

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav procesní a zpracovatelské techniky



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Kondenzace s přímým kontaktem médií

2021

Lukáš Pavel

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Pavel** Jméno: **Lukáš** Osobní číslo: **467351**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav procesní a zpracovatelské techniky**
Studijní program: **Energetika a procesní inženýrství**
Specializace: **Procesní inženýrství**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Kondenzace s přímým kontaktem médií

Název diplomové práce anglicky:

Direct contact condensation

Pokyny pro vypracování:

Jedním z často používaných procesů je proces kondenzace. Uvedte nás do základního rozdělení typů procesu kondenzace a kondenzátorů. V rámci literární rešerše se zaměřte na kondenzaci s přímým kontaktem obou médií a to s důrazem na náplňové kondenzátory. Pokuste se také najít informace týkající se numerického modelování procesu kondenzace s pomocí systému Ansys CFD. Na základě literární rešerše navrhnete malé laboratorní zařízení, které by mohlo sloužit k prvotnímu ověření možnosti měření charakteristik procesu kondenzace na různých náplních. Navržené laboratorní zařízení vybavte vhodnou měřicí technikou. Popište metodiku měření a vyhodnocení kondenzačních experimentů na modelovém laboratorním zařízení a sestavte vhodné algoritmy pro vyhodnocení. V rámci závěru vaší práce se pokuste o porovnání kondenzátoru s přímým kontaktem médií a rekuperačního plášťového trubkového výměníku tepla na vhodném praktickém případě.

Seznam doporučené literatury:

Dle provedené literární rešerše.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Martin Dostál, Ph.D., ústav procesní a zpracovatelské techniky FS

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

Datum zadání diplomové práce: **21.04.2021**

Termín odevzdání diplomové práce: **04.06.2021**

Platnost zadání diplomové práce: **19.09.2021**

Ing. Martin Dostál, 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

Rád bych poděkoval panu Ing. Martinovi Dostálovi, Ph.D. za vedení mé diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat všem svým blízkým za to, že mi po celou dobu studia s leccím pomáhali. Moc si toho vážím.

Anotační list

Jméno autora:	Lukáš
Příjmení autora:	Pavel
Název práce česky:	Kondenzace s přímým kontaktem médií
Název práce anglicky:	Direct contact condensation
Rozsah práce:	počet stran: 89 počet obrázků: 61 počet tabulek: 5 počet příloh: 0
Akademický rok:	2020 / 2021
Jazyk práce:	český
Ústav:	Ústav procesní a zpracovatelské techniky
Studijní program:	N071TPRI – Procesní inženýrství
Vedoucí práce:	Ing. Martin Dostál, Ph.D.
Anotace česky:	Práce v úvodní části pojednává o samotném procesu kondenzace, jejím využití v průmyslu a používaných kondenzátorech. V rešeršní části práce pojednává o experimentech mnoha autorů zabývajících se směšovací kondenzací. Dále je součástí práce navrhnout náplňový laboratorní kondenzátor včetně jeho tepelného výpočtu. V poslední části práce je porovnání směšovacího a nesměšovacího kondenzátoru.
Anotace anglicky:	In the introductory part of the thesis, the condensation process itself, its use in industry and the condensers used are discussed. In the second part, thesis discusses experiments of many authors dealing with mixing condensation. In the next part of the thesis the packed-bed laboratory condenser is designed. This design includes also thermal calculation of condenser. The last part of the thesis compares the direct contact and non-direct contact condenser.
Klíčová slova:	Kondenzace, kondenzátor, směšování, náplňová kolona
Klíčová slova anglicky:	Condensation, condenser, mixing, packed column

Obsah

1	Úvod	9
1.1	Co je kondenzace.....	9
1.2	Kondenzační teplo	10
1.3	Využití kondenzace	12
1.4	Kondenzace s odděleným kontaktem médií	16
1.4.1	Typy kondenzace s odděleným kontaktem médií.....	16
1.4.2	Kondenzátory s nepřímým kontaktem médií	23
1.5	Kondenzace s přímým kontaktem médií	26
1.5.1	Typy kondenzace s přímým kontaktem médií.....	26
2	Literární rešerše	28
2.1	DCC na kapičkách.....	28
2.2	DCC na proudu kapaliny	35
2.3	Probublávaná DCC.....	39
2.4	DCC na filmu kapaliny.....	44
2.5	DCC zkoumaná numericky	61
3	Návrh laboratorního zařízení	65
3.1	Kondenzátor	67
3.2	Generátor páry.....	69
3.3	Příslušenství	70
3.4	Návarky	71
3.5	Instrumentace a další prvky.....	73
3.6	Matematický model experimentálního zařízení	74
4	Srovnání směšovacího kondenzátoru s nesměšovacím	82
	Závěr	85
	Reference	86
	Prohlášení	89

