při chlazení CK tanků je přenos hmoty zanedbatelný, dále se rovnicemi přenosu hmoty nebudeme zabývat.

9.3.1.1 ROVNICE KONTINUITY

Rovnice kontinuity popisuje zachování hmoty a pro nestlačitelné tekutiny je definovaná:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (37)$$

Tento vztah lze pro ustálený děj zjednodušit na:

$$\nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (38)$$

V případě, pokud počítáme s nestlačitelnou tekutinou, nebo bychom využili Boussinesqova modelu lze rovnici zjednodušit na:

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad (39)$$

9.3.1.2 ROVNICE PŘENOSU HYBNOSTI

Rovnice přenosu hybnosti, také nazývaná Cauchyho rovnice dynamické rovnováhy. A popisuje diferenciální bilanci hybnosti pro tekutiny a má tvar:

$$\rho \left[\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} \right] = -\nabla p + \nabla \cdot \vec{\tau} + \rho \vec{f} \quad (40)$$

V případě použití Newtonských látek nám vztah přechází na:

$$\rho \left[\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} \right] = -\nabla p + \mu \nabla^2 \cdot \vec{u} + \rho \vec{f} \quad (41)$$

Tato rovnice se také nazývá Navier-Stokesova rovnice.

9.3.1.3 ROVNICE PŘENOSU TEPLA

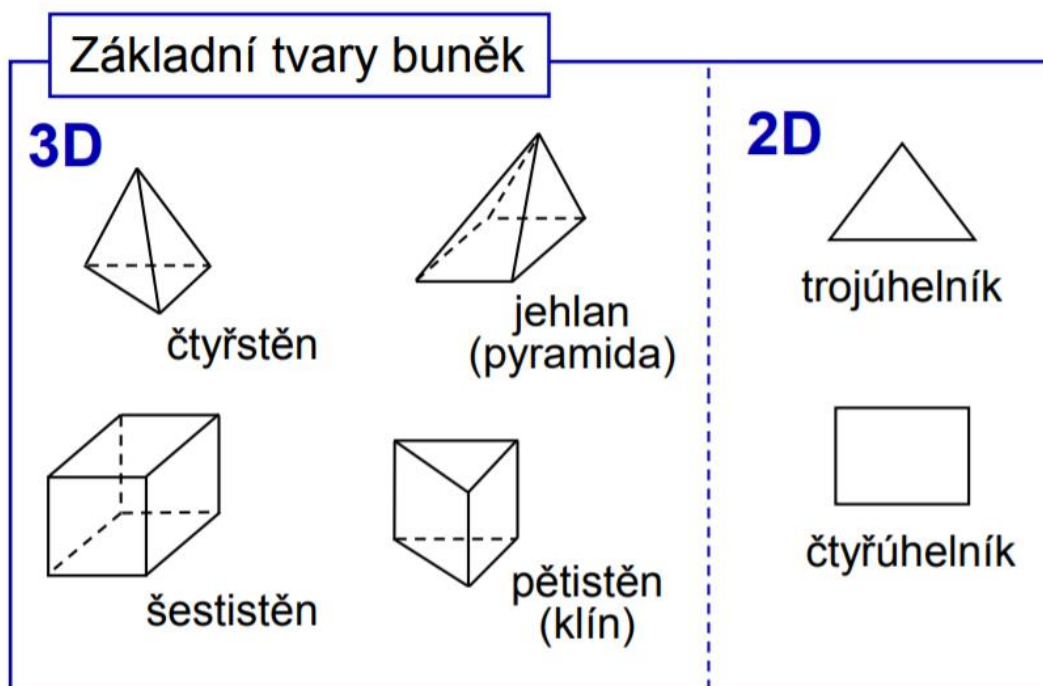
Rovnice přenosu tepla bilancuje zachování energie uvnitř kontrolního objemu a je definována takto:

$$\rho c_p \left[\frac{\partial T}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla) T \right] = \lambda \nabla^2 T + \vec{\tau} : \vec{\Delta} + \dot{Q}^{(g)} \quad (42)$$

Tato rovnice se také nazývá Fourier-Kirchhoffova rovnice.

9.4 METODA KONEČNÝCH OBJEMŮ

Pro řešení CFD simulací je v této práci použit program Ansys Fluent, který pro řešení využívá metodu konečných objemů (tato metoda je nejčastěji používanou metodou pro řešení CFD simulací). Metoda konečných objemů, o které mluví Jahoda [19], se zakládá na rozdělení řešené oblasti na konečný počet malých kontrolních objemů. Příklad tvarů kontrolních objemů je na obr. 7. Transportní rovnice se tedy řeší pro tyto objemy. Díky Gaussově větě se integrál přes objem kontrolního objemu převede na integrál přes plochu kontrolního objemu. Tyto rovnice jsou pak dále využity pro výpočet modelu.

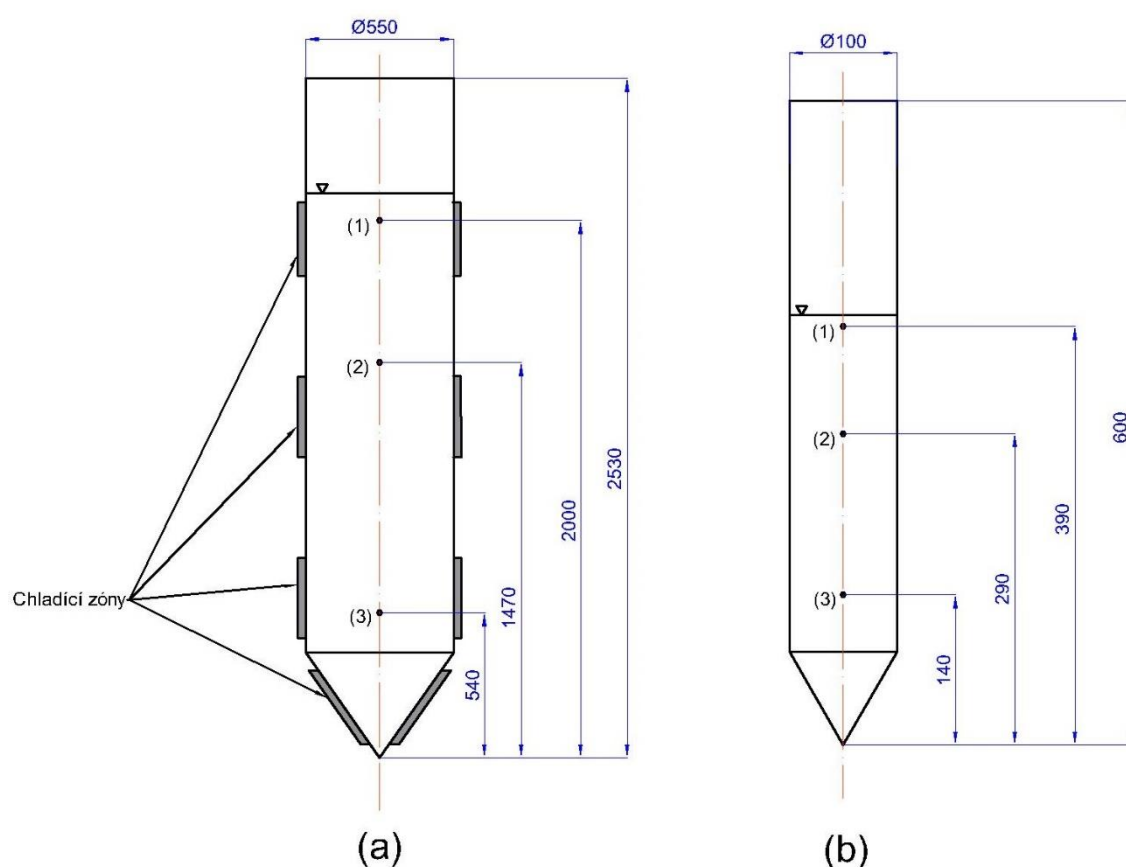


Obrázek 7 - Příklad kontrolních objemů [19]

10 VÝSLEKY Z ČLÁNKU

Jelikož je důležité ověřit CFD model, byl nalezen článek od Takamoty a kolektivu [4]. V tomto článku studují průběh chlazení CK tanků při stahování piva z teploty 10 °C na teplotu 4 °C. Navazují zde na jejich dřívější experiment, kdy chlazení probíhalo na miniaturním tanku (5 l). Proto v tomto článku vyšetřují tank větší (500 l), kde lze vidět vliv velikosti tanku na jeho chlazení.

Pro experiment byl vyroben 500 litrový tank z oceli SUS 304 (ekvivalentem je 1.4301) o rozměrech, které lze vidět na obr. 8(a). Tento tank byl vybaven dvěma platinovými odporovými teploměry ve výšce 540 mm a 1470 mm jak je vidět na obr. 8(a). Dále pak termočlánek typu E ve výšce 2000 mm. Tyto teplotní senzory jsou v hloubce 100 mm. Tyto rozměry byly zvoleny tak, aby poměrově odpovídaly místům, kde byly umístěny teplotní senzory u miniaturního tanku. Miniaturní tank je zobrazen na obr. 8(b).

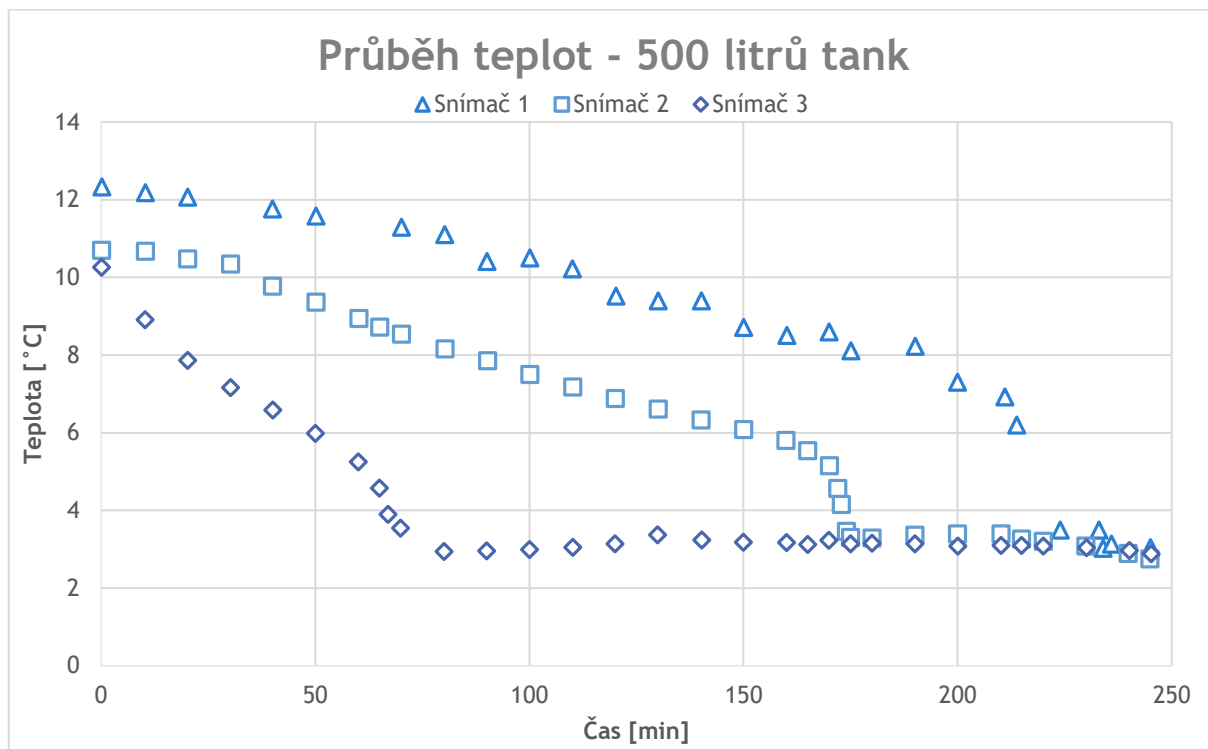


Obrázek 8 - Rozměry tanku z experimentu (a) - 500l tank, (b) - miniaturní tank

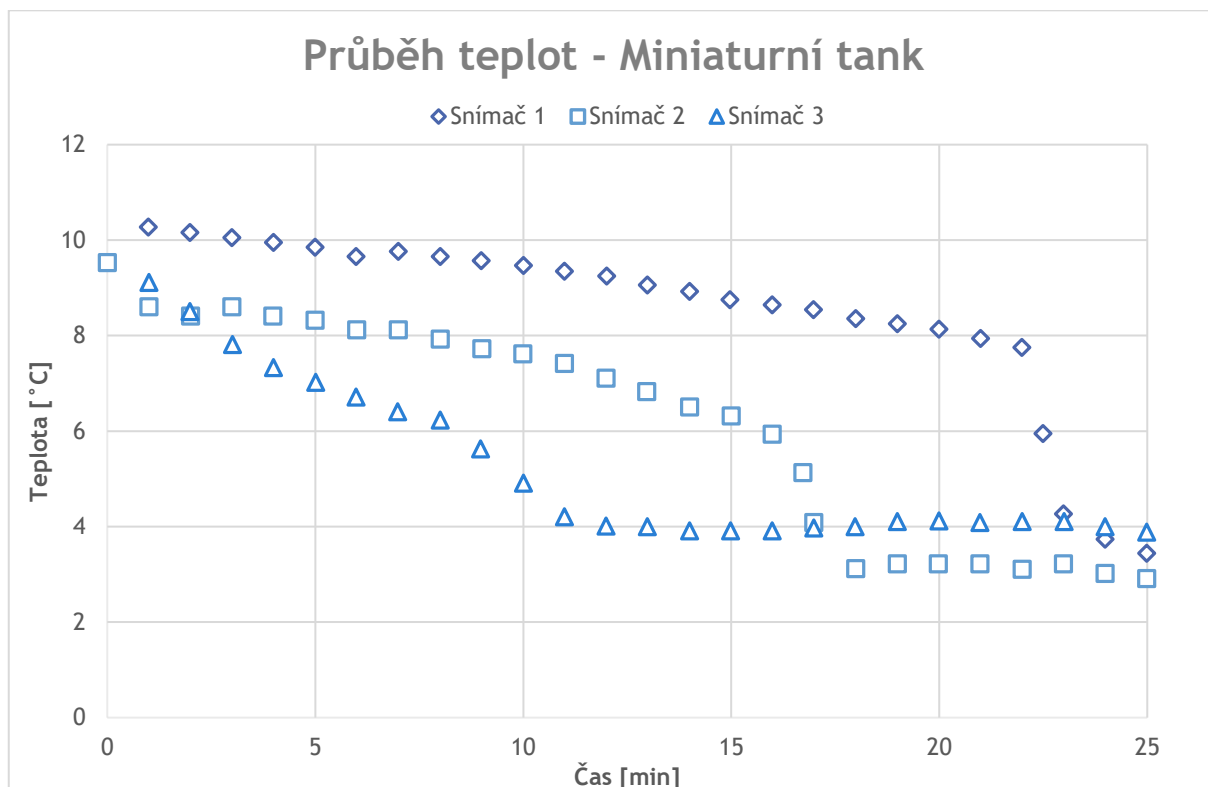
500 litrový tank byl chlazen chladicími zónami, které pokrývaly přibližně 45 % povrchu tanku. Zónami protékalo chladivo o teplotě -3,9 °C. Miniaturní tank pak byl chlazen celým pláštěm, chladivem o teplotě -0,3 °C.

Pro experiment byla použita voda, jelikož pivo má přibližně stejné parametry (teplotní součinitel objemové roztažnosti, součinitel teplotní vodivosti, kinetická viskozita), závislost hustoty na teplotě je podobná vodě. Počáteční teplota vody byla 10 °C a byla v tanku ponechána na ustálení po dobu jedné hodiny. Objem použité vody byl 400 litrů.

Výsledkem experimentu jsou průběhy teplot, které jsou na obr. 9 pro 500 litrový tank a na obr. 10 pro miniaturní tank. Lze vidět, že i když časový průběh je rozdílný, průběh teplot má podobné tendence u obou tanků.



Obrázek 9 - Průběh teplot v 500 litrovém tanku



Obrázek 10 - Průběh teplot v miniaturním tanku

Dále bylo během chlazení aplikováno barvivo pro zviditelnění proudění a lze pozorovat proudění u stěny směrem dolů, dokud teplota uvnitř tanku není kolem 4 °C, při této teplotě dochází k otočení směru proudění a u stěny kapalina proudí směrem vzhůru.

11 VÝPOČET TEPLA

Jelikož nejzajímavějším technickým údajem pro nás je, za jak dlouho se kapalina v nádobě ochladí. Je třeba si tento vztah odvodit. Začneme tepelnou bilancí tanku a výpočtem prostupu tepla stěnou:

$$Q = m \cdot c_p \cdot \frac{dT_{CKT}}{dt} = U \cdot A \cdot (T_{CKT} - T_{ch}) \quad (43)$$

U této rovnice separujeme proměnné a dostáváme rovnici:

$$\frac{dT_{CKT}}{(T_{CKT} - T_{ch})} = \frac{U \cdot A}{m \cdot c_p} dt \quad (44)$$

V tuto chvíli uvažujeme, že hmotnost (hustota) je na teplotě nezávislá stejně tak jako měrná tepelná kapacita. Toto si můžeme dovolit díky tomu, že jsou tyto závislosti velikostně zanedbatelné (hodnota hustoty v našem oboru teplot dosahuje hodnot od 999,4 až 999,97 kg/m³, rozložení hustoty je vidět dále na obr. 18). Díky tomuto zjednodušení si můžeme dovolit tento vztah integrovat v mezích od počáteční teploty tanku až po požadovanou teplotu tanku:

$$\int_{T_0}^{T_{fin}} \frac{dT_{CKT}}{(T_{CKT} - T_{ch})} = \frac{U \cdot A}{m \cdot c_p} \int_0^{\Delta t} dt \quad (45)$$

Touto integrací dostáváme vztah:

$$\ln \left(\frac{T_0 - T_{ch}}{T_{fin} - T_{ch}} \right) = \frac{U \cdot A}{m \cdot c_p} \Delta t \quad (46)$$

Který upravíme pro výpočet času chlazení:

$$\Delta t = \frac{m \cdot c_p}{U \cdot A} \ln \left(\frac{T_0 - T_{ch}}{T_{fin} - T_{ch}} \right) \quad (47)$$

12 ZÁVĚRY Z REŠERŠE

V rešeršní části této práce byl popsán proces chlazení piva před ležením a konstrukční řešení CK tanků. Také důležité teploty při chlazení mladiny v době kvašení a ležení. Dále byly vyhledány korelace Nusseltova čísla, jejichž přehled je v tabulce 2. V rešeršní části je také popsán experiment od Takomoty, který byl použit na ověření CFD modelu.

Korelace	Vztah	Platnost v Ra:
Rodriquez	$\overline{Nu} = 4,5851\tau^{-0,1686}Ra^{0,0686}(H/D)^{0,5304}\hat{U}^{0,1981}$	$4,8 \cdot 10^{11} - 13^{13}$
Lin	$\overline{Nu} = 0,55 \cdot Ra^{0,25}$	$6 \cdot 10^5 - 6 \cdot 10^9$
Oliveski (V = 0,1 m3)	$\overline{Nu}(H/D)^{-0,3} = (9,40739\bar{U}^{0,288329})(1000(T_0 - T_{ch})^{-1} - 20)^{0,00988842\bar{U}-0,189428}$	-
Oliveski (V = 0,2 m3)	$\overline{Nu}(H/D)^{-0,3} = (10,6039\bar{U}^{0,310719})(1000(T_0 - T_{ch})^{-1} - 20)^{0,013052\bar{U}-0,224677}$	-
Hiddink	$\overline{Nu} = 0,34 \cdot Ra^{0,265}$	$6 \cdot 10^5 - 8 \cdot 10^9$

Tabulka 2 - Přehled korelací

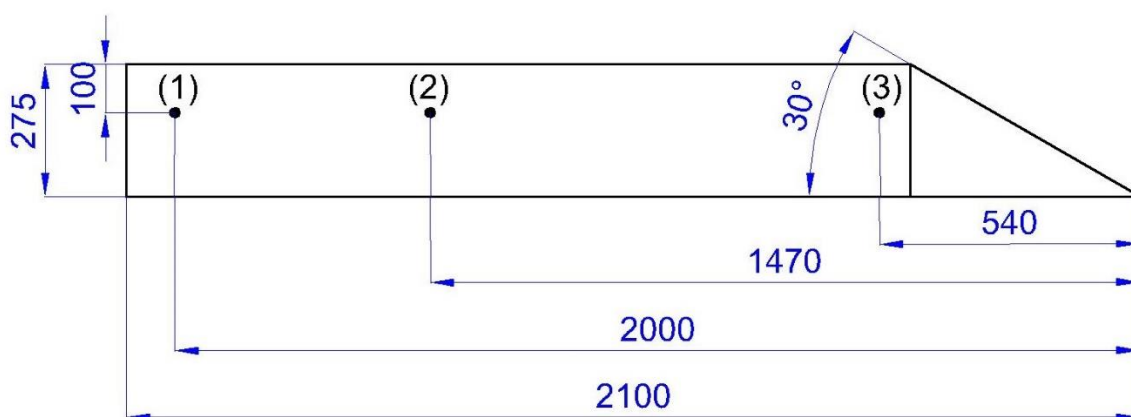
13 CFD SIMULACE

Jelikož je plánováno ověřit CFD model pomocí experimentu, který provedl Takamota a kolektiv [4], je pro CFD simulaci zvolen model se stejnými rozměry.

Pro tvorbu modelu byl použit program Ansys Fluent 15.0.7.

13.1 GEOMETRIE

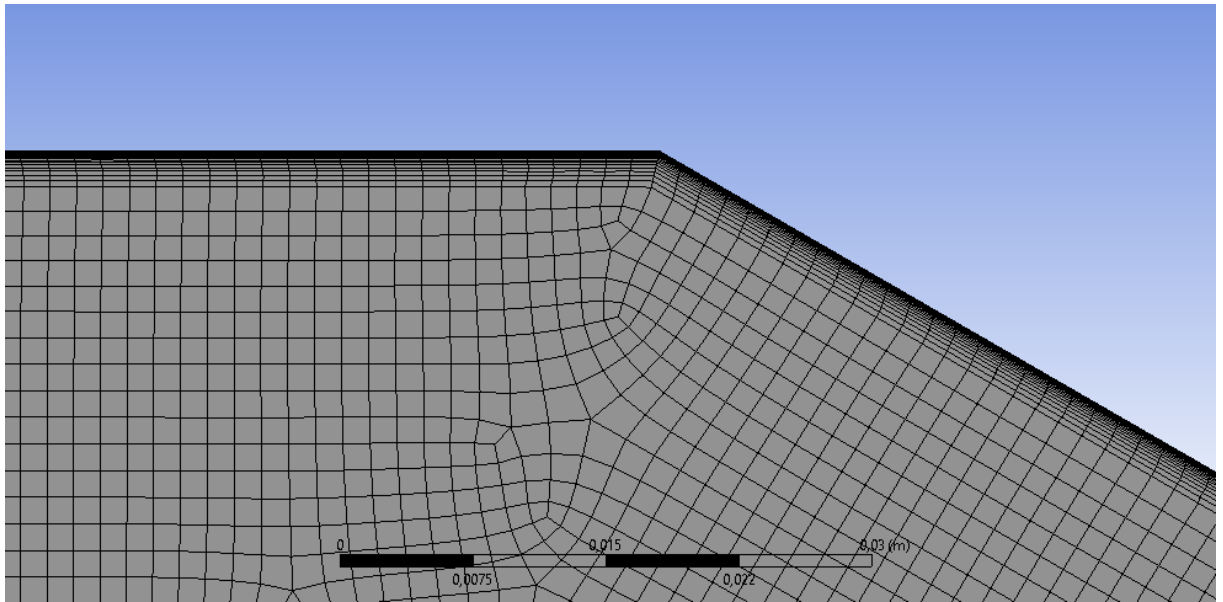
Díky tomu, že CK tanky jsou symetrické, je možné použít k výpočtu model s 2D geometrií. Tedy byla vytvořena geometrie v programu Fluent dle obr.11. Tyto rozměry odpovídají rozměrům tekutiny v 500 litrovém tanku, který použil Takamota [4].



Obrázek 11 - Rozměry geometrie modelu a umístění teplotních senzorů v modelu

13.2 SÍŤ

Síť byla vytvořena v programu Fluent, byla nastavena maximální velikost buňky 1,5 mm. Pro lepší výpočet byla pomocí funkce inflation, síť v místech u stěny tanku zhuštěna, jelikož jak říká Takamota [4] zde je hlavní vliv hnací síly procesu. Díky hustší síti u stěn, tedy bude dosaženo lepších výsledků. Část sítě lze vidět na obr. 12.



Obrázek 12 - Část sítě modelu

Některé oblasti sítě byly pojmenovány, jak je vidět na obr. 13, tyto pojmenování byly později použity při nastavování podmínek výpočtu.



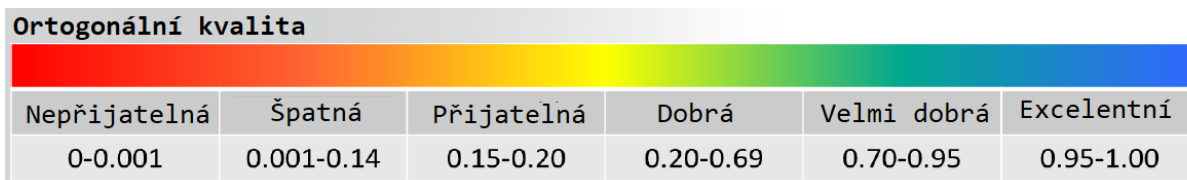
Obrázek 13 - Oblasti modelu

S tímto nastavením sítě získáváme 254941 buněk pro výpočty.

Dále je důležitá kvalita modelu. Zde jsou hlavními ukazateli Ortogonální kvalita a kvalita Skewness.

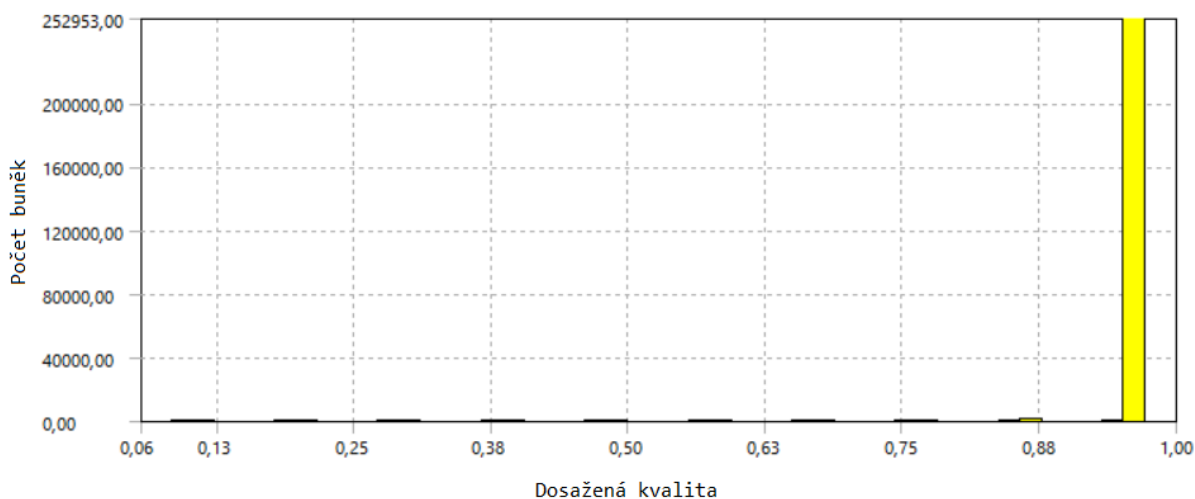
13.2.1 ORTOGONÁLNÍ KVALITA

Ortogonalita kvalita, podle příručky Ansys Fluent [20] nabývá hodnot od 0 do 1, přičemž čím blíže k 1 tím je kvalita lepší. Rozložení ortogonální kvality je vidět na obr. 14. Ortogonalita kvalita vyjadřuje, jak kolmé jsou na sebe sousedící buňky. Pro výpočet se použije vektor spojující sousedící buňky a normálový vektor hrany (případně stěny) která tyto buňky spojuje. Ideální ortogonální síť se skládá z buněk stejných rozměrů a čtvercového (případně krychlového) tvaru.



Obrázek 14 - Kvalita dle ortogonálního kritéria [20]

V případě našeho modelu dostáváme rozložení kvality, jaké je na obr. 15.

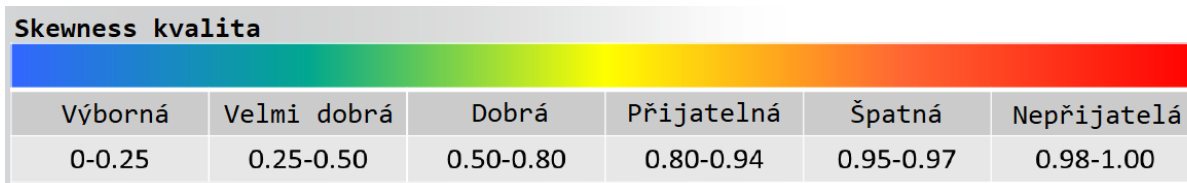


Obrázek 15 - Dosažené ortogonální kvalita

Přičemž minimální dosaženou hodnotou je 0,06 a maximální hodnotou je 1. Jelikož, průměrná hodnota je 0,995 je tato síť dostatečně kvalitní abychom s ní mohli pokračovat dále.

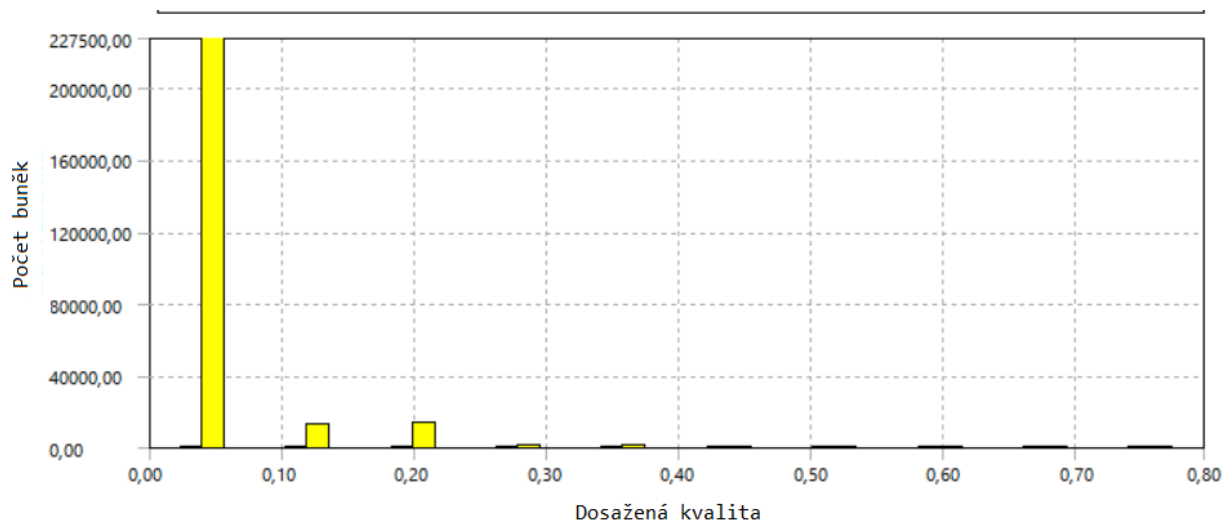
13.2.2 SKEWNESS KVALITA

Skewness kvalita, podle příručky Ansys Fluent [21] nabývá hodnot od 0 do 1, přičemž čím blíže k 0 tím je kvalita lepší. Rozložení skewness kvality je vidět na obr. 16. Skewness kvalita vyjadřuje, jak moc se daná buňka liší od ideálního tvaru buňky. Například pokud máme čtyřúhelníkovou buňku, tak určuje, jak moc se liší od obdélníkové buňky.



Obrázek 16 - Kvalita dle Skewness kritéria [20]

V případě našeho modelu dostáváme rozložení kvality, jaké je na obr. 17.



Obrázek 17 - Dosažená Skewness kvalita

Přičemž minimální dosaženou hodnotou je $1,3 \cdot 10^{-6}$ a maximální hodnotou je 0,79. Jelikož, průměrná hodnota je $2,2 \cdot 10^{-2}$ je tato síť dostatečně kvalitní abychom s ní mohli pokračovat dále.

13.3 NASTAVENÍ VÝPOČTU

V dalším kroku byly v programu Fluent nastaveny parametry výpočtu. Je vyšetřován nestacionární děj s vlivem gravitace, je tedy důležité nastavení tranzitního režim a gravitačního zrychlení ($9,81 \text{m/s}^2$) v ose X. Dále bylo použito řešiče typu Pressure-Based.

Protože jsme zjednodušili CK tank do 2D, je třeba nastavit prostor jako osově symetrický.

Následně bylo v řešiči zapnuto řešení energetické rovnice, abychom dokázali řešit průběh teplot.

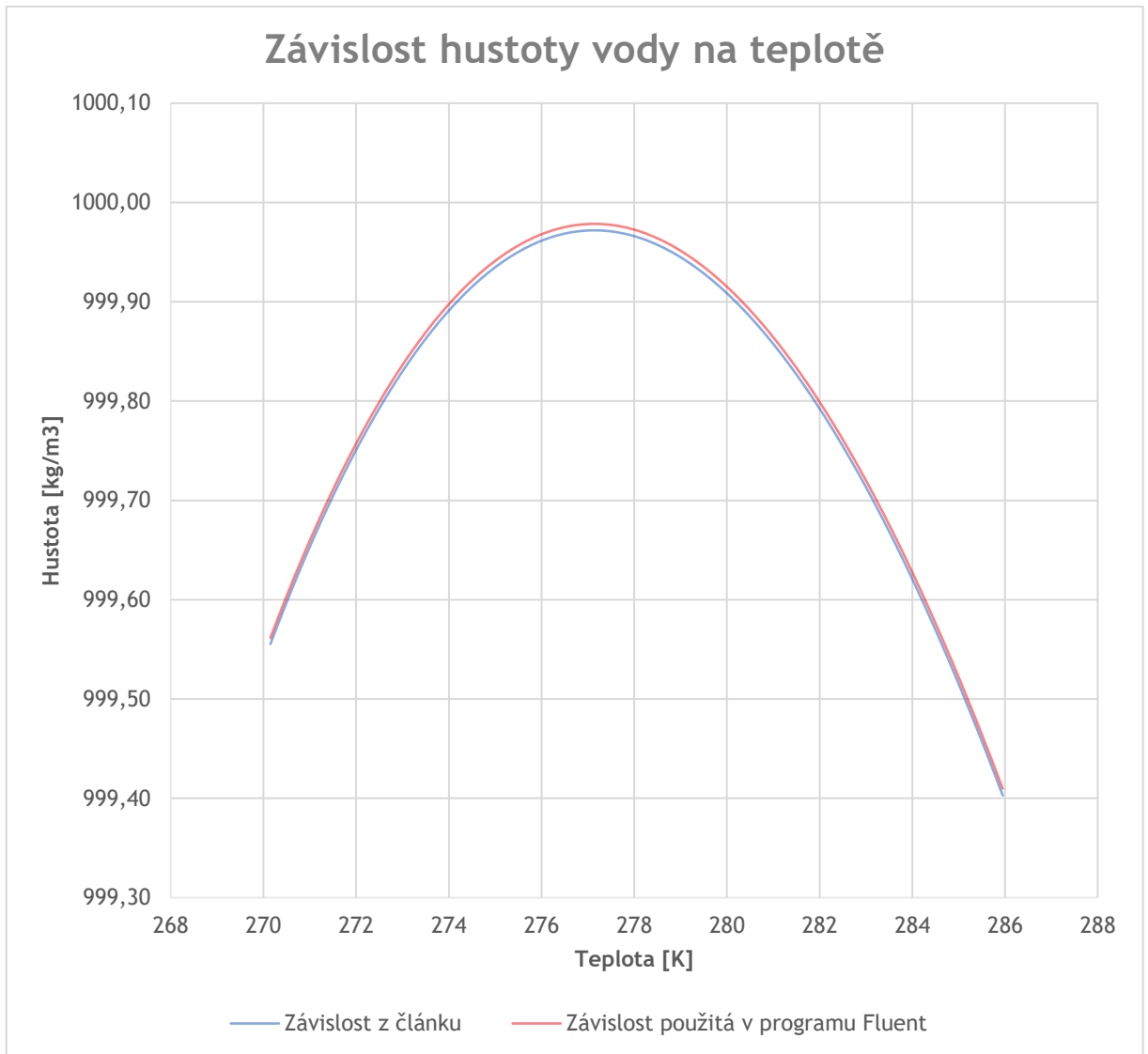
Poté byly nastaveny fyzikální materiály používané ve výpočetním modelu. Jelikož Takamota [4] používá při svém experimentu vodu, a protože pivo je z 95% voda, byly použity fyzikální vlastnosti vody. Tyto vlastnosti byli vzaté z databáze Fluent, a navíc byla přidána polynomiální teplotní závislost hustoty, jak jí uvádí Michálek [20]:

$$\begin{aligned}
 \rho = & 999,840281167108 \\
 & +0,0673268037314653 \cdot T \\
 & -0,00894484552601798 \cdot T^2 \\
 & +8,78462866500416 \cdot 10^{-5} \cdot T^3 \\
 & -6,62139792627547 \cdot 10^{-7} \cdot T^4
 \end{aligned} \tag{48}$$

Jelikož tato závislost je pro teploty ve stupních Celsia (výsledná hustota je v kg/m^3) a Fluent do polynomiálních závislostí dosazuje teplotu ve stupních Kelvina, byla tato závislost vynesena do grafu v programu Excel, který poté těmito daty proložil tento polynom:

$$\rho = -5162,231 + 78,59435 \cdot T - 0,3773476 \cdot T^2 + 8,113002 \cdot 10^{-4} \cdot T^3 - 6,621398 \cdot 10^{-7} \cdot T^4 \quad (49)$$

Rozdíl v těchto závislostech v rozsahu použitých teplot je na obr. 18. Maximální odchylka od původní závislosti je 0,0068 kg/m³.