Seznam symbolů

Latinská písmena

<i>a</i>	Součinitel teplotní vodivosti	$(\text{m}^2 \text{s}^{-1})$
<i>A</i>	Látková konstanta	(–)
<i>B</i>	Látková konstanta	(–)
<i>c_p</i>	Měrná tepelná kapacita při konstantním tlaku	$(\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1})$
<i>C</i>	Látková konstanta	(–)
<i>C</i>	Empirický korekční součinitel	(–)
<i>C</i>	Konstanta	(–)
<i>D</i>	Látková konstanta	(–)
<i>D</i>	Průměr	(m)
<i>D</i>	Součinitel difúze	$(\text{m}^2 \text{s}^{-1})$
<i>e</i>	Specifický povrch	$(\text{m}^2 \text{m}^{-3})$
<i>e_w</i>	Smočený specifický povrch	$(\text{m}^2 \text{m}^{-3})$
<i>F_o</i>	Fourierovo číslo	(–)
<i>Fr</i>	Froudeho číslo	(–)
<i>g</i>	Gravitační zrychlení	(m s^{-2})
<i>G</i>	Hmotnostní tok plynu	(kg s^{-1})
<i>G</i>	Hustota hmotnostního toku plynu	$(\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-2})$
<i>Gz</i>	Graetzovo číslo	(–)
<i>h</i>	Měrná entalpie	(kJ kg^{-1})
<i>h</i>	Výška	(m)
<i>I</i>	Distribuční parametr šikmosti	(–)
<i>k</i>	Součinitel poklesu povrchového napětí s teplotou	(K^{-1})
<i>K</i>	Kondenzační kritérium	(–)
<i>l_{lg}</i>	Měrné skupenské kondenzační teplo	(kJ kg^{-1})
<i>L</i>	Hmotnostní tok kapaliny	(kg s^{-1})
<i>L</i>	Hustota hmotnostního toku kapaliny	$(\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-2})$
<i>L_p</i>	Laplaceovo kritérium	(–)
<i>m</i>	Hmotnost	(kg)
<i>ṁ</i>	Hmotnostní průtok	(kg s^{-1})
<i>M</i>	Molární hmotnost	(kg mol^{-1})
<i>n</i>	Počet, množství	(–)

Nu	Nusseltovo číslo	(–)
NTU	Počet převodových jednotek	(–)
p	Tlak	(Pa)
p''	Tlak nasycených par	(Pa; kPa)
P	Parametr rovnoměrnosti rozstříku	(–)
Pr	Prandtlovo číslo	(–)
\dot{Q}	Tepelný tok	(kW; W)
r	Poloměr	(m)
R	Poloměr	(m)
R	Univerzální plynová konstanta	(J mol ⁻¹ K ⁻¹)
Re	Reynoldsovo číslo	(–)
S	Plocha	(m ²)
Sc	Schmidtovo číslo	(–)
Sh	Sherwoodovo číslo	(–)
t	Čas	(s)
t	Teplota	(°C)
T	Teplota	(K; °C)
\bar{T}^*	Bezrozměrná střední teplota	(–)
u	Rychlost	(m s ⁻¹)
U	Objemový součinitel přestupu tepla	(kW m ⁻³ K ⁻¹)
V	Objem	(m ³)
\dot{V}	Objemový průtok	(m ³ s ⁻¹)
W	Šířka	(m)
We	Weberovo číslo	(–)
x	Vzdálenost	(m)
y	Funkce velikosti kapky	(–)
z	Vzdálenost	(m)

Řecká písmena

α	Součinitel přestupu tepla	(W m ⁻² K ⁻¹)
β	Součinitel přestupu hmoty	(m s ⁻¹)
δ	Tloušťka	(m)
Δ	Změna, rozdíl	
Δt_{\ln}	Střední logaritmický teplotní spád	(K; °C)

ϵ	Účinnost	(–)
λ	Součinitel tepelné vodivosti	(W m ⁻¹ K ⁻¹)
μ	Dynamická viskozita	(Pa s)
ν	Kinematická viskozita	(m ² s ⁻¹)
ρ	Hustota	(kg m ⁻³)
σ	Povrchové napětí	(N m ⁻¹)
ψ	Součinitel růstu kapky	(–)
ω	Absolutní vlhkost	(kg kg ⁻¹)

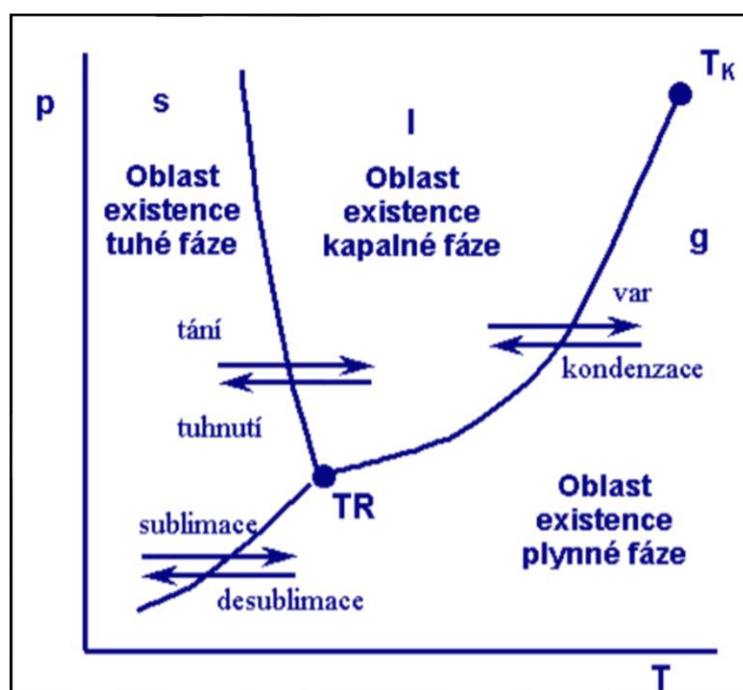
Nejčastěji používané dolní indexy

a	Vzduch
c	Týkající se kondenzace
cond	Týkající se kondenzace
ef	Efektivní
f	Fázové rozhraní
g	Plyn
G	Plyn
i	Vnitřní
in	Vstupující
k	Týkající se kondenzace
l	Kapalina
lf	Lewisův faktor
L	Kapalina
m	Maximální
o	Daný okamžik
out	Vystupující
s	Stav nasycení
sat	Stav nasycení
T	Celkový
v	Pára
V	Pára
w	Stěna