Obrázek 18 - Závislost hustoty vody na teplotě

Pro stěny tanku byly použity vlastnosti oceli z databáze programu Ansys Fluent.

Jako počáteční podmínka byla nastavena teplota vody na 285 K. Dále bylo nastaveno, že přes celý plášť tanku probíhá konvektivní přestup tepla. Jelikož se Takamota [4] nezmiňuje o rychlosti chladícího média ani o tloušťce stěny jejich tanku, byla zvolena tloušťka 1 mm a součinitel přestupu tepla vně tanku na hodnotu 100 W/m².K dle doporučení - viz tabulka 3. Teplota chladícího média byla nastavena na 270 K. Podmínka pro hladinu tanku byla nastavena tak, že nepřenáší žádné teplo.

2-25	W/m ² .K	Volná konvekce v plynech
10-1 000	W/m ² .K	Volná konvekce v kapalinách
25-250	W/m ² .K	Nucená konvekce v plynech
50-20 000	W/m ² .K	Nucená konvekce v kapalinách
2 500-100 000	W/m ² .K	Var nebo kondenzace

Tabulka 3 - Přibližné hodnoty koeficientu přestupu tepla z Heat Atlasu [21]

Zvolené metody řešení:

Pressure-Velocity Coupling	
Scheme	SIMPLE
Spatial Discretization	
Gradient	Least Squares Cell Based
Pressure	Second Order
Momentum	Second Order Upwind
Energy	Second Order Upwind
Transient Formulation	First Order Implicit

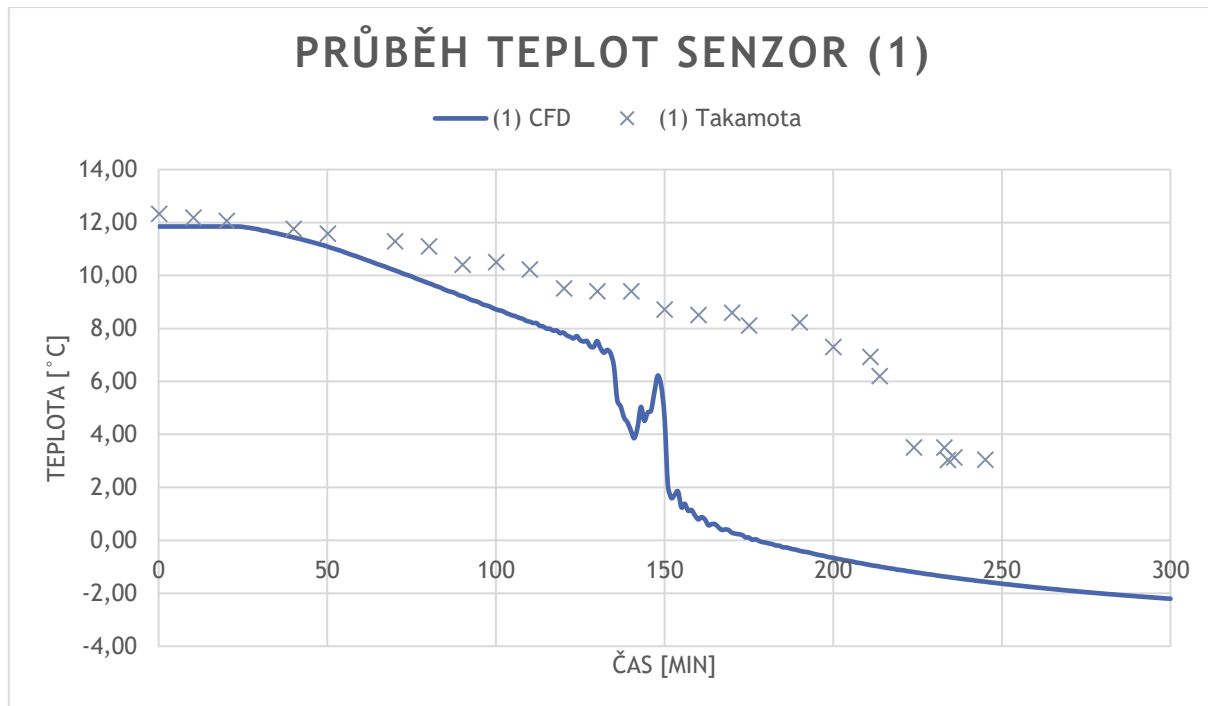
Tabulka 4 - Nastavené metody řešení

Byl zvolen časový krok 1 s s maximem 30 iterací na časový krok. Počet časových kroků byl zvolen 18000, simulace tedy simuluje chlazení po dobu 300 min.

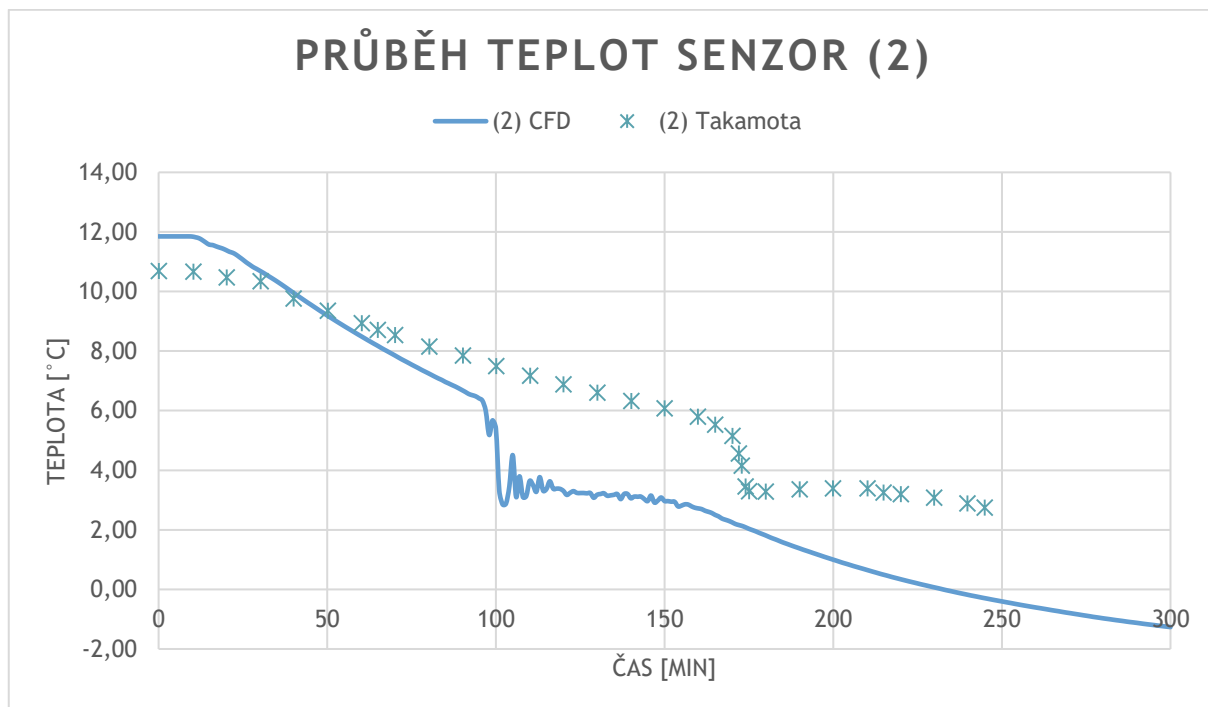
14 VÝSLEDKY Z CFD MODELU

14.1 OVĚŘENÍ VÝSLEDKŮ

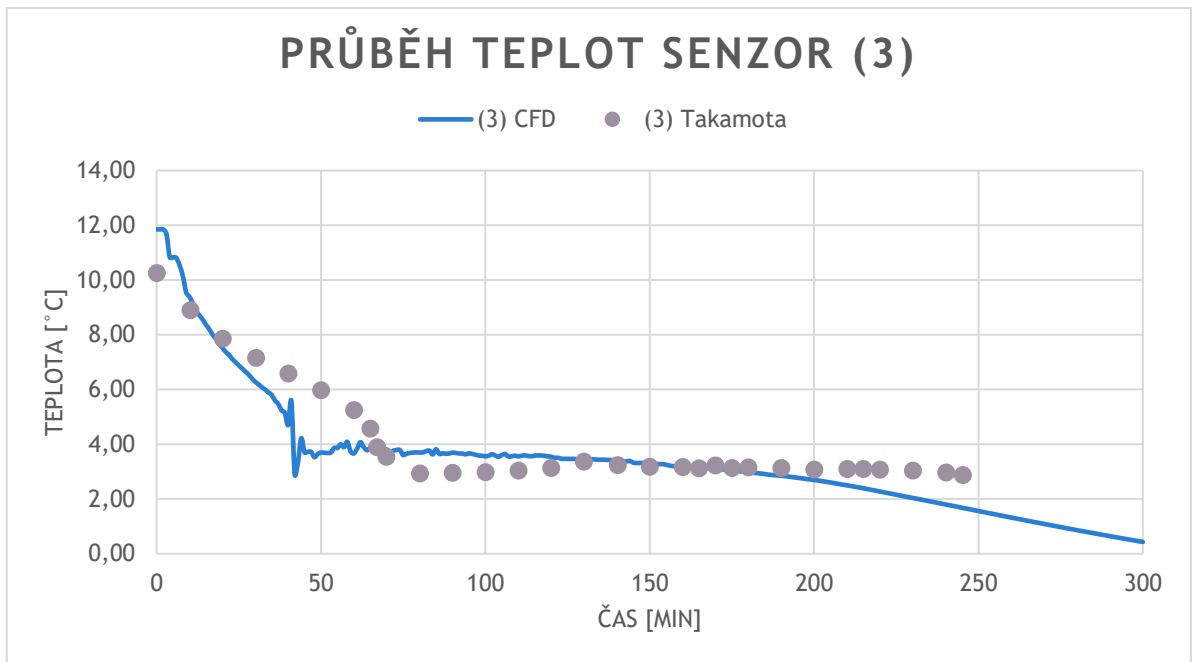
Pro ověření výsledků, byly vykresleny průběhy teplot v bodech, ve kterých měl Takamota umístěné teplotní senzory. Tyto závislosti, a jejich porovnání s Takamotovými výsledky jsou vidět na obr. 19 pro senzor (1), na obr. 20 pro senzor (2) a na obr. 21 pro senzor (3).



Obrázek 19 - Porovnání průběhu teplot mezi CFD simulací a Takamotou pro senzor (1) ($\alpha_{out} = 100 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$)



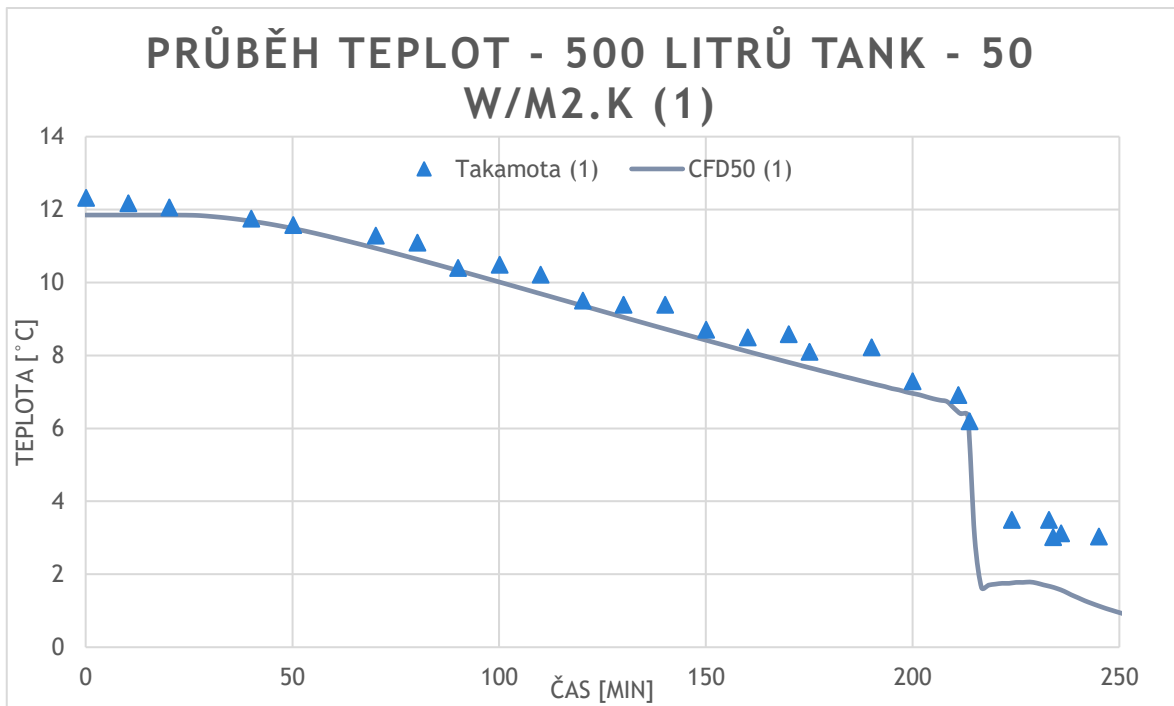
Obrázek 20 - Porovnání průběhu teplot mezi CFD simulací a Takamotou pro senzor (2) ($\alpha_{out} = 100 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$)



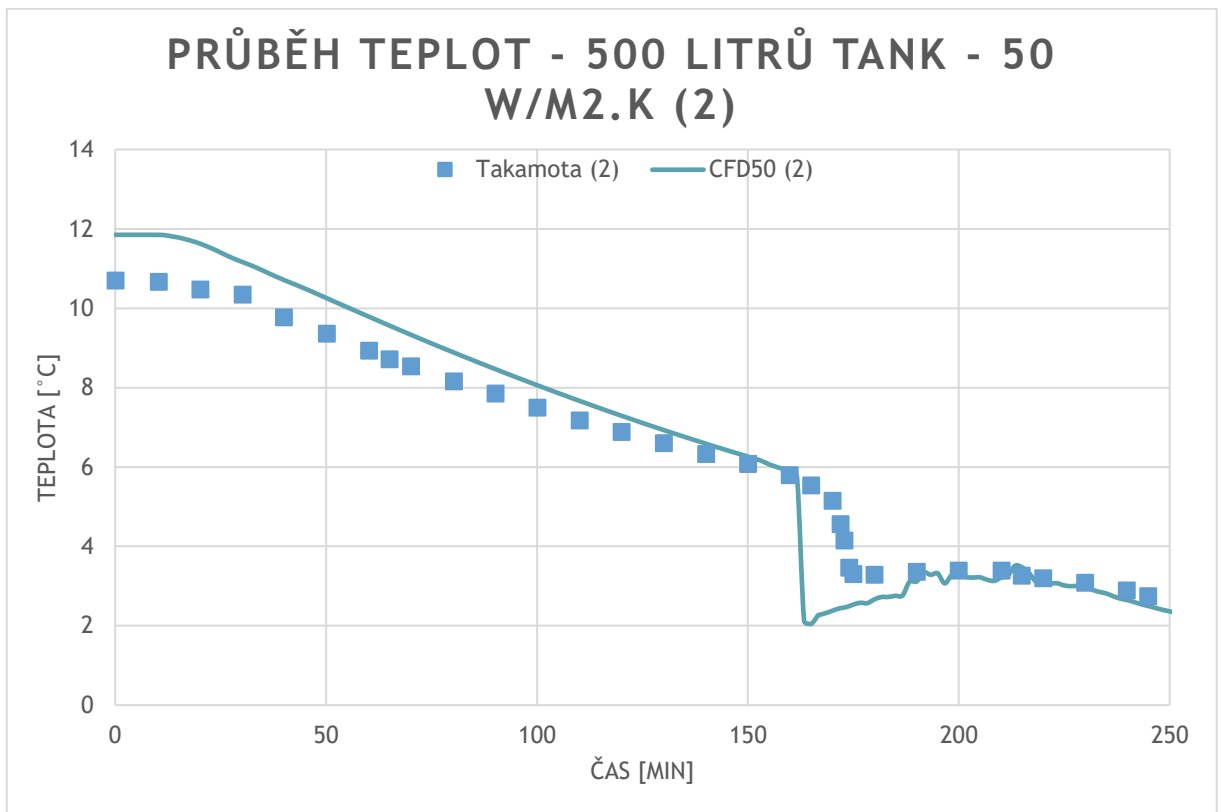
Obrázek 21 - Porovnání průběhu teplot mezi CFD simulací a Takamotou pro senzor (3) ($\alpha_{out} = 100 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$)

Z těchto průběhů lze vidět, že v CFD simulaci probíhá pokles teplot rychleji, tento jev je připisován vlivu zvoleného součinitele tepla, tato teorie byla ověřena na CFD modelu o stejném nastavení jako původní model, jen součinitel přestupu tepla byl nastaven na $50 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ a časový krok byl zvětšen na 5 s, kvůli rychlosti výpočtu. Tyto výsledky jsou porovnány na obr. 22 pro senzor (1) na obr. 23 pro senzor (2) a na obr. 24 pro senzor (3).

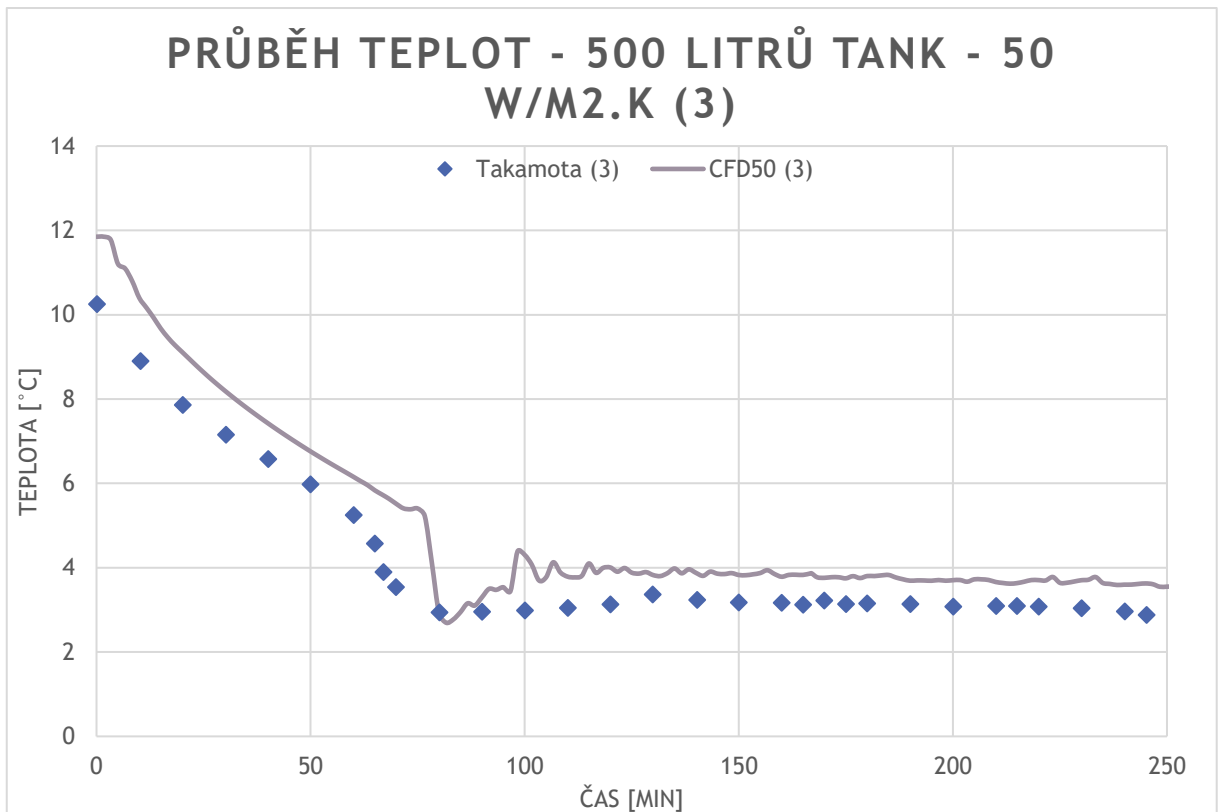
Také je vidět překmitnutí v průběhu teplot u všech senzorů. Toto je způsobeno promícháváním vsádky, jak je vidět na obr. 25 pro senzor (1) na obr. 26 pro senzor (2) a na obr. 27 pro senzor (3).



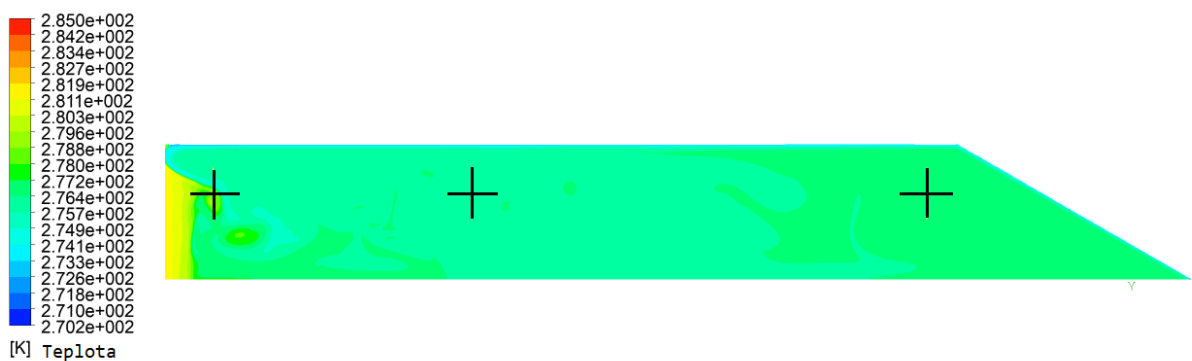
Obrázek 22 - Porovnání průběhu teplot mezi CFD simulací a Takamotou pro senzor (1) ($\alpha_{out} = 50 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$)



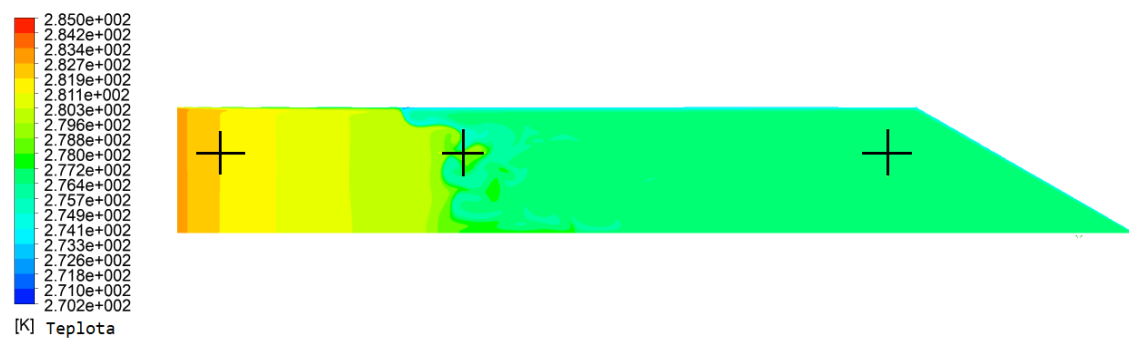
Obrázek 23 - Porovnání průběhu teplot mezi CFD simulací a Takamotou pro senzor (2) ($\alpha_{out} = 50 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$)



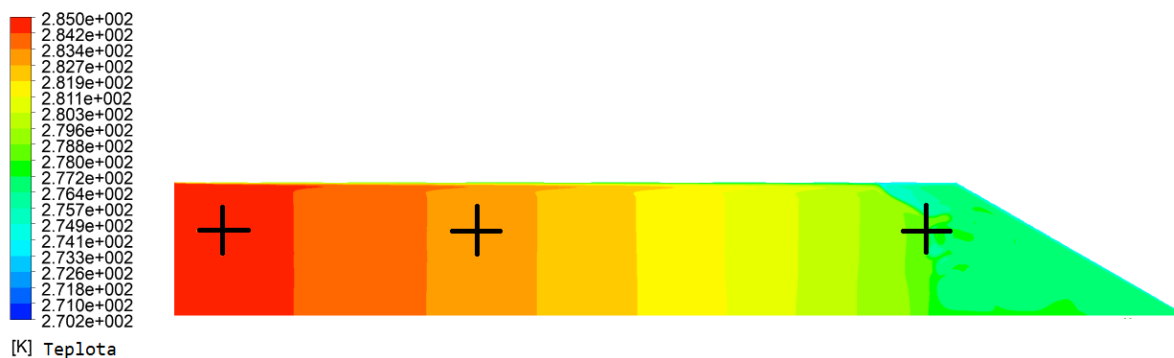
Obrázek 24 - Porovnání průběhu teplot mezi CFD simulací a Takamotou pro senzor (3) ($\alpha_{out} = 50 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$)



Obrázek 25 - Průběh teplot v 150 minutě



Obrázek 26 - Průběh teplot ve 100 minutě

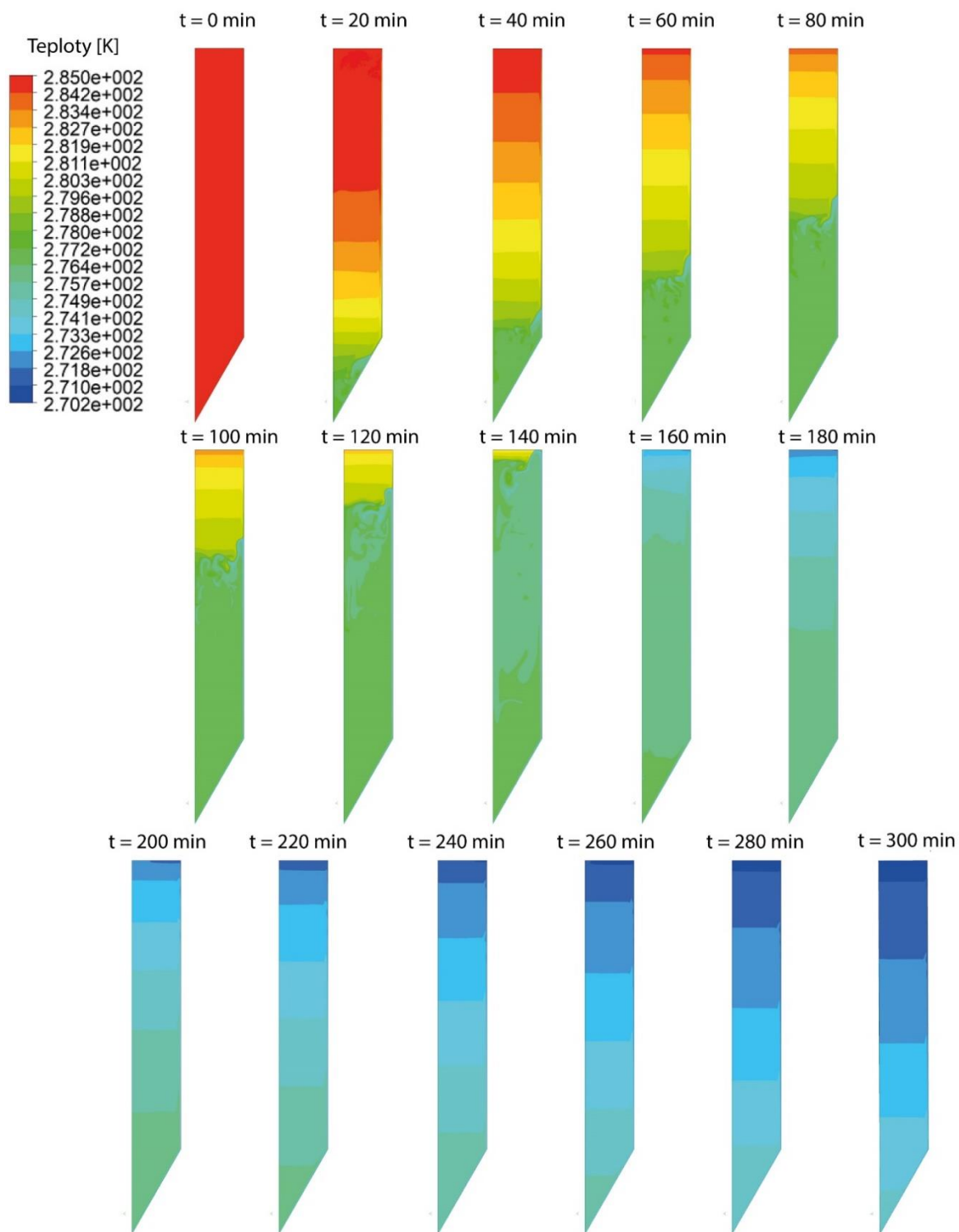


Obrázek 27 - Průběh teplot v 40 minutě

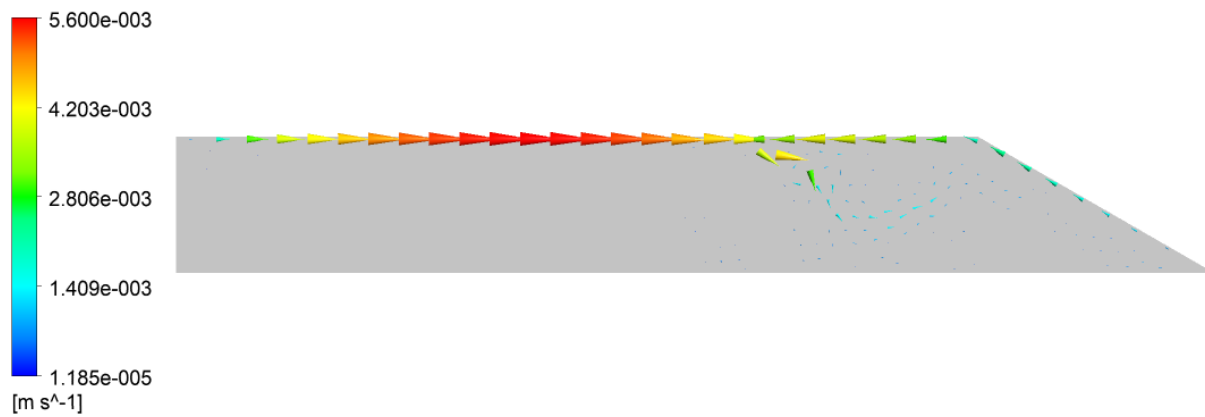
Dále byly použity výsledky s modelovaným součinitelem přestupu tepla na vnější straně tanku $100 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$, jelikož díky menšímu časovému kroku je tento model podrobnější. A také v praxi se budeme snažit dosáhnout větších hodnot součinitel přestupu tepla vně tanku.

14.2 VÝSLEDKY

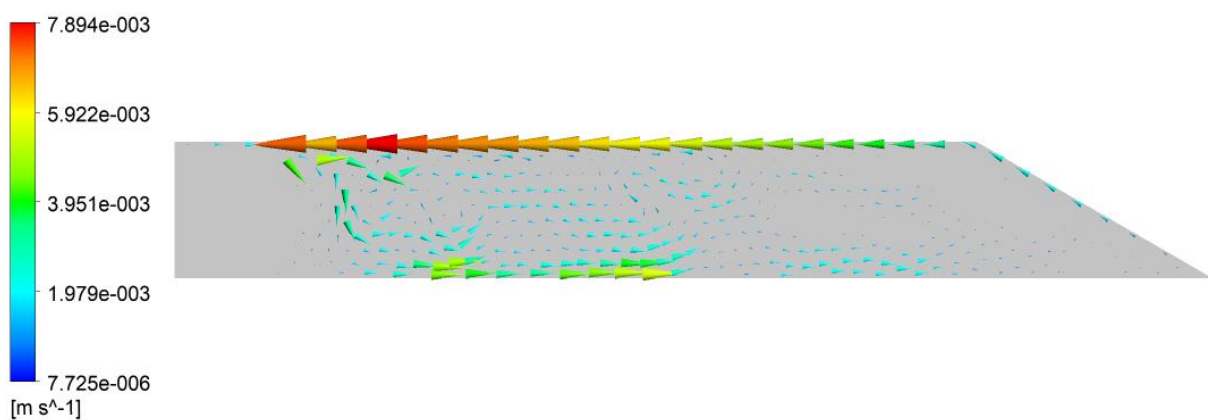
Průběh rozložení teplot v tanku je vidět na obr. 28. Dále jsou na obr. 29 až 33 zobrazeny velikost a směr rychlostí proudu kapaliny v tanku. Z obr. 29 až 33 je vidět směr proudění, který nejprve směřuje dolů, na dno tanku. Poté co teplota na dně je okolo $4 \text{ }^\circ\text{C}$ tak podél oblasti, která má $4 \text{ }^\circ\text{C}$, teče voda směrem vzhůru, kde se sráží s proudem, který směřuje dolů. Oblast, kde se proudy srážejí se v čase přibližuje hladině, až přibližně v čase $t = 140 \text{ min}$. se dostane na hladinu a poté je proudění podél stěny jen směrem vzhůru.