1 Úvod

1.1 Co je kondenzace

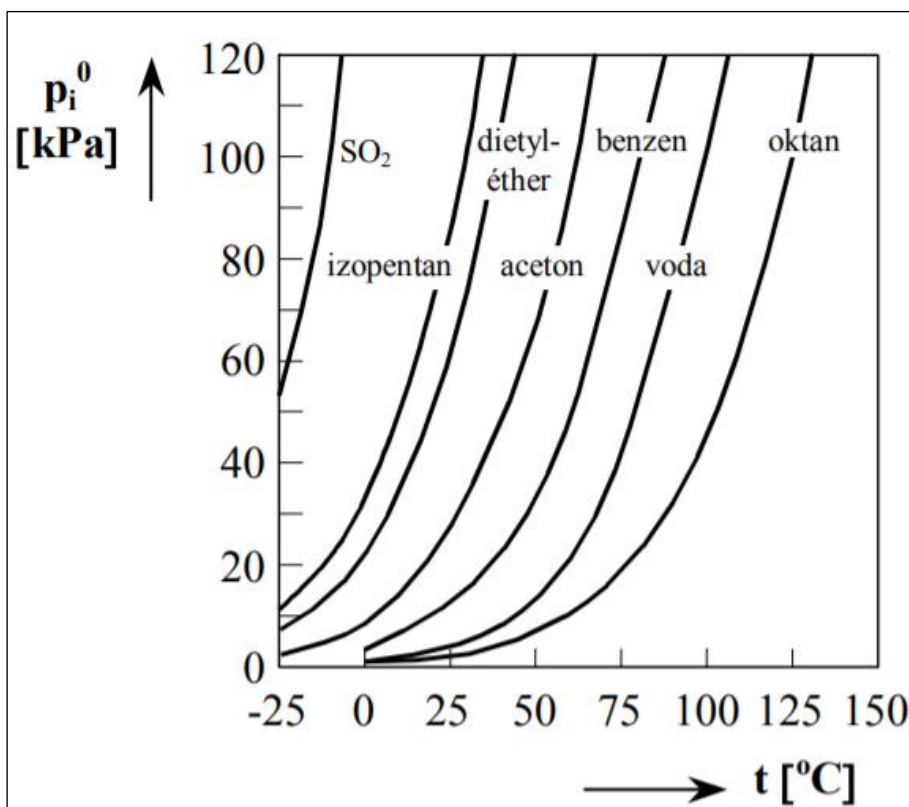
Kondenzací se rozumí fázová přeměna, při které se plyn mění v kapalinu. Někdy se jí proto také říká kapalnění. Jejím opakem, tedy změnou kapaliny v plyn, je var neboli odpařování. Nejčastěji se s kondenzací v běžném životě setkáváme například u zrcadla během sprchování nebo u půllitru plného chladného nápoje, kdy právě teploty jejich povrchu klesnou pod teplotu rosného bodu a vlhkost okolního vzduchu začne kondenzovat, což se projeví známým orosením. Dalším příkladem kondenzace kolem nás jsou mraky, které vznikají kondenzací vzduchu na kapky či ledové krystalky a jejich shlukování tvoří různé tvary. Na obrázku níže je znázorněn fázový diagram jednosložkové soustavy.



Obrázek 1 Fázový diagram jednosložkové soustavy.

Převzato z https://moodle-vyuka.cvut.cz/pluginfile.php/401841/mod_resource/content/0/FCH_P08-FR.pdf. (15.10.2020)

K většímu porozumění kondenzace si představme nasycenou páru, což je plyn o stejném tlaku a teplotě s kapalinou, se kterou tvoří termodynamickou rovnováhu. Nasycená pára se vyskytuje na tzv. *koexistenční křivce* neboli závislosti tlaku na teplotě na fázovém rozhraní (v našem případě var – kondenzace). Tato křivka začíná v trojném bodě a končí v bodě kritickém. Z naší koexistenční křivky je patrné, že zde dané teplotě odpovídá určitý tlak nasycené páry. Jestliže bychom ale pro danou teplotu tlak snížili, skončí termodynamická rovnováha a kapalina se začne vypařovat. Jestliže bychom tlak naopak zvýšili, pára by v našem systému začala kondenzovat. Na obrázku 2 jsou zobrazeny závislosti tlaku nasycených par na teplotě pro různé látky.



Obrázek 2 Závislost tlaku nasycených par na teplotě pro různé látky.

Převzato z https://moodle-vyuka.cvut.cz/pluginfile.php/401841/mod_resource/content/0/FCH_P08-FR.pdf. (15.10.2020)

Matematické popsání závislosti tlaku nasycených par na teplotě se vyjadřuje např. pomocí Antoineovy rovnice

$$\log p'' = A - \frac{B}{T + C}, \quad (1)$$

kde p'' je tlak nasycených par (kPa; Pa), T je teplota (°C; K) a A, B, C jsou látkové konstanty, které závisí jak na jednotkách teploty a tlaku, tak i na tom, zda se v rovnici (1) vyskytuje dekadický či přirozený logaritmus.