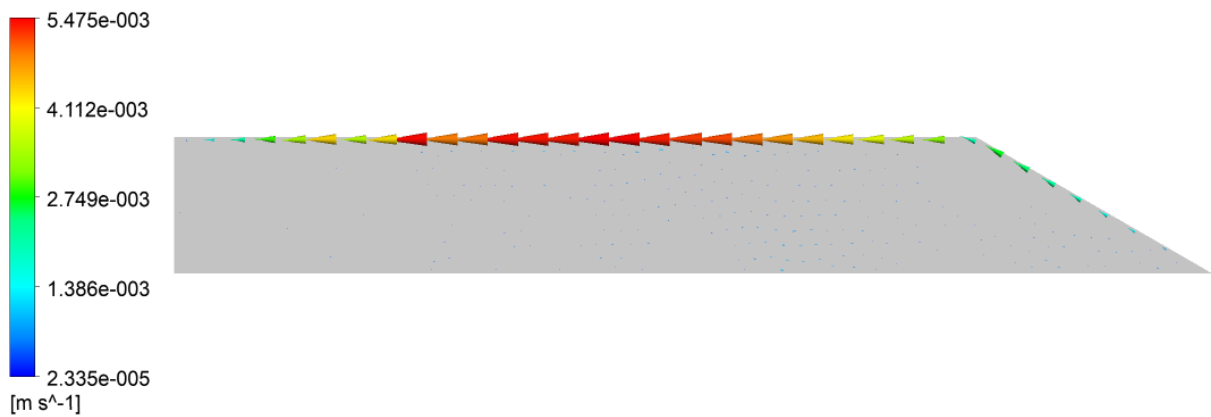
Obrázek 28 - Průběh teplot v CK tanku v čase



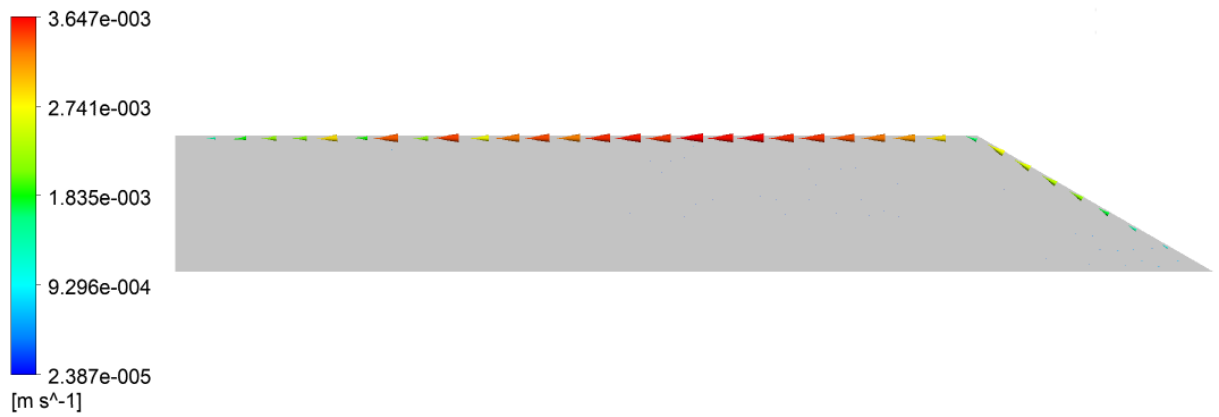
Obrázek 29 - Průběh rychlostí v čase 60 min



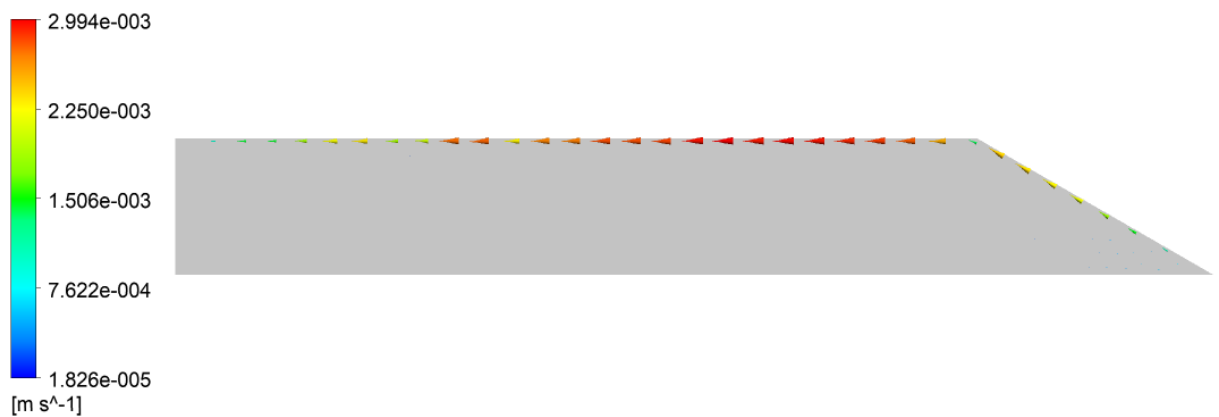
Obrázek 30 - Průběh rychlostí v čase 120 min



Obrázek 31 - Průběh rychlostí v čase 180 min



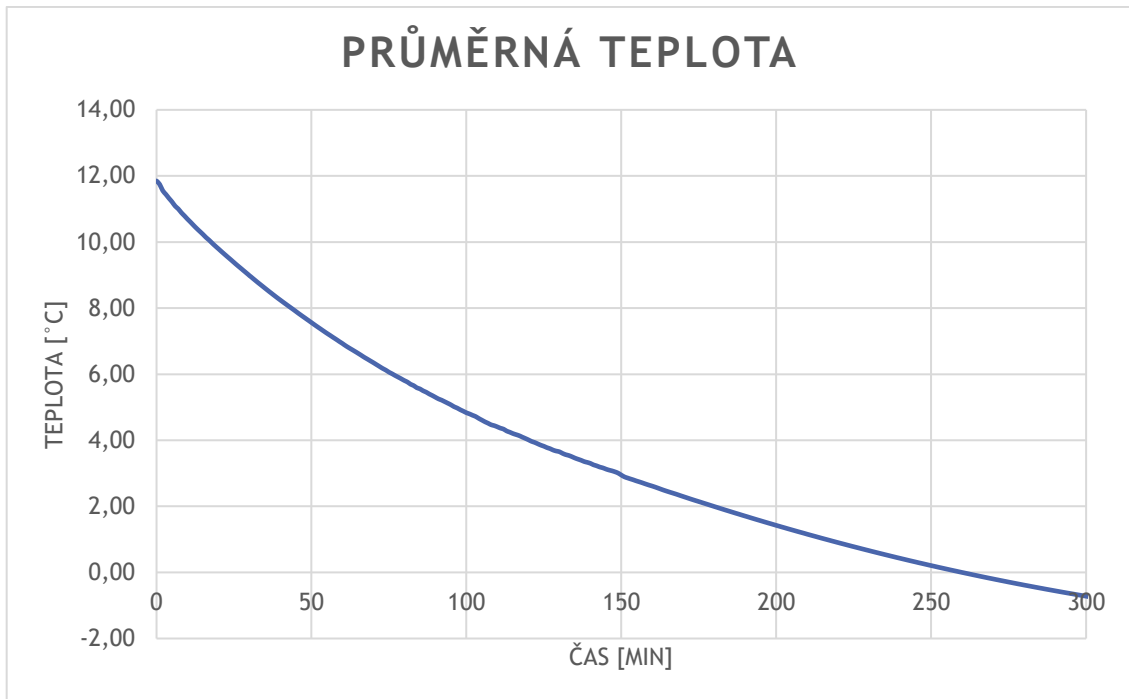
Obrázek 32 - Průběh rychlostí v čase 240 min



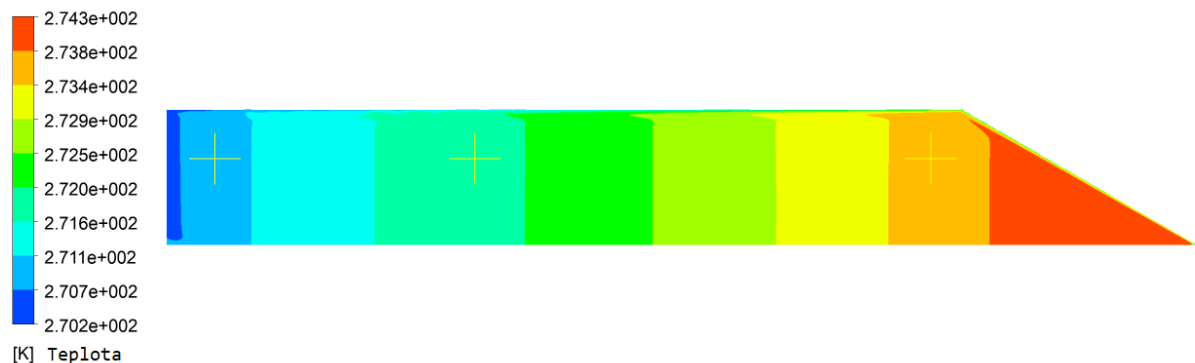
Obrázek 33 - Průběh rychlostí v čase 300 min

Pro určení doby chlazení byla vypočítána průměrná teplota kapaliny v tanku. Po 5 hodinách simulace chlazení se dostáváme na teplotu $-0,72\text{ }^{\circ}\text{C}$. Průběh průměrné teploty v závislosti na čase je zobrazen na obr. 34. Po uplynutí této doby dostáváme rozložení teplot v tanku, jaké lze vidět na obr. 35. Z obr. 35 vyčteme, že minimální teplota vsádky je $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$, kdy už hrozí zamrzávání. Tedy v případě, kdy tank je vybaven chladícími zónami a je možno chlazení regulovat se doporučuje omezit průtok chladiva horním duplikátorem. Maximální teplota je 1

°C tato teplota technologicky tolik nevádí, jelikož oblast s touto teplotou je v kónusu tanku, kde jsou usazené kvasinky, kterých se budeme zbavovat.

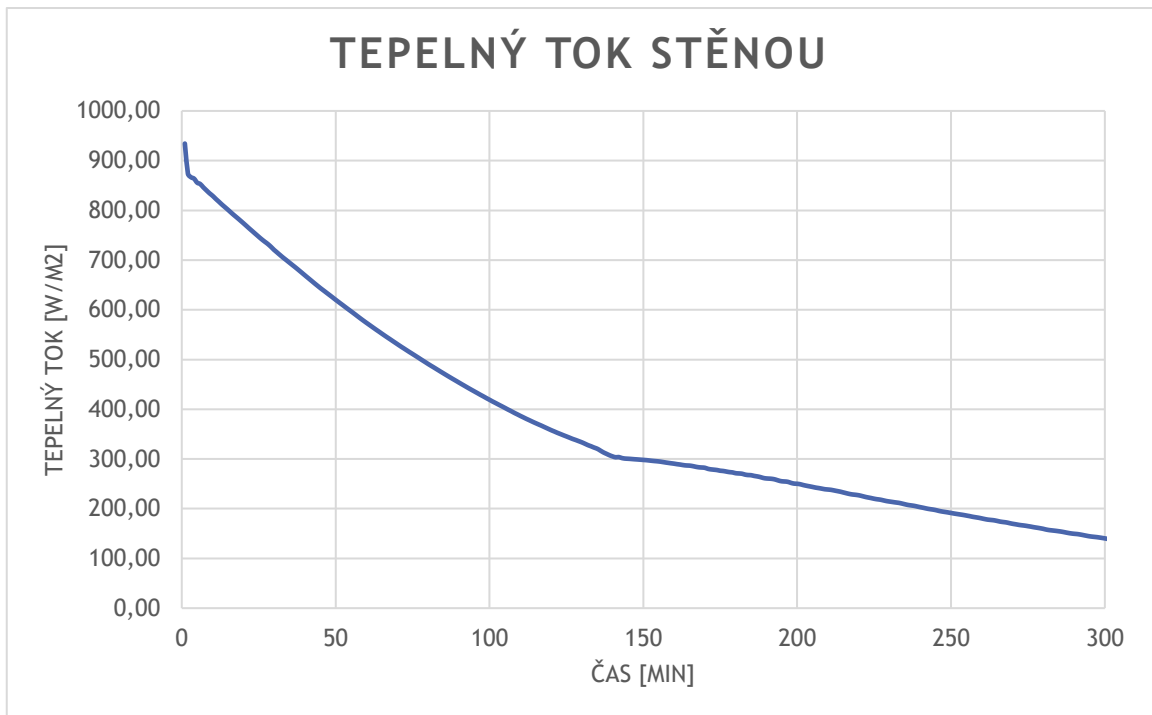


Obrázek 34 - Průběh průměrné teploty v závislosti na čase

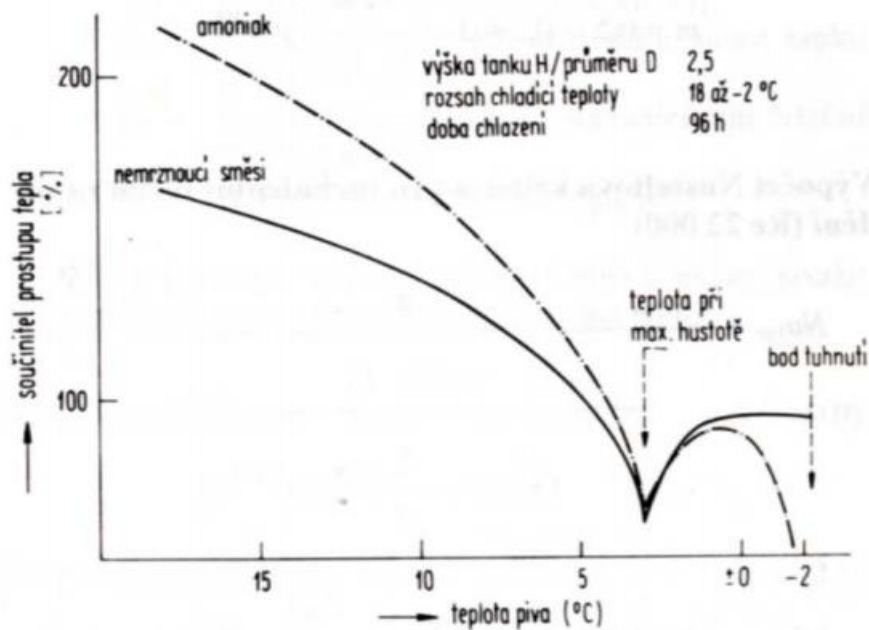


Obrázek 35 - Rozložení teplot v t = 300 minut

Následně byl v jednotlivých časových bodech určen tepelný tok přes stěnu tanku. Tepelné toky v závislosti na čase, jak lze vidět na obr. 36. Průběh z obr. 36 má tři různé směrnice trendu. První je připsán chybě CFD simulace, kdy není simulováno najíždění chlazení. Další je změna okolo 140 minut. Tato změna se dá očekávat, jelikož o ní píše Felgentraeger [22]. Felgentraeger popisuje průběh součinitele prostupu tepla při chlazení CK tanků v závislosti na teplotě (a na ní závislé hustotě). Tato závislost je vidět na obr. 37. Jelikož v čase 140 minut je teplota vsádky okolo 4 °C, při které dosahuje nejvyšší hustoty je změna směrnice na obr. 36 pochopitelná.



Obrázek 36 - Průběh tepelného toku stěnou v závislosti na čase



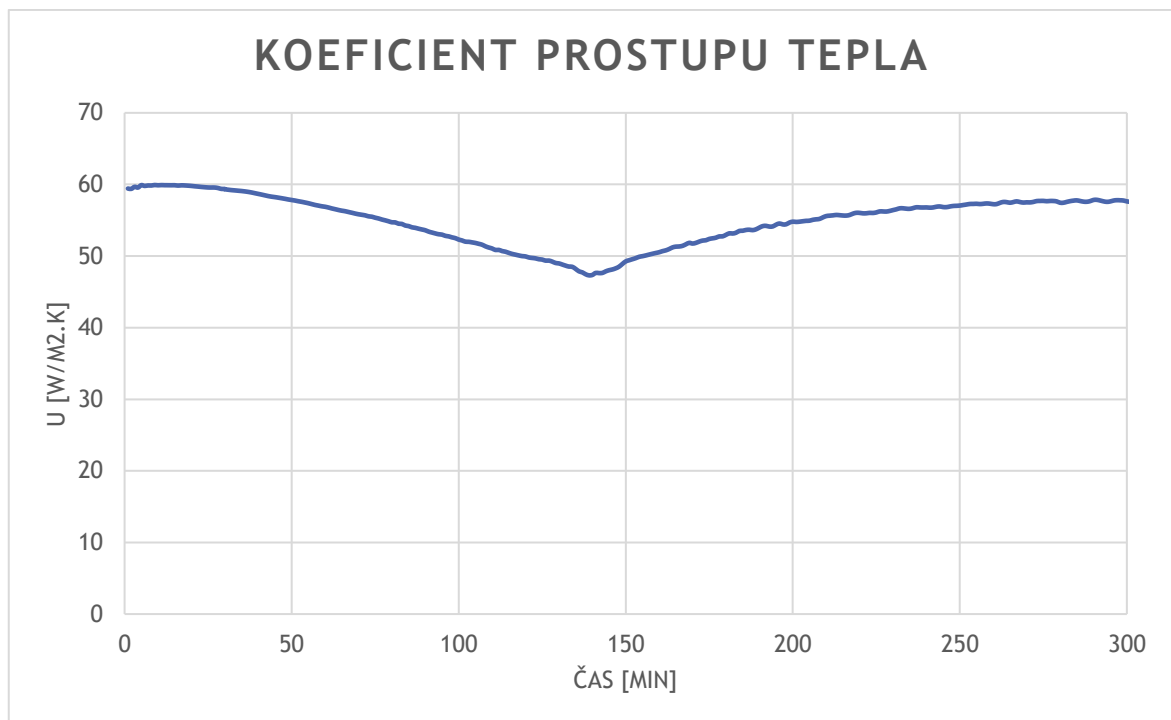
Obrázek 37 - Závislost součinitele prostupu tepla na teplotě [22]

Pomocí tepelného toku a průměrné teploty určíme součinitel prostupu tepla podle rovnice:

$$U = \frac{q(t)}{(T_a(t) - T_{ch})} \quad (50)$$

Koeficient prostupu tepla v závislosti na čase je zobrazen na obr. 38. Lze také vidět, že dochází ke klesání hodnoty součinitele prostupu tepla, jak uvádí Felgentreager [22]. Pro porovnání

s korelacemi byla určena průměrná hodnota koeficientu prostupu tepla po dobu chlazení 5 hodin, která je 55,8 W/m².K.

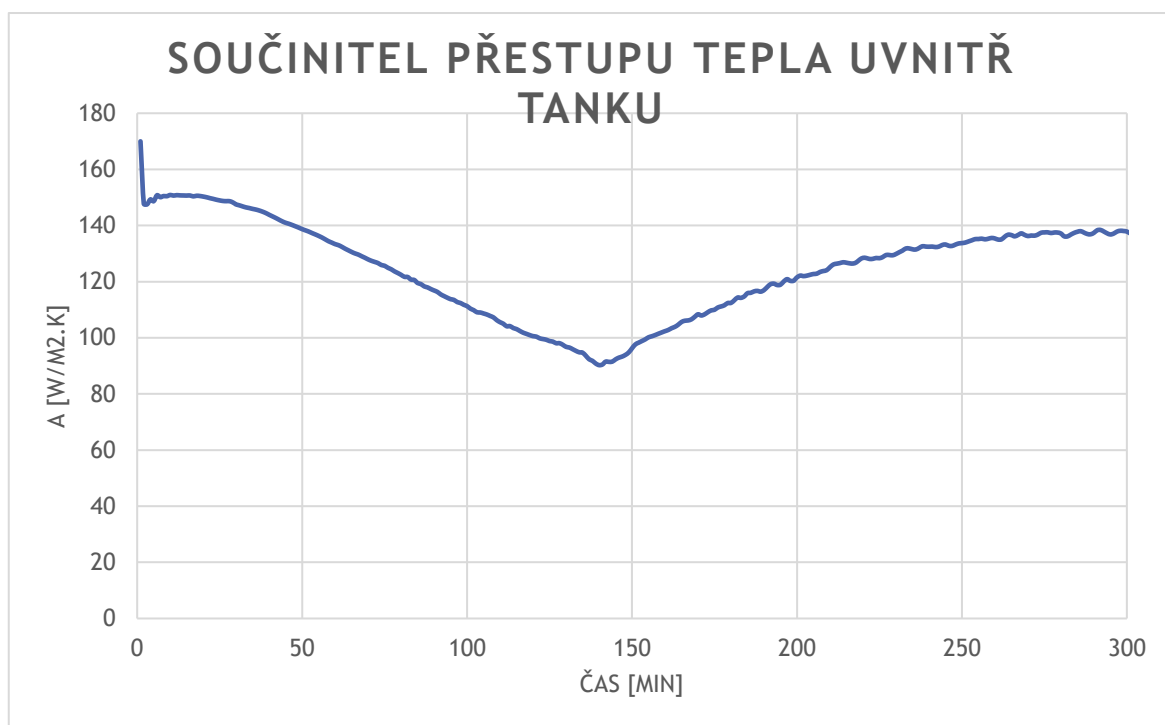


Obrázek 38 - Koeficient prostupu tepla v závislosti na čase

Z koeficientu prostupu tepla získáme koeficient přestupu tepla uvnitř tanku vztahem:

$$\alpha_{in} = \left(\frac{1}{U} - \frac{s}{\lambda_o} - \frac{1}{\alpha_{out}} \right)^{-1} \quad (51)$$

Závislost koeficientu přestupu tepla uvnitř tanku na čase je na obr. 39. Na této závislosti je vidět stejný trend o kterém píše Felgentreager [22]. Navíc je lze vidět chyba numerického řešení, kdy na začátku procesu je zde velký skok, jelikož v CFD simulaci není simulováno najíždění chlazení. Pro porovnání s výsledky korelací byla určena průměrná hodnota součinitele přestupu tepla uvnitř tanku, která je 124,86 W/m².K. Také je vidět, že součinitel přestupu tepla uvnitř tanku je přibližně stejně velký, jako součinitel přestupu tepla vně tanku, nejde ho tedy zanedbat.



Obrázek 39 - Součinitel přestupu tepla uvnitř tanku v závislosti na čase

15 VÝSLEDKY Z KORELACÍ

Pro výpočet korelací byly vzaty parametry vody. Parametry hustoty a součinitel teplotní roztažnosti byly vzaty z Michálka [20]. Hodnoty dynamické viskozity, tepelné vodivosti a měrné tepelné kapacity byly převzaty z databáze programu Fluent. Dále byly použity rozměry tanku stejné jako u CFD simulace. Pro výpočet je počítáno s ocelovou stěnou. Tepelná vodivost oceli byla vzata z programu Fluent.

Veličina	Označení	Hodnota	Jednotky
Hustota	ρ	999,8	kg/m ³
Součinitel teplotní roztažnosti	β	$-6,733353 \times 10^{-5}$	1/K
Dynamická viskozita	η	0,001003	kg/m.s
Kinetická viskozita	ν	$1,0032 \times 10^{-6}$	m ² /s
Tepelná vodivost vody	λ_v	0,6	W/m.K
Měrná tepelná kapacita	C_p	4182	J/kg.K
Výška tanku	H	2,1	m
Průměr tanku	D	0,55	m
Gravitační zrychlení	g	9,81	m/s ²
Tepelná vodivost oceli	λ_o	16,27	W/m.K
Tloušťka stěny	s	0,001	m

Tabulka 5 - Použité veličiny pro výpočet

Také je dalším důležitým parametrem součinitel teplotní vodivosti:

$$a = \frac{\lambda_v}{\rho \cdot c_p} \quad (52)$$

$$a = \frac{0,6}{999,8 \cdot 4182} = 1,435 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s} \quad (53)$$

Dále bude potřeba vypočítat objem CK tanku:

$$V = \pi \cdot \frac{D^2}{4} \cdot H_V + \frac{1}{3} \cdot \pi \cdot \frac{D^2}{4} \cdot H_K \quad (54)$$

Kde H_V je výška válce, $H_V = 1,624$ m a H_K je výška kužele $H_K = 0,476$ m.

$$V = \pi \cdot \frac{0,55^2}{4} \cdot 1,624 + \frac{1}{3} \cdot \pi \cdot \frac{0,55^2}{4} \cdot 0,476 = 0,424 \text{ m}^3 \quad (55)$$

Z této hodnoty vypočítáme hmotnost vody v tanku:

$$m = \rho \cdot V \quad (56)$$

$$m = 999,8 \cdot 0,424 = 423 \text{ kg} \quad (57)$$

Také je potřeba vypočítat plochu chladicí stěny:

$$A = \pi \cdot D^2 \cdot H_V + \pi \cdot R \cdot \sqrt{R^2 + H_K^2} \quad (58)$$

$$A = \pi \cdot 0,55^2 \cdot 1,624 + \pi \cdot 0,275 \cdot \sqrt{0,275^2 + 0,476^2} = 3,28 \text{ m}^2 \quad (59)$$

15.1 RODRIGUEZ

Pro výpočet korelace dle Rodriguez budeme nejdříve potřebovat Rayleighovo číslo:

$$Ra = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta T_{ref} \cdot L_{ref}^3}{\vartheta \cdot a} \quad (60)$$

kde referenční rozdíl teplot je:

$$\Delta T_{ref} = T_0 - T_{ch} \quad (61)$$

Kde T_0 je počáteční teplota, kterou použijeme stejnou jako u CFD simulace, tedy $T_0 = 285$ K (=11,85 °C) a stejně tak pro teplotu chladiva $T_{ch} = 270$ K (=−3,15 °C).

$$\Delta T_{ref} = 285 - 270 = 15 \text{ K} \quad (62)$$

L_{ref} je výška nádoby, tedy:

$$Ra = \frac{9,81 \cdot 6,733353 \cdot 10^{-5} \cdot 15 \cdot 2,1^3}{1,0032 \cdot 10^{-6} \cdot 1,435 \cdot 10^{-7}} = 6,37 \cdot 10^{11} \quad (63)$$

Dále je v korelaci potřeba bezrozměrný čas:

$$\tau = \frac{t \cdot v_{ref}}{L_{ref}} \quad (64)$$

kde referenční rychlost je:

$$v_{ref} = \frac{a}{L_{ref}} \quad (65)$$

$$v_{ref} = \frac{1,435 \cdot 10^{-7}}{2,1} = 6,8334 \cdot 10^{-8} \text{ m/s} \quad (66)$$

Počítáme stejný děj jako v CFD simulaci, tedy $t = 5$ hod (=18 000 s):

$$\tau = \frac{18\,000 \cdot 6,8334 \cdot 10^{-8}}{2,1} = 5,86 \cdot 10^{-4} \quad (67)$$

V neposlední řadě je třeba určit bezrozměrný celkový součinitel prostupu tepla:

$$\hat{U} = \frac{U \cdot H}{\lambda_v} \quad (68)$$

Proto je třeba si určit celkový součinitel prostupu tepla:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{\alpha_{in}} + \frac{s}{\lambda_o} + \frac{1}{\alpha_{out}} \quad (69)$$

Zde použijeme α_{out} stejný jako v CFD simulaci a α_{in} budeme muset odhadnout a do iterovat později. Odhad $\alpha_{in} = 100 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$

$$U = \left(\frac{1}{\alpha_{in}} + \frac{s}{\lambda_o} + \frac{1}{\alpha_{out}} \right)^{-1} \quad (70)$$

$$U = \left(\frac{1}{100} + \frac{0,001}{16,27} + \frac{1}{100} \right)^{-1} = 62,09 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \quad (71)$$

$$\hat{U} = \frac{62,09 \cdot 2,1}{0,6} = 217,3 \quad (72)$$

Nyní máme všechny vztahy a tedy:

$$\overline{Nu} = 4,5851 \tau^{-0,1686} Ra^{0,0686} (H/D)^{0,5304} \hat{U}^{0,1981} \quad (73)$$

$$\overline{Nu} = 4,5851 \cdot (5,86 \cdot 10^{-4})^{-0,1686} \cdot (6,37 \cdot 10^{11})^{0,0686} \cdot \left(\frac{2,1}{0,55} \right)^{0,5304} \cdot 217,3^{0,1981} = 587,22 \quad (74)$$

Nusseltovo číslo Rodriguez počítá dle vztahu:

$$\overline{Nu} = \frac{\alpha_{in} \cdot H}{\lambda_v} \quad (75)$$

Tedy pro α_{in} :

$$\alpha_{in} = \frac{\overline{Nu} \cdot \lambda_v}{H} \quad (76)$$

$$\alpha_{in} = \frac{587,22 \cdot 0,6}{2,1} = 167,78 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \quad (77)$$

Tento výsledek neodpovídá původnímu odhadu, tedy iterujeme v programu Excel, přičemž výsledné Nusseltovo číslo, α_{in} a U :

$$\overline{Nu} = 616,1 \quad (78)$$

$$\alpha_{in} = 176 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \quad (79)$$

$$U = 63,5 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \quad (80)$$

Pro porovnání byla vypočítána doba, za kterou díky této korelaci dosáhneme finální teploty z CFD simulace:

$$\Delta t = \frac{m \cdot c_p}{U \cdot A} \ln \left(\frac{T_0 - T_{ch}}{T_{fin} - T_{ch}} \right) \quad (81)$$

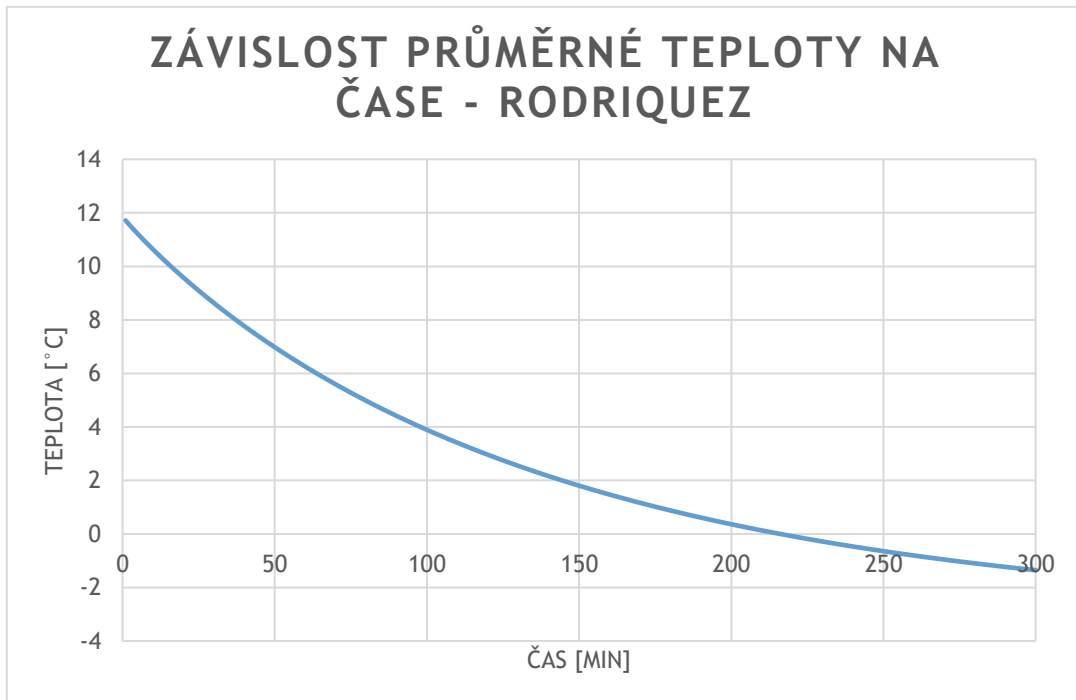
$$\Delta t = \frac{423 \cdot 4182}{63,5 \cdot 3,28} \ln \left(\frac{285 - 270}{272,43 - 270} \right) = 15458 \text{ s} = 257,6 \text{ min} \quad (82)$$

Dále pro porovnání byla vypočítána teplota, které dosáhneme při použití této korelace a době chlazení 5 hodin:

$$T_{fin} = T_{ch} + \frac{T_0 - T_{ch}}{e^{\frac{\Delta t \cdot U \cdot A}{m \cdot c_p}}} \quad (83)$$

$$T_{fin} = 270 + \frac{285 - 270}{e^{\frac{18000 \cdot 63,5 \cdot 3,28}{423 \cdot 4182}}} = 271,8 \text{ K} = -1,35 \text{ }^\circ\text{C} \quad (84)$$

Dále byly hodnoty součinitele prostupu tepla a průměrné teploty CK tanku vypočítány v čase 1-300 minut s krokem 1 minuta. Závislost průměrné teploty na čase dle této korelace je vidět na obr. 40.



Obrázek 40 - Závislost průměrné teploty na čase dle korelace - Rodriquez

15.2 Y.S.LIN - AKINS

Pro výpočet Nusseltova čísla dle této korelace nám stačí Rayleighova číslo:

$$Ra = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta T_{ref} \cdot L_{ref}^3}{\vartheta \cdot a} \quad (85)$$

Referenční rozdíl teplot je průměr mezi rozdílem počáteční teploty kapaliny a teplotou stěny:

$$\Delta T_{ref} = \frac{T_o - T_w}{2} \quad (86)$$

Jelikož teplota stěny není známa, je odhadnuta jako $T_w = 275 \text{ K}$

$$\Delta T_{ref} = \frac{285 - 275}{2} = 5 \text{ K} \quad (87)$$

A charakteristický rozměr je průměr nádoby:

$$Ra = \frac{9,81 \cdot 6,733353 \cdot 10^{-5} \cdot 5 \cdot 0,55^3}{1,0032 \cdot 10^{-6} \cdot 1,435 \cdot 10^{-7}} = 3,82 \cdot 10^9 \quad (88)$$

Tedy korelace pro Nusseltovo číslo je:

$$\overline{Nu} = 0,55 \cdot Ra^{0,25} \quad (89)$$

$$\overline{Nu} = 0,55 \cdot (3,82 \cdot 10^9)^{0,25} = 136,7 \quad (90)$$

A tedy díky Definici Nusseltova čísla můžeme vypočítat α_{in} :

$$\overline{Nu} = \frac{\alpha_{in} \cdot D}{\lambda_v} \quad (91)$$

$$\alpha_{in} = \frac{\overline{Nu} \cdot \lambda_v}{D} \quad (92)$$

$$\alpha_{in} = \frac{136,7 \cdot 0,6}{0,55} = 149,1 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \quad (93)$$

A navíc vypočítáme celkový součinitel prostupu tepla U :

$$U = \left(\frac{1}{\alpha_{in}} + \frac{s}{\lambda_o} + \frac{1}{\alpha_{out}} \right)^{-1} \quad (94)$$

$$U = \left(\frac{1}{149,1} + \frac{0,001}{16,27} + \frac{1}{100} \right)^{-1} = 59,64 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \quad (95)$$

Pro ověření počátečního odhadu teploty stěny je spočítán tepelný tok:

$$\dot{q} = U \cdot (T_o - T_{ch}) \quad (96)$$

$$\dot{q} = 59,64 \cdot (285 - 270) = 894,63 \text{ W/m}^2 \quad (97)$$

Z čehož je dopočítána teplota stěny:

$$\dot{q} = \alpha_{out} \cdot (T_w - T_{ch}) \quad (98)$$

$$T_W = T_{ch} + \frac{\dot{q}}{\alpha_{out}} \quad (99)$$

$$T_W = 270 + \frac{894,63}{100} = 278,9 \text{ K} \quad (100)$$

Tato hodnota se neshoduje s původním odhadem teploty stěny, a proto tato hodnota byla v programu excel doiterována. Výsledné hodnoty jsou:

$$T_W = 278,53 \text{ K} \quad (101)$$

$$\overline{Nu} = 122,61 \quad (102)$$

$$\alpha_{in} = 133,75 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \quad (103)$$

$$U = 57 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \quad (104)$$

Pro porovnání byla vypočítána doba, za kterou díky této korelaci dosáhneme finální teploty z CFD simulace:

$$\Delta t = \frac{m \cdot c_p}{U \cdot A} \ln \left(\frac{T_0 - T_{ch}}{T_{fin} - T_{ch}} \right) \quad (105)$$

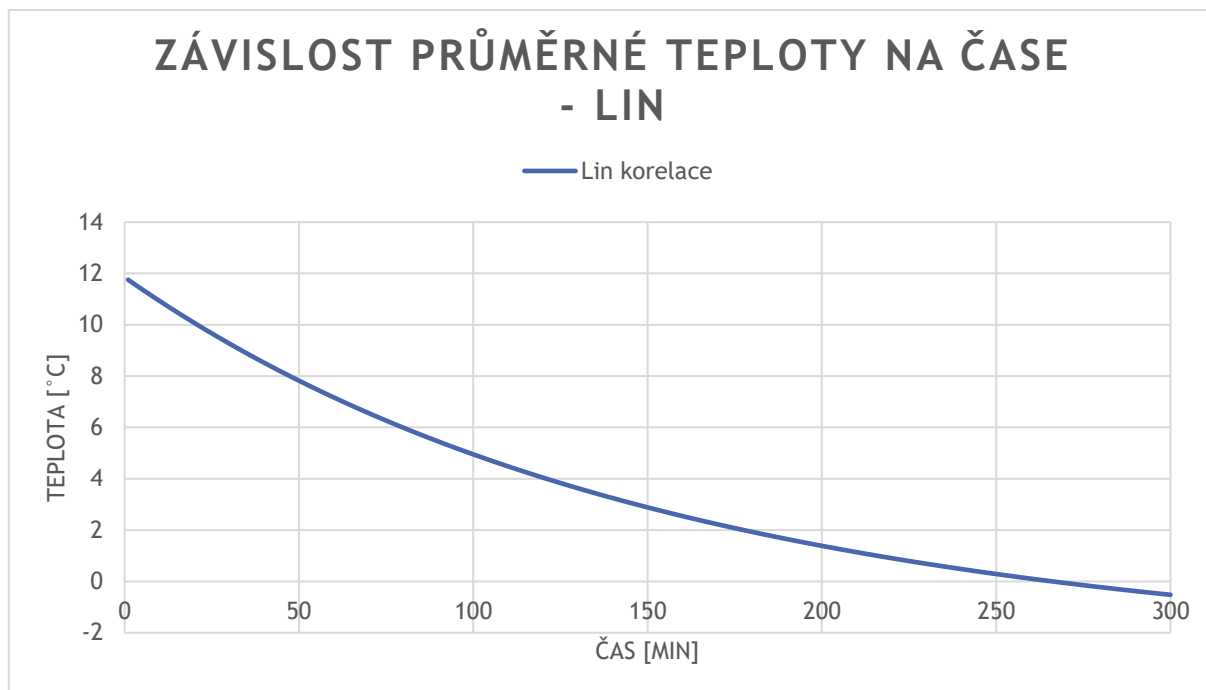
$$\Delta t = \frac{423 \cdot 4182}{57 \cdot 3,28} \ln \left(\frac{285 - 270}{272,43 - 270} \right) = 17221 \text{ s} = 287 \text{ min} \quad (106)$$

Dále pro porovnání byla vypočítána teplota, které dosáhneme při použití této korelace a době chlazení 5 hodin:

$$T_{fin} = T_{ch} + \frac{T_0 - T_{ch}}{e^{\frac{\Delta t \cdot U \cdot A}{m \cdot c_p}}} \quad (107)$$

$$T_{fin} = 270 + \frac{285 - 270}{e^{\frac{18000 \cdot 57 \cdot 3,28}{423 \cdot 4182}}} = 272,2 \text{ K} = -0,9 \text{ }^\circ\text{C} \quad (108)$$

Dále byl tento děj brán jako pseudo-stacionární, přičemž výpočet byl proveden v rozsahu 1-300 min s korkem 1 min. Jako T_0 byla vzata T_{fin} z předchozího kroku. A tato teplota byla použita k výpočtu Rayleightova čísla a následně i Nusseltova čísla, jak je popsáno v předchozí části. Získaná závislost průměrné teploty v závislosti na čase je na obr. 41. Průměrný součinitel prostupu tepla je $U = 52,2 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$.