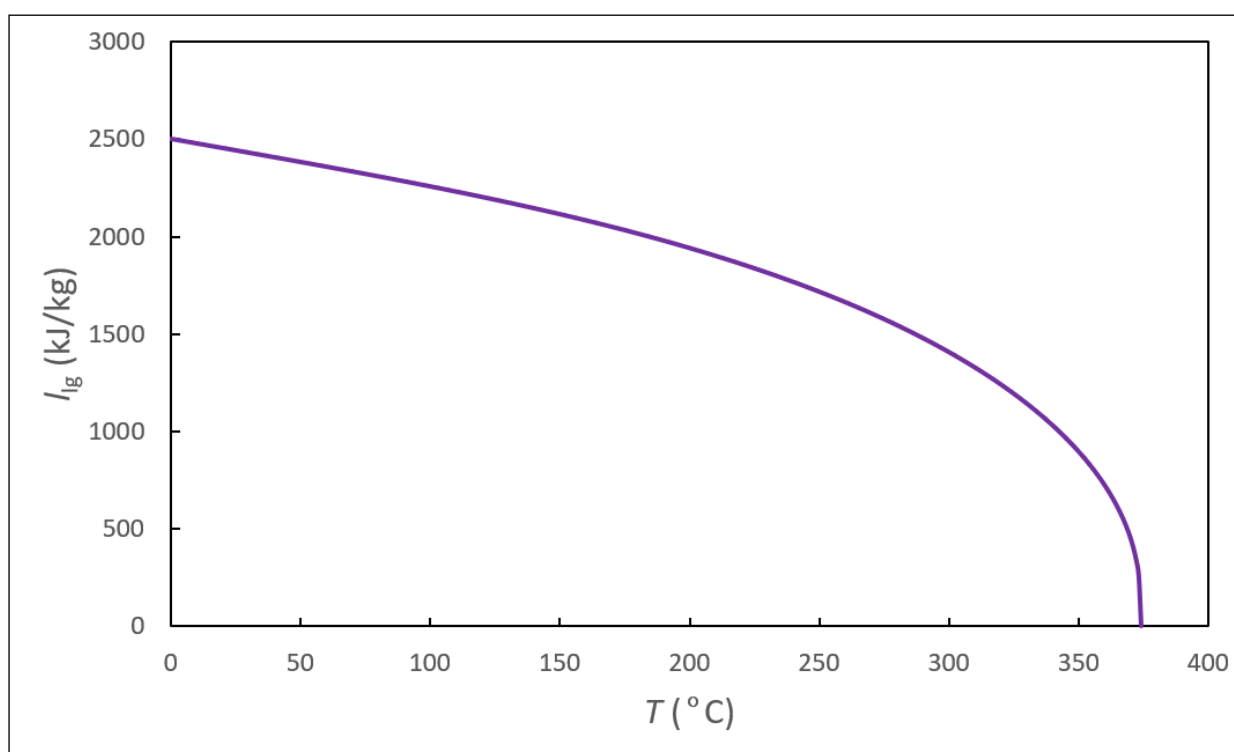
1.2 Kondenzační teplo

Během procesu kondenzace dochází k uvolňování energie, které se říká *skupenské kondenzační teplo* L_{1g} , nebo když je vztažené na jednotku hmotnosti, jedná se o *měrné skupenské kondenzační teplo* l_{1g} . V tabulce 1 jsou vypsány vybrané látky s jejich hodnotami měrného skupenského kondenzačního tepla vztažené k atmosférickému tlaku, tedy $p_{\text{atm}} = 101,325 \text{ kPa}$.

Tabulka 1 Měrné skupenské kondenzační teplo různých látek.
 Převzato z https://physics.mff.cuni.cz/kfpp/skripta/kurz_fyziky_pro_DS/display.php/molekul/8_3 (18.10.2020)

Látka	Měrné skupenské kondenzační teplo l_{lg} [kJ kg ⁻¹]
Vodík	454
Helium	20,6
Dusík	198
Kyslík	213
Amoniak	1370
Oxid uhličitý	574
Ethanol	840
Rtuť	292
Voda	2256

Jak by bylo velké skupenské kondenzační teplo dané látky v případě změny teploty, respektive tlaku? Velikost kondenzačního tepla se se vzrůstající teplotou plynu snižuje, a to až do kritického bodu, ve kterém je nulové. Na obrázku 3 je vidět závislost měrného skupenského kondenzačního tepla na teplotě nasycené vodní páry.



Obrázek 3 Závislost kondenzačního tepla vodní páry na teplotě.

Teplo uvolňované při kondenzaci je stejně velké jako teplo, které během varu musí přijmout kapalina, aby se přeměnila v plyn. Tedy například při kondenzaci 1 kg nasycené vodní páry při 100 °C se nám uvolní 2256 kJ, což je stejně velké teplo jako to, které je třeba dodat pro odpaření 1 kg vody za stejných podmínek pro její přeměnu ve vodní páru.

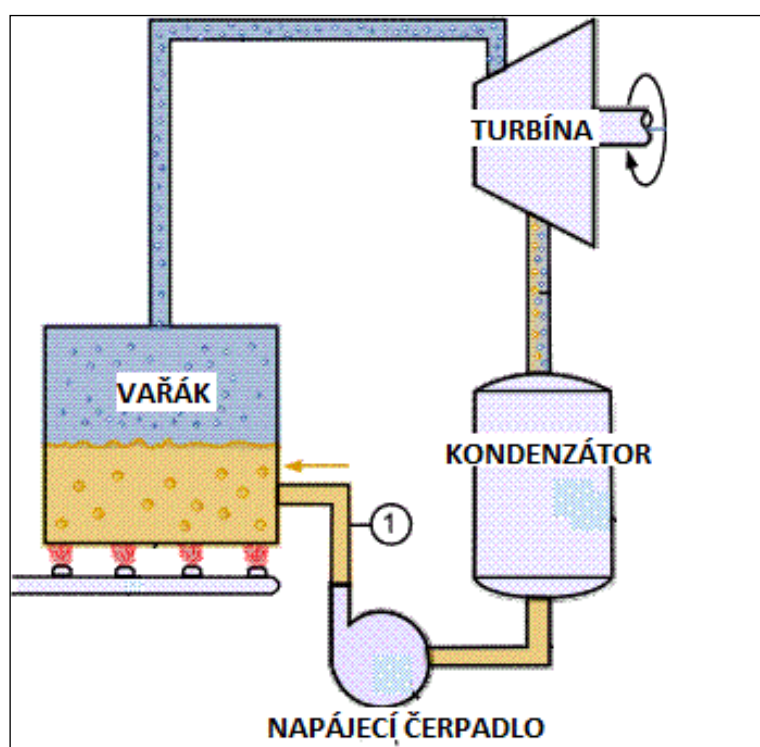
V průmyslových procesech, kde se vyskytuje kondenzace, a které budou v dalších kapitolách popisovány, je vhodné uvolňované teplo efektivně využívat. Tím se může docílit značných ekonomických úspor.

1.3 Využití kondenzace

Kondenzace se využívá v mnoha průmyslových odvětvích. Zařízení, ve kterých kondenzace probíhá, se nazývají *kondenzátory*.

Elektrárny

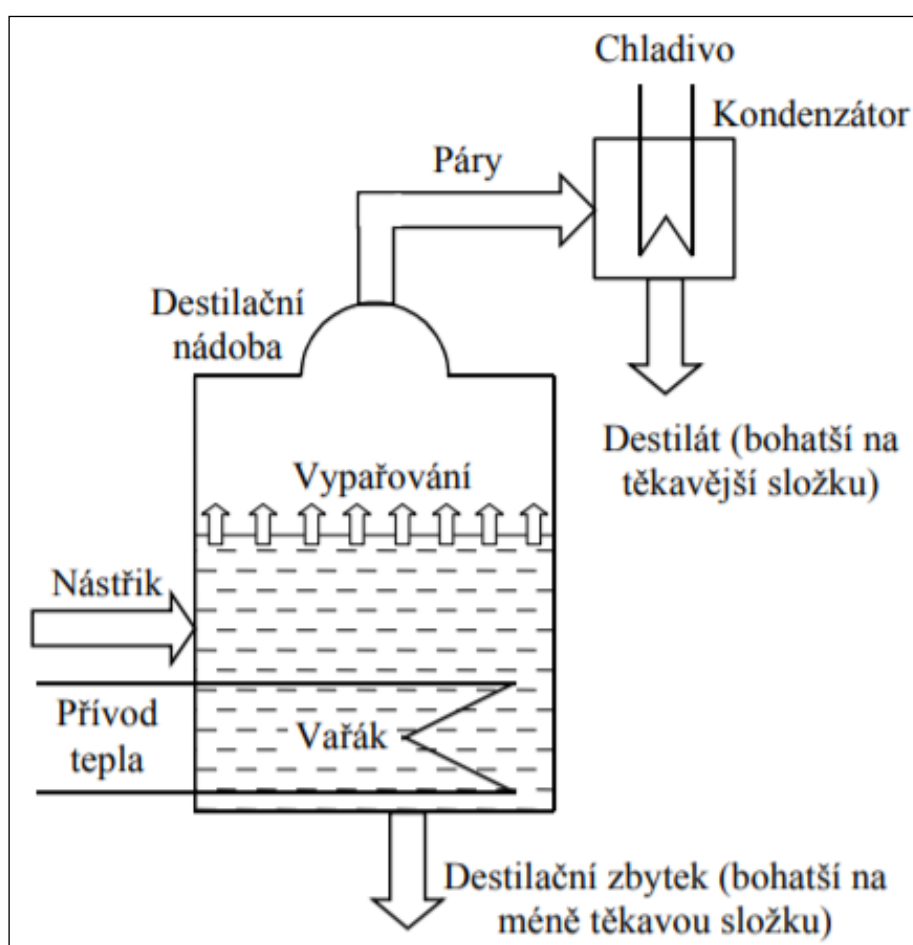
V elektrárnách hraje kondenzace roli během chlazení nízkotlaké vyexpandované páry jdoucí z turbíny. Probíhá za konstantního tlaku a teploty a kondenzační teplo je předáváno chladicímu médiu, nejčastěji studené vodě. Chladicí voda cirkuluje mezi kondenzátorem a chladicí věží, kdy se v kondenzátoru ohřeje a ve věži pomocí proudu vzduchu opět zchladí. V oblastech s nedostatečnou zásobou chladicí vody se jako médium používá také vzduch nebo vzácněji nemrznoucí směs. Schéma elektrárny fungující na Rankin-Clausiově cyklu je vidět na obrázku 4.



Obrázek 4 Rankin-Clausiovův cyklus. Převzato z <https://www.electrical4u.com/ideal-verses-actual-in-rankine-cycle>. (19.10.2020)