Obrázek 41 - Závislost průměrné teploty na čase dle korelace Lin

15.3 OLIVESKI

Pro výpočet korelací dle Oliveskiho nejprve potřebujeme součinitel prostupu tepla dle Oliveskiho použitého vztahu:

$$U = \left(\frac{s}{\lambda_o} + \frac{1}{\alpha_{out}} \right)^{-1} \quad (109)$$

$$U = \left(\frac{0,001}{16,27} + \frac{1}{100} \right)^{-1} = 99,4 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \quad (110)$$

Dále pak počítáme obě korelace pro různé objemy:

15.3.1.1 V = 0,1 m³

V této korelaci se používá rozdíl počáteční teploty a teploty chladiva:

$$\overline{Nu}(H/D)^{-0,3} = (9,40739 \overline{U}^{0,288329}) (1000(T_0 - T_{ch})^{-1} - 20)^{0,00988842 \overline{U} - 0,189428} \quad (111)$$

$$\overline{Nu}(H/D)^{-0,3} = (9,40739 \cdot 99,4^{0,288329}) (1000(285 - 270)^{-1} - 20)^{0,00988842 \cdot 99,4 - 0,189428} \quad (112)$$

$$\overline{Nu}(H/D)^{-0,3} = 747,3 \quad (113)$$

A z tohoto vztahu dopočítáme Nusseltovo číslo:

$$\overline{Nu} = \frac{747,3}{\left(\frac{H}{D} \right)^{-0,3}} \quad (114)$$

$$\overline{Nu} = \frac{747,3}{\left(\frac{2,1}{0,55} \right)^{-0,3}} = 1117 \quad (115)$$

Dále z Nusseltova čísla vypočítáme součinitel přestupu tepla na straně kapaliny, kde charakteristický rozměr pro Nusseltovo číslo je výška tanku:

$$\overline{Nu} = \frac{\alpha_{in} \cdot H}{\lambda_v} \quad (116)$$

$$\alpha_{in} = \frac{\overline{Nu} \cdot \lambda_v}{H} \quad (117)$$

$$\alpha_{in} = \frac{1117 \cdot 0,6}{2,1} = 319 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \quad (118)$$

A celkový součinitel prostupu tepla tedy je:

$$U = \left(\frac{1}{\alpha_{in}} + \frac{s}{\lambda_o} + \frac{1}{\alpha_{out}} \right)^{-1} \quad (119)$$

$$U = \left(\frac{1}{319} + \frac{0,001}{16,27} + \frac{1}{100} \right)^{-1} = 75,8 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \quad (120)$$

Pro porovnání byla vypočítána doba, za kterou díky této korelaci dosáhneme finální teploty z CFD simulace:

$$\Delta t = \frac{m \cdot c_p}{U \cdot A} \ln \left(\frac{T_0 - T_{ch}}{T_{fin} - T_{ch}} \right) \quad (121)$$

$$\Delta t = \frac{423 \cdot 4182}{75,8 \cdot 3,28} \ln \left(\frac{285 - 270}{272,43 - 270} \right) = 12950 \text{ s} = 215,8 \text{ min} \quad (122)$$

Dále pro porovnání byla vypočítána teplota, které dosáhneme při použití této korelace a době chlazení 5 hodin:

$$T_{fin} = T_{ch} + \frac{T_0 - T_{ch}}{e^{\frac{\Delta t \cdot U \cdot A}{m \cdot c_p}}} \quad (123)$$

$$T_{fin} = 270 + \frac{285 - 270}{e^{\frac{18000 \cdot 75,8 \cdot 3,28}{423 \cdot 4182}}} = 271,2 \text{ K} = -1,95 \text{ }^\circ\text{C} \quad (124)$$

15.3.1.2 V = 0,2 m³

V této korelaci se používá rozdíl počáteční teploty a teploty chladiva:

$$\overline{Nu}(H/D)^{-0,3} = (10,6039 \overline{U}^{0,310719}) (1000(T_0 - T_{ch})^{-1} - 20)^{0,013052 \overline{U} - 0,224677} \quad (125)$$

$$\overline{Nu}(H/D)^{-0,3} = (10,6039 \cdot 99,4^{0,310719}) (1000(285 - 270)^{-1} - 20)^{0,013052 \cdot 99,4 - 0,224677} \quad (126)$$

$$\overline{Nu}(H/D)^{-0,3} = 2730 \quad (127)$$

A z tohoto vztahu dopočítáme Nusseltovo číslo:

$$\overline{Nu} = \frac{2730}{\left(\frac{H}{D}\right)^{-0,3}} \quad (128)$$

$$\overline{Nu} = \frac{2730}{\left(\frac{2,1}{0,55}\right)^{-0,3}} = 4080 \quad (129)$$

Dále z Nusseltova čísla vypočítáme součinitel přestupu tepla na straně kapaliny, kde charakteristický rozměr pro Nusseltovo číslo je výška tanku:

$$\overline{Nu} = \frac{\alpha_{in} \cdot H}{\lambda_v} \quad (130)$$

$$\alpha_{in} = \frac{\overline{Nu} \cdot \lambda_v}{H} \quad (131)$$

$$\alpha_{in} = \frac{4080 \cdot 0,6}{2,1} = 1166 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \quad (132)$$

A celkový součinitel prostupu tepla tedy je:

$$U = \left(\frac{1}{\alpha_{in}} + \frac{s}{\lambda_o} + \frac{1}{\alpha_{out}} \right)^{-1} \quad (133)$$

$$U = \left(\frac{1}{1166} + \frac{0,001}{16,27} + \frac{1}{100} \right)^{-1} = 92 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \quad (134)$$

Pro porovnání byla vypočítána doba, za kterou díky této korelaci dosáhneme finální teploty z CFD simulace:

$$\Delta t = \frac{m \cdot c_p}{U \cdot A} \ln \left(\frac{T_0 - T_{ch}}{T_{fin} - T_{ch}} \right) \quad (135)$$

$$\Delta t = \frac{423 \cdot 4182}{75,8 \cdot 3,28} \ln \left(\frac{285 - 270}{272,43 - 270} \right) = 10670 \text{ s} = 177,8 \text{ min} \quad (136)$$

Dále pro porovnání byla vypočítána teplota, které dosáhneme při použití této korelace a době chlazení 5 hodin:

$$T_{fin} = T_{ch} + \frac{T_0 - T_{ch}}{e^{\frac{\Delta t \cdot U \cdot A}{m \cdot c_p}}} \quad (137)$$

$$T_{fin} = 270 + \frac{285 - 270}{e^{\frac{18000 \cdot 75,8 \cdot 3,28}{423 \cdot 4182}}} = 270,7 \text{ K} = -2,45 \text{ }^\circ\text{C} \quad (138)$$

15.4 HIDDINK

Pro výpočet Nusseltova čísla dle této korelace nám stačí určit hodnotu Rayleighova čísla:

$$Ra = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta T_{ref} \cdot L_{ref}^3}{\vartheta \cdot a} \quad (139)$$

Referenční rozdíl teplot je průměr mezi rozdílem počáteční teploty kapaliny a teplotou stěny:

$$\Delta T_{ref} = \frac{T_0 - T_w}{2} \quad (140)$$

Jelikož teplota stěny není známa, je odhadnuta jako $T_w = 275 \text{ K}$

$$\Delta T_{ref} = \frac{285 - 275}{2} = 5 \text{ K} \quad (141)$$

Charakteristický rozměr je poloměr nádoby:

$$Ra = \frac{9,81 \cdot 6,733353 \cdot 10^{-5} \cdot 5 \cdot 0,275^3}{1,0032 \cdot 10^{-6} \cdot 1,435 \cdot 10^{-7}} = 4,77 \cdot 10^8 \quad (142)$$

Tedy korelace pro Nusseltovo číslo je:

$$\overline{Nu} = 0,34 \cdot Ra^{0,265} \quad (143)$$

$$\overline{Nu} = 0,34 \cdot (4,77 \cdot 10^8)^{0,265} = 67,81 \quad (144)$$

A tedy díky Definici Nusseltova čísla můžeme vypočítat α_{in} :

$$\overline{Nu} = \frac{\alpha_{in} \cdot R}{\lambda_v} \quad (145)$$

$$\alpha_{in} = \frac{\overline{Nu} \cdot \lambda_v}{R} \quad (146)$$

$$\alpha_{in} = \frac{67,81 \cdot 0,6}{0,275} = 147,96 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \quad (147)$$

Dále spočítáme celkový součinitel prostupu tepla U :

$$U = \left(\frac{1}{\alpha_{in}} + \frac{s}{\lambda_o} + \frac{1}{\alpha_{out}} \right)^{-1} \quad (148)$$

$$U = \left(\frac{1}{147,96} + \frac{0,001}{16,27} + \frac{1}{100} \right)^{-1} = 59,45 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \quad (149)$$

Pro ověření počátečního odhadu teploty stěny je spočítán tepelný tok:

$$\dot{q} = U \cdot (T_o - T_{ch}) \quad (150)$$

$$\dot{q} = 59,45 \cdot (285 - 270) = 891,78 \text{ W/m}^2 \quad (151)$$

Z čehož je dopočítána teplota stěny:

$$\dot{q} = \alpha_{out} \cdot (T_w - T_{ch}) \quad (152)$$

$$T_w = T_{ch} + \frac{\dot{q}}{\alpha_{out}} \quad (153)$$

$$T_w = 270 + \frac{891,78}{100} = 278,9 \text{ K} \quad (154)$$

Tato hodnota se neshoduje s původním odhadem teploty stěny, a proto tato hodnota byla v programu excel do iterována. Výsledné hodnoty jsou:

$$T_w = 278,48 \text{ K} \quad (155)$$

$$\overline{Nu} = 60,53 \quad (156)$$

$$\alpha_{in} = 132,08 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \quad (157)$$

$$U = 56,7 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \quad (158)$$

Pro porovnání byla vypočítána doba, za kterou díky této korelaci dosáhneme finální teploty z CFD simulace:

$$\Delta t = \frac{m \cdot c_p}{U \cdot A} \ln \left(\frac{T_0 - T_{ch}}{T_{fin} - T_{ch}} \right) \quad (159)$$

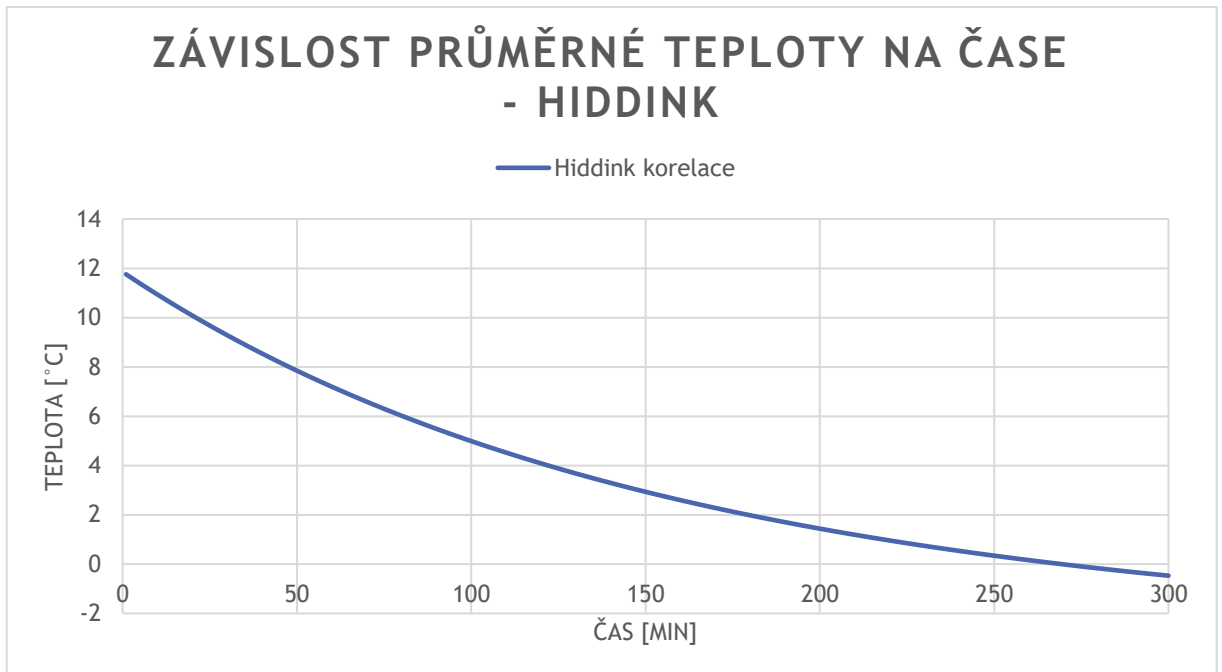
$$\Delta t = \frac{423 \cdot 4182}{56,7 \cdot 3,28} \ln \left(\frac{285 - 270}{272,43 - 270} \right) = 17312 \text{ s} = 288,5 \text{ min} \quad (160)$$

Pro porovnání byla také vypočítána teplota, které dosáhneme při použití této korelace a době chlazení 5 hodin:

$$T_{fin} = T_{ch} + \frac{T_0 - T_{ch}}{e^{\frac{\Delta t \cdot U \cdot A}{m \cdot c_p}}} \quad (161)$$

$$T_{fin} = 270 + \frac{285 - 270}{e^{\frac{18000 \cdot 56,7 \cdot 3,28}{423 \cdot 4182}}} = 272,26 \text{ K} = -0,89 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (162)$$

Dále byl tento děj brán jako pseudo-stacionární, přičemž výpočet byl proveden v rozsahu 1-300 min s korkem 1 min. Jako T_0 byla dosazována T_{fin} z předchozího kroku. A tato teplota byla použita k výpočtu Rayleightova čísla a následně i Nusseltova čísla, jak je popsáno v předchozí části. Získaná závislost průměrné teploty v závislosti na čase je na obr. 42. Průměrný součinitel prostupu tepla je $U = 51,6 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$.



Obrázek 42 - Závislost průměrné teploty na čase dle korelace - Hiddink

16 POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ

V tabulce 6 je vidět přehled získaných výsledků z korelací.

	a_{in} [W/m ² .K]	U [W/m ² .K]	T_{fin} [°C]	Δt [min]
CFD	124,86	55,8	- 0,72	300
Rodriquez	176	63,5	- 1,35	257,6
Lin	149,1	59,64	- 0,9	287
Lin - PS	110,4	52,2	- 0,52	-
Oliveski (V = 0,1 m ³)	319	75,8	- 1,95	215,8
Oliveski (V = 0,2 m ³)	1166	92	- 2,45	177,8
Hiddink	147,96	59,45	- 0,89	288,5
Hiddink - PS	108,2	51,6	- 0,47	-

Tabulka 6 - Přehled výsledků

Pro porovnání byl určen procentuální chyba podle vztahu:

$$\Delta X = \frac{X_i - X_{CFD}}{X_{CFD}} \cdot 100 \% \quad (163)$$

Kde X_{CFD} je veličina získaná z CFD simulace, X_i je veličina získaná korelací (a_{in} , U , ΔX , T_{fin} , Δt) je výsledná odchylka. Tyto odchylky jsou vidět v tabulce 7.

	a_{in} [%]	U [%]	T_{fin} [%]	Δt [%]
Rodriquez	40,96 %	13,8 %	- 81,25 %	- 14,13 %
Lin	19,41 %	6,88 %	25 %	- 4,33 %
Lin - PS	-11,58 %	- 6,45 %	- 27,78 %	-
Oliveski (V = 0,1 m ³)	155,49 %	35,84 %	170,83 %	- 28,07 %
Oliveski (V = 0,2 m ³)	833,85 %	64,87 %	240,28 %	- 40,73 %
Hiddink	18,50 %	6,54 %	23,61 %	- 3,83 %
Hiddink - PS	-13,34 %	-7,53 %	- 34,72 %	-

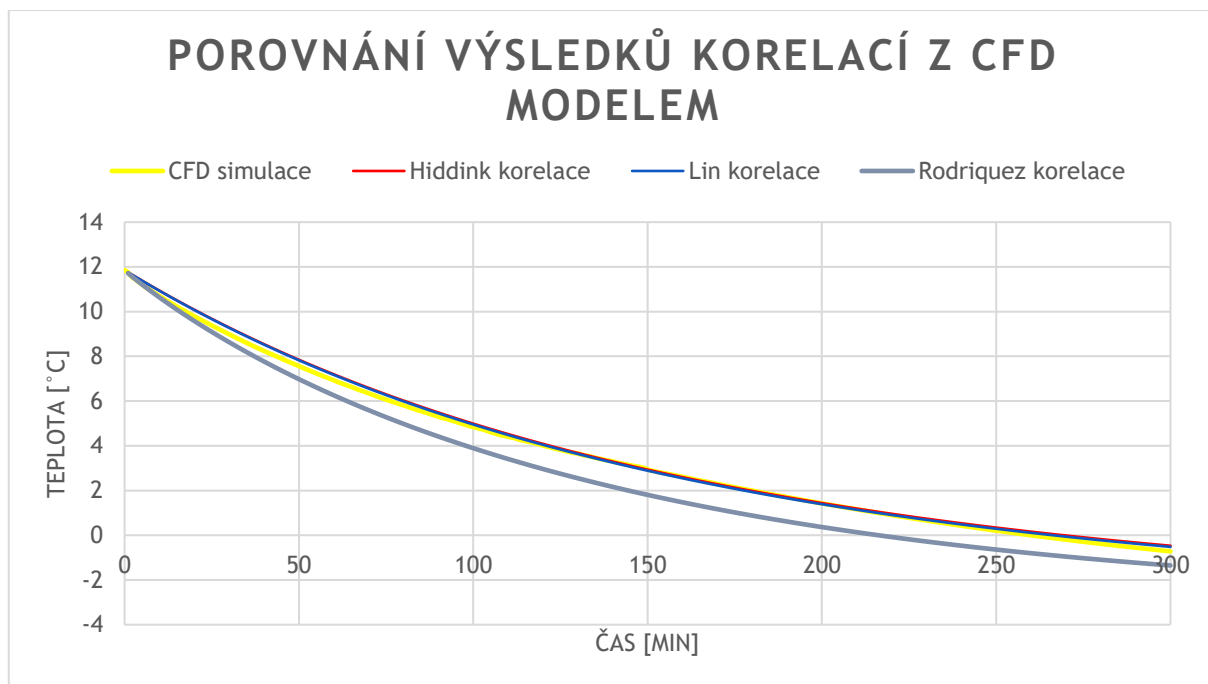
Tabulka 7 - Přehled odchylek korelací od CFD simulace

Z těchto výsledků lze vidět, že korelace dle Oliveskiho je pro případ chlazení velkých tanků nepoužitelná s odchylkou součinitele přestupu tepla vyšší než 150 %. Tento vztah může mít využití při počítání tepelných ztrát izolovaných tanků, jelikož tyto korelace byly navrženy primárně pro izolované tanky. Přesto použitelnost těchto vztahů je nejistá, jelikož jsou závislé na objemu nádoby.