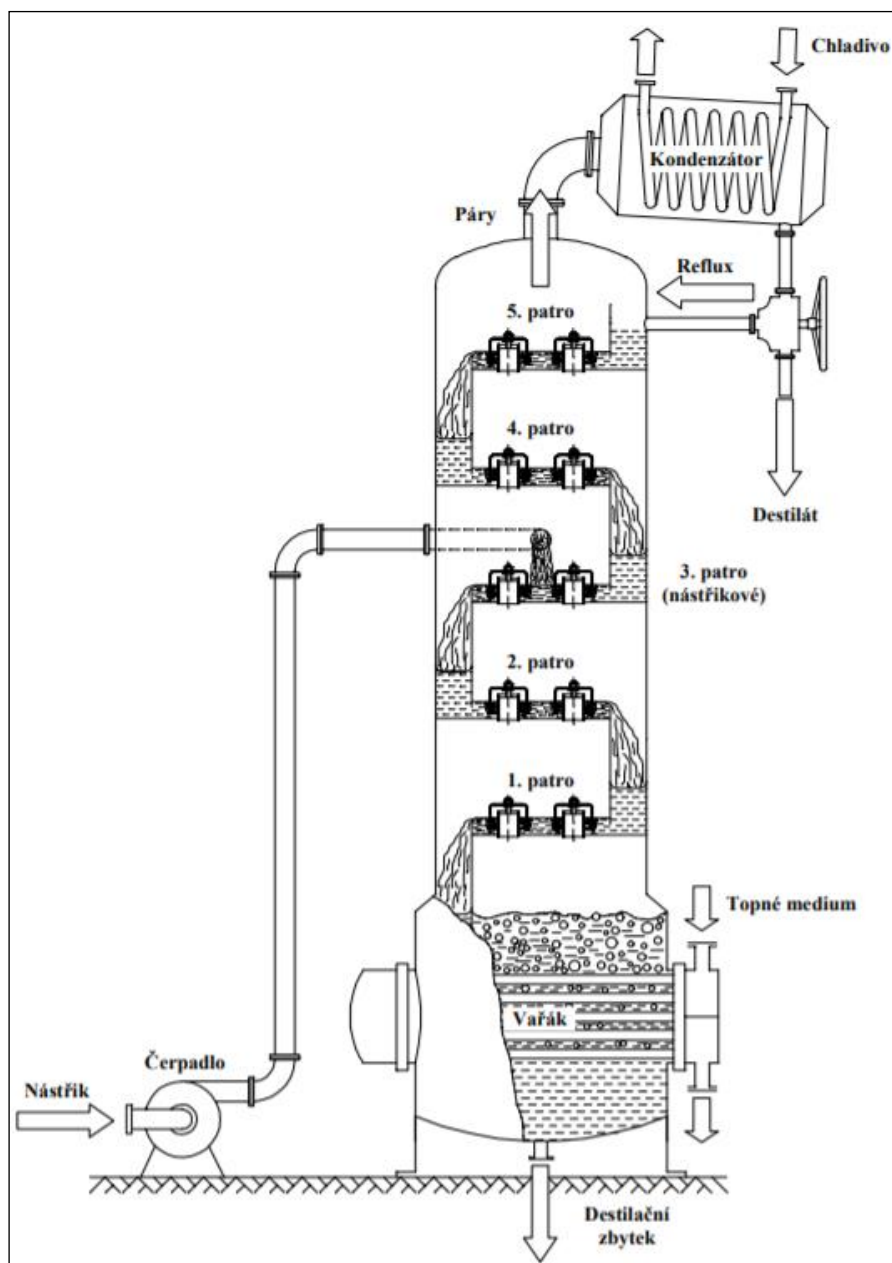
Destilace

V destilaci, což je proces separující kapalné roztoky na základě odlišného bodu varu, přivádíme teplo pomocí vařáku do směsi dvou kapalin, řekněme ethanolu a vody (tzv. *nástřik*). Teplota varu vody je při atmosférickém tlaku 100 °C, zatímco ethanolu 78 °C. Po dostatečném ohřátí se vypaří směs bohatší na těkavější složku, v našem případě ethanol. Páry poté pokračují do kondenzátoru, kde zkapalní (na tzv. destilát). Nevypařená kapalina (tzv. *destilační zbytek*) je naopak bohatší na méně těkavou složku, v našem případě vodu. Destilace má více způsobů provádění, od jednoduchých (schéma na obrázku 5) až po rektifikační (schéma na obrázku 6), avšak ve všech je stejně důležité vypařenou směs zkondenzovat. S destilací se můžeme setkat například v potravinářském průmyslu při výrobě lihovin nebo v chemickém průmyslu při zpracování ropy.



Obrázek 5 Schéma jednoduché destilace.

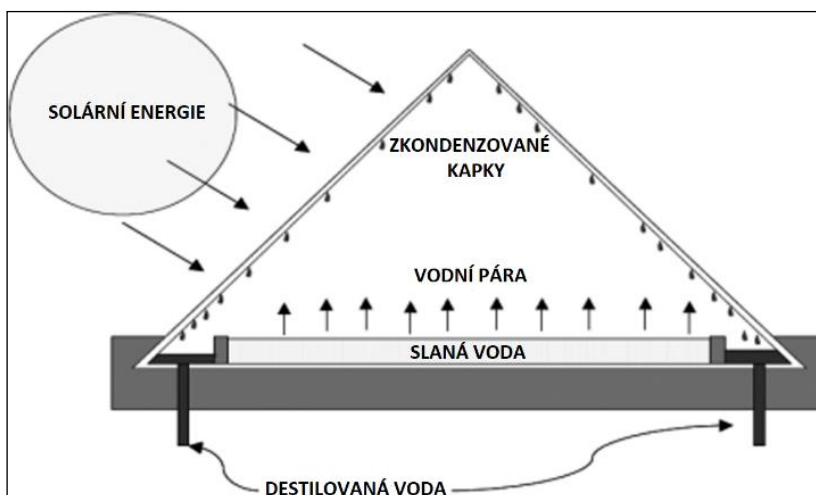
Převzato z https://moodle-vyuka.cvut.cz/pluginfile.php/401841/mod_resource/content/0/FCH_P08-FR.pdf. (21.10.2020)



Obrázek 6 Schéma rektifikační destilace.

Převzato z https://moodle-vyuka.cvut.cz/pluginfile.php/401841/mod_resource/content/0/FCH_P08-FR.pdf. (21.10.2020)

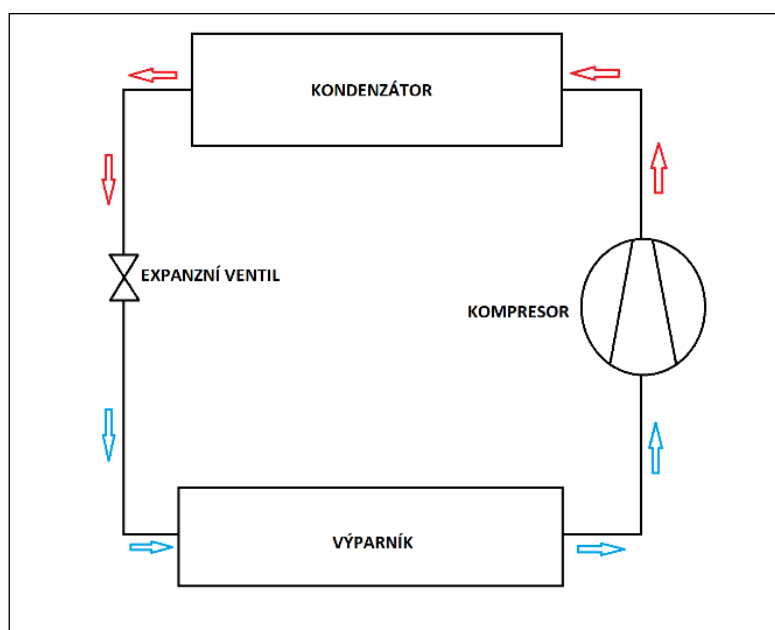
Destiluje se často také voda za účelem zbavení se rozpuštěných minerálních látek a jejímu následnému použití zejména v chemickém nebo farmaceutickém průmyslu. Na principu destilace funguje také odsolování mořské vody, kde si uvedeme nejjednodušší případ. Na zařízení, velmi podobné skleníku, dopadá sluneční záření a ohřívá nádobu s mořskou vodou. Nádoba je nejčastěji černé barvy, aby absorbovala energii co nejučinněji. Mořská voda se začne odpařovat a její pára následně kondenzovat na chladnějším skelném povrchu, odkud stéká do sběračů. Dle Shatat a Riffat (2012) se produkce takto destilované vody pohybuje pouze mezi 3 – 4 l za den na 1 m² zastavěného prostoru, avšak konstrukce zařízení umožňuje energetickou nenáročnost. Schéma zařízení je vidět na obrázku 7.



Obrázek 7 Zařízení k odsolování mořské vody. Převzato z Shatat a Riffat (2012). (24.10.2020)

Chladicí technika

Další využití kondenzace je v procesech, ve kterých je třeba chladit, uveďme například ledničku nebo klimatizaci v autě. V těchto případech jde o tzv. *kompresorové chlazení*, kdy kompresor zajišťuje nárůst tlaku plynného média a tím i jeho nárůst teploty. Ohřátý plyn pokračuje do kondenzátoru, kde kapalní a odevzdává své teplo do okolního vzduchu. Zkondenzovaná kapalina poté proudí do expanzního ventilu, kde ztratí takový tlak, aby se začala opět vypařovat v plyn. Vypařování se uskutečňuje ve výparníku a potřebuje energii ke změně skupenství. Tu odebírá z prostoru, který chceme chladit. Názorné schéma tohoto okruhu je zobrazeno na obrázku 8. Média se v chladících zařízeních označují tzv. *ASHRAE číslem* neboli *R-číslem*, které ve svém názvu obsahuje informace o dané látce. Uvedeme si nejčastější chladiva jako R134a, R-404A nebo R290.



Obrázek 8 Schéma kompresorového chladicího okruhu

Průmyslové kapalnění plynů

Pro průmyslové potřeby je nutné kapalnit celou řadu plynů, jako například kyslík, vodík, dusík. Tyto plyny ovšem mají velice nízkou teplotu kondenzace, a tak je mnohem technicky náročnější dosáhnout jejich přeměny v kapalinu. Kapalný vodík a kyslík se používá jako palivo raketových motorů, kapalný dusík a helium jako chladící média. Zemní plyn se kapalní z důvodu vysoké energetické hustoty nebo protože zaujímá výrazně menší objem, a to za atmosférického tlaku až 600krát, čímž se usnadňuje jeho přeprava.

1.4 Kondenzace s odděleným kontaktem médií

V následujících dvou kapitolách se pokusím rozdělit kondenzaci do dvou kategorií. První kategorie je kondenzace probíhající bez kontaktu médií pomocí teplosměnné plochy. V průmyslu je tato kondenzace nejrozšířenější a v literatuře nejvíce popsána.