Při použití korelace dle Rodriquez stále dosahujeme poměrně vysoké odchylky. Odchylku průměrné teploty získané ze vztahu dle metody Rodriquez lze vidět na obr. 43.

Nejlépeších výsledků dosahují korelace dle Lin a dle Hiddinka. Tyto korelace vycházejí téměř totožně. Pro rychlý výpočet podle námi provedené analýzy vychází o trochu lépe korelace dle Hiddinka, tento rozdíl je ovšem téměř zanedbatelný, a při výpočtu s jinými parametry nemusí

přesnějších hodnot dosáhnout. Při uvažování děje jako pseudo-stacionárního dosáhla mírně lepších výsledků korelace dle Linn, opět zde platí, že s jinými parametry může dosáhnout lepších výsledků Hiddink. Pro obě korelace byla vynesena závislost teploty na čase. Tato závislost je vidět na obr. 43. Na obr. 43 lze také vidět porovnání některých testovaných korelací s CFD simulací problému. Rozdíl mezi korelacemi dle Linn a Hiddinka se pohybuje v setinách stupňů Celsia. Od CFD simulace se lehce odlišují a na konci zkoumané doby dosahují vyšší teploty, díky které jsme při návrhu chladících aparátů na straně bezpečnosti.



Obrázek 43 - Porovnání výsledků vhodných testovaných korelací s výsledky CFD simulace

V této práci byl popsán proces chlazení piva před ležením a konstrukční řešení CK tanků. Dále byly v rámci rešerše vyhledány vhodné korelace Nusseltova čísla pro popis přirozené konvekce, která se v CKT během chlazení ze zákvasné teploty zdá být dominantním mechanismem přenosu tepla. Tyto korelace byly propočítány s pevně danými parametry konkrétního cylindro kónického tanku, který obsahoval 424 litrů kapaliny, a získané výsledky byly vzájemně porovnány. Současně byla také provedena CFD simulace tohoto konkrétního CK tanku se stejnými parametry použitými pro výpočet na základě nalezených kriteriálních vztahů. Protože nebylo možné provést vlastní experiment, CFD simulace byla ověřena dle experimentu provedeného a publikovaného Takamotou, který prováděl experiment na CK tanku o stejných rozměrech. Jak výpočty s využitím nalezených korelací Nusseltova čísla, tak i CFD simulace byly pro zjednodušení a lepší průkaznost prováděny s fyzikálními vlastnostmi vody. Použití vody je opodstatněné, jelikož pivo je z většiny voda a fyzikální vlastnosti, hlavně pak závislost hustoty piva na teplotě, jsou těžko dohledatelné a závisí na stupňovitosti piva, a i na obsahu alkoholu v pivu.

Poté byly porovnány výsledky CFD simulace s výsledky korelací a nejlépe vychází korelace dle Lin:

$$\overline{Nu} = 0,55 \cdot Ra^{0,25} \quad (164)$$

A dle Hiddinka:

$$\overline{Nu} = 0,34 \cdot Ra^{0,265} \quad (165)$$

Cílem práce bylo zjistit, jak přibližně velké chyby se dopustíme, využijeme-li pro návrh teplosměnné plochy integrální hodnotu součinitele přestupu tepla získaného na základě vhodného kriteriálního vztahu pro popis přirozené konvekce v CK tanku. Dílčím úkolem bylo také jednotlivé publikované kriteriální vztahy a výpočtové postupy pro integrální bilanci CKT vzájemně porovnat a vybrat nejvíce vyhovující korelaci. Toto bylo dosaženo provedením CFD simulace CK tanku, která byla verifikována na základě převzatých experimentálních dat.

Výsledný součinitel přestupu tepla uvnitř nádoby u obou korelací vychází s odchylkou od CFD simulace menší než +20 %. Pokud díky těmto korelacím děj počítán jako pseudo-stacionární výsledný součinitel přestupu tepla uvnitř nádoby se s od CFD simulace liší o méně než -15 %. Díky těmto výsledkům je vhodné tyto korelace použít v technické praxi.

Pro návrhové výpočty CK tanků podobného objemu a geometrie (CK tanky určené spíše pro minipivovary či menší pivovary) tak lze s dostatečnou přesností použít výpočet na základě integrální bilance s využitím korelací dle Lin, případně dle Hiddinka bez nutnosti provádět nákladné CFD simulační výpočty.

18 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

a	Součinitel teplotní vodivosti	$[\text{m}^2/\text{s}]$
A	Plocha	$[\text{m}^2]$
C_p	Měrná tepelná kapacita	$[\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}]$
C_1-C_5	Konstanty modelu	$[-]$
D	Průměr	$[\text{m}]$
e	Tloušťka izolace	$[\text{m}]$
f	Vnější síly	$[\text{m}/\text{s}^2]$
g	Gravitační zrychlení	$[\text{m}/\text{s}^2]$
Gr	Grashofovo číslo	$[-]$
H	Výška	$[\text{m}]$
H_K	Výška kuželové části	$[\text{m}]$
H_V	Výška válcové části	$[\text{m}]$
L_{ref}	Referenční délka	$[\text{m}]$
m	Hmotnost	$[\text{kg}]$
Nu	Nusselotvo číslo	$[-]$
p	Tlak	$[\text{Pa}]$
Pr	Prandtlovo číslo	$[-]$
q	Tepelný tok	$[\text{W}/\text{m}^2]$
$Q_{(g)}$	Vnitřní zdroj tepla	$[\text{W}]$
R	Poloměr	$[\text{m}]$
Ra	Rayleighova číslo	$[-]$
s	Tloušťka stěny	$[\text{m}]$
t	Čas	$[\text{s}]$
T	Teplota	$[\text{°C}]$
T_a	Průměrná teplota	$[\text{°C}]$
T_0	Počáteční teplota	$[\text{°C}]$
T_{CKT}	Teplota tanku	$[\text{°C}]$
T_{fin}	Konečná teplota	$[\text{°C}]$
T_{ch}	Teplota chladícího média	$[\text{°C}]$
T_w	Teplota stěny	$[\text{°C}]$
U	Součinitel prostupu tepla	$[\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}]$
\hat{U}	Bezrozměrný součinitel prostupu tepla	$[-]$
u	Rychlost	$[\text{m}/\text{s}]$
v	Rychlost	$[\text{m}/\text{s}]$
V	Objem	$[\text{m}^3]$
v_{ref}	Referenční rychlost	$[\text{m}/\text{s}]$
x	Směr	$[\text{m}]$
y	Směr	$[\text{m}]$

z	Směr	[m]
a_{in}	Součinitel přestupu tepla uvnitř	[W/m ² .K]
a_{out}	Součinitel přestupu tepla vně	[W/m ² .K]
β	Objemová tepelná roztažnost	[1/K]
ΔT_{ref}	Referenční rozdíl teplot	[°C]
Δt	Změna času	[s]
η	Dynamická viskozita	[Pa.s]
θ	Bezrozměrná teplota	[-]
λ	Tepelná vodivost	[W/m.K]
λ_o	Tepelná vodivost oceli	[W/m.K]
λ_v	Tepelná vodivost vody	[W/m.K]
ν	Kinetická viskozita	[m ² /s]
ρ	Hustota	[kg/m ³]
τ	Bezrozměrný čas	[-]
<i>CFD</i>	Computational fluid dynamics	
<i>CIP</i>	Chemické čištění	
<i>CKT</i>	Cylindro-kónický tank	
<i>CK</i>	Cylindro-kónický	

19 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 - Průběh teplot a úbytku extraktu při kvašení piva [7]	5
Obrázek 2 - Schéma kompresorového chlazení [8].....	6
Obrázek 3 - Škála CK tanků dle firmy Czech Brewery System [9]	7
Obrázek 4 - Konstrukční řešení CK tanku [9].....	8
Obrázek 5 - Závislost Nusseltova čísla [14].....	13
Obrázek 6 - Schéma měřeného tanku [16]	14
Obrázek 7 - Příklad kontrolních objemů [19]	19
Obrázek 8 - Rozměry tanku z experimentu (a) - 500l tank, (b) - miniaturní tank.....	20
Obrázek 9 - Průběh teplot v 500 litrovém tanku	21
Obrázek 10 - Průběh tepla v miniaturním tanku	21
Obrázek 11 - Rozměry geometrie modelu a umístění teplotních senzorů v modelu	24
Obrázek 12 - Část sítě modelu.....	25
Obrázek 13 - Oblasti modelu.....	25
Obrázek 14 - Kvalita dle ortogonálního kritéria [20]	26
Obrázek 15 - Dosažené ortogonální kvalita	26
Obrázek 16 - Kvalita dle Skewness kritéria [20].....	26
Obrázek 17 - Dosažená Skewness kvalita	27
Obrázek 18 - Závislost hustoty vody na teplotě	28
Obrázek 19 - Porovnání průběhu teplot mezi CFD simulací a Takamotou pro senzor (1) ($\alpha_{out} = 100 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$)	30
Obrázek 20 - Porovnání průběhu teplot mezi CFD simulací a Takamotou pro senzor (2) ($\alpha_{out} = 100 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$)	30
Obrázek 21 - Porovnání průběhu teplot mezi CFD simulací a Takamotou pro senzor (3) ($\alpha_{out} = 100 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$)	31
Obrázek 22 - Porovnání průběhu teplot mezi CFD simulací a Takamotou pro senzor (1) ($\alpha_{out} = 50 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$)	32
Obrázek 23 - Porovnání průběhu teplot mezi CFD simulací a Takamotou pro senzor (2) ($\alpha_{out} = 50 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$)	32
Obrázek 24 - Porovnání průběhu teplot mezi CFD simulací a Takamotou pro senzor (3) ($\alpha_{out} = 50 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$)	33
Obrázek 25 - Průběh teplot v 150 minutě	33
Obrázek 26 - Průběh teplot ve 100 minutě.....	33
Obrázek 27 - Průběh teplot v 40 minutě.....	34
Obrázek 28 - Průběh teplot v CK tanku v čase.....	35
Obrázek 29 - Průběh rychlostí v čase 60 min	36
Obrázek 30 - Průběh rychlostí v čase 120 min	36
Obrázek 31 - Průběh rychlostí v čase 180 min	36

Obrázek 32 - Průběh rychlostí v čase 240 min	37
Obrázek 33 - Průběh rychlostí v čase 300 min	37
Obrázek 34 - Průběh průměrné teploty v závislosti na čase	38
Obrázek 35 - Rozložení teplot v t = 300 minut	38
Obrázek 36 - Průběh tepelného toku stěnou v závislosti na čase	39
Obrázek 37 - Závislost součinitele prostupu tepla na teplotě [22].....	39
Obrázek 38 - Koeficient prostupu tepla v závislosti na čase	40
Obrázek 39 - Součinitel přestupu tepla uvnitř tanku v závislosti na čase	41
Obrázek 40 - Závislost průměrné teploty na čase dle korelace - Rodriguez	44
Obrázek 41 - Závislost průměrné teploty na čase dle korelace Lin	47
Obrázek 42 - Závislost průměrné teploty na čase dle korelace - Hiddink	51
Obrázek 43 - Porovnání výsledků vhodných testovaných korelací s výsledky CFD simulace	53

20 SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 - Použité parametry při numerických simulacích v článku [18]	16
Tabulka 2 - Přehled korelací.....	23
Tabulka 3 - Přibližné hodnoty koeficientu přestupu tepla z Heat Atlasu [21]	29
Tabulka 4 - Nastavené metody řešení	29
Tabulka 5 - Použité veličiny pro výpočet	41
Tabulka 6 - Přehled výsledků	52
Tabulka 7 - Přehled odchylek korelací od CFD simulace.....	52

- [1] L. Chládek, Pivovarnictví, Praha: Grada Publishing, a.s., 2007.
- [2] Krizport, „Amoniak,“ Krizport, [Online]. Available: <http://krizport.firebrno.cz/ohrozeni/amoniak>. [Přístup získán 12 6 2019].
- [3] G. Basařová, J. Ševel, P. Basař a T. Lejsek, Pivovarství Teorie a praxe výroby piva, Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2010.
- [4] Y. Takamoto a Y. Saito, „Thermal Convection in Cylindro-Conical Tanks During the Early Cooling Process,“ *Journal of Institute of Brewing*, sv. 109, č. 1, pp. 80-83, 2003.
- [5] A. Kratochvíle, „Chlazení a výroba piva II,“ *Kvasný průmysl*, č. 11, pp. 251-257, 1985.
- [6] M. Kahler a T. Lejsek, „Jednofázová výroba piva,“ *Kvasný průmysl*, č. 11, pp. 244-249, 1977.
- [7] A. Kratochvíle, „Chlazení a výroba piva III,“ *Kvasný průmysl*, č. 3, pp. 52-58, 1986.
- [8] A. Kratochvíle, „Chlazení a výroba piva I,“ *Kvasný průmysl*, č. 10, pp. 227-232, 1985.
- [9] SystemCzechBrewery, „CKT - Cylindrokónické kvasné a zrací tanky,“ Czech Brewery System, [Online]. Available: <http://www.ceskeminipivovary.cz>. [Přístup získán 20 Prosinec 2018].
- [10] L. Theodore, Heat Transfer Applications for the Practicing Engineer, Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Incorporated, 2011.
- [11] S. M. Ghiaasiaan, Convective heat and mass transfer, Cambridge: Cambridge University Press, 2011.
- [12] Fluent, „FLUENT 6.3 Documentation,“ Ansys, [Online]. Available: <https://www.sharcnet.ca/Software/Fluent6/index.htm>. [Přístup získán 20. 6 2019].
- [13] C.P.Kothandaraman, Fundamentals of Heat and Mass Transfer, New Delhi: New Age International, 2006.
- [14] I. Rodriguez, J. Castro, C. D. Pérez-Segarra a A. Oliva, „Unsteady numerical simulation of the cooling process of vertical storage,“ *International Journal of Thermal Sciences*, sv. 48, č. 4, pp. 708-721, Duben 2009.

- [15] Y. S. Lin a R. G. Akins, „Pseudo-Steady-State Natural Convection Heat Transfer Inside a Vertical Cylinder,“ *Journal of Heat Transfer*, sv. 108, č. 5, pp. 310-316, 1986.
- [16] R. D. C. Oliveski, A. Krenzinger a H. A. Vielmo, „Cooling of cylindrical vertical tanks submitted to natural internal convection,“ *International Journal of Heat and Mass Transfer*, sv. 46, pp. 2015-2026, 2003.
- [17] J. Hiddink, Natural convection heating of liquids with reference to sterilization of canned food, Wageningen: Agricultural Research Reports 839, 1975.
- [18] W. Lin a S. W. Armfield, „Long-term behavior of cooling fluid in a vertical cylinder,“ *International Journal of Heat and Mass Transfer*, sv. 48, pp. 53-66, 2005.
- [19] M. Jahoda, „Počítačová dynamika tekutin - užitečný nástroj pro inženýry,“ [Online]. Available:
http://uchi.vscht.cz/uploads/pedagogika/bezpecnostni_inzenyrstvi/CFD.shrnuti.pdf.
[Přístup získán 18 7 2019].
- [20] „Ansys Documentation,“ Ansys, [Online]. Available:
https://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/16.2.3/en-us/help/ai_sinfo/ai_sinfo.html.
[Přístup získán 15 4 2019].
- [21] „Scribd.com,“ [Online]. Available:
<https://www.scribd.com/document/265166192/Mesh-Intro-15-0-L07-Mesh-Quality-and-Advanced-Topics>. [Přístup získán 17 3 2019].
- [22] T. Michálek, T. Kowlewski a B. Šarler, „Natural convection for anomalous density variation of water: numerical benchmark,“ *Progress in Computational Fluid Dynamics*, sv. 5, č. January, pp. 158-170, 2005.
- [23] VDI, Heat Atlas, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010.
- [24] W. Felgentraeger, „Výpočet teplosměnné plochy cylindrokónických tanků,“ *Kvasný průmysl*, sv. 38, č. 1, pp. 17-20, 1992.
- [25] M. Kahler a T. Lejsek, „Využití cylindrokónických tanků v pivovarnictví,“ *Kvasný průmysl*, č. 8-9, pp. 265-269, 1987.
- [26] H. Shou-Shing, „Thermal Correlation of Natural Convection in Bottom-Cooled Enclosures,“ *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, sv. 4, č. 1, pp. 123-126, 1990.