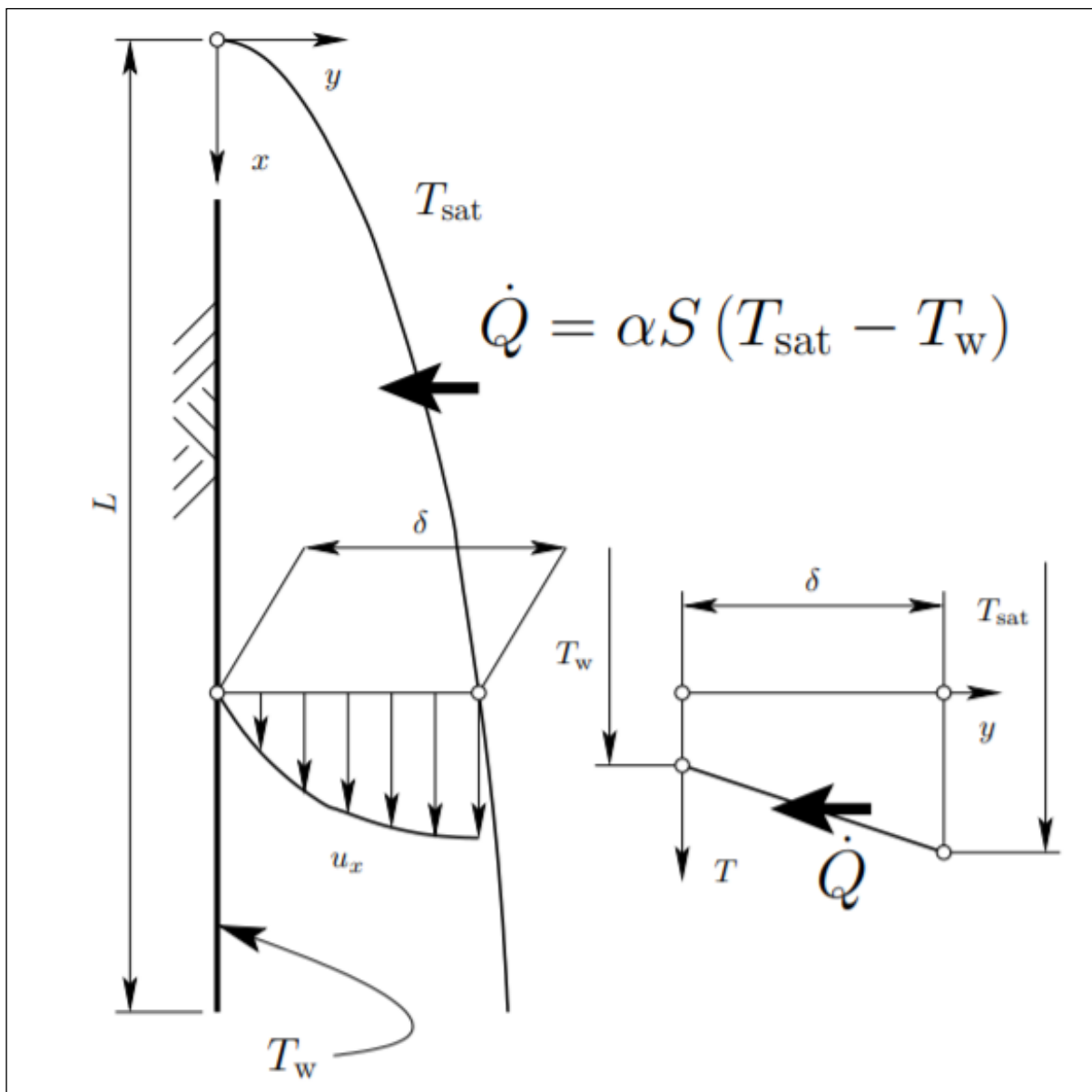
1.4.1 Typy kondenzace s odděleným kontaktem médií

Filmová kondenzace

Prvním typem kondenzace s nepřímým neboli odděleným kontaktem médií je *filmová* kondenzace, někdy nazývaná *blánová*. Anglicky nazývaná *filmwise condensation*. Po teplosměnné ploše stéká film kondenzátu buď vlivem gravitace nebo vlivem jiné, například odstředivé síly. Je nutné, aby byla plocha smáčivá s kondenzátem. Jak uvádí Šesták a Rieger (1993), pro tento typ kondenzace se dimenzují teplosměnné plochy, ačkoliv při ní nedochází vždy k nejintenzivnějšímu přenosu tepla. Dá se ale nejlépe popsat výpočtovými vztahy.

Filmová kondenzace na vertikální stěně

Kondenzaci páry na vertikální stěně popisuje *Nusseltův model laminární filmové kondenzace*. Na vrcholu teplosměnné stěny, která je chladnější než okolní nasycená pára, není žádná tloušťka kondenzátu δ . Avšak s rostoucí vzdáleností ve směru stékání tloušťka roste, jak je vidět na obrázku 9. Vzniklý film poté vytváří termický odpor mezi stěnou a kondenzující parou.



Obrázek 9 Schéma Nusseltova modelu filmové kondenzace. Převzato z Whalley (1990). (27.10.2020)

Tento model má několik nutných předpokladů pro svou platnost:

- I. Pára je nasycená
- II. Konduktivní přenos tepla
- III. Teplota nasycené páry i teplota na stěně jsou konstantní
- IV. Laminární tok kondenzátu
- V. Teplosměnná plocha dokonale hladká
- VI. Teplotní profil filmu je lineární
- VII. Proces probíhá za nepřítomnosti inertů
- VIII. Na počátku teplosměnné stěny je nulová tloušťka kondenzátu

Součinitel přestupu tepla α se vypočítá ze vztahu

$$\alpha = 0,943 \sqrt[4]{\frac{g\rho_l(\rho_l - \rho_g)l_{lg}\lambda_l^3}{\mu_l(T_{sat} - T_w)L}}. \quad (2)$$

Dle Šesták a Rieger (1993) výsledný vztah (2) poskytuje vždy nižší hodnoty součinitele přestupu tepla, proto tento model stojí při dimenzování teplosměnné plochy na straně větší bezpečnosti. Z experimentů bylo zjištěno, že tento vztah (2) platí zejména v případech, kdy Prandtlovo číslo kondenzátu je větší než 0,5 a kdy parametr $c_{p,l}(T_{sat} - T_w)/l_{lg}$ je roven nebo menší než 1. Konstanta 0,943 ve vztahu (2) se vztahuje k původnímu odvození z roku 1916. Avšak jak uvádí Whalley (1990), experimenty ukázaly, že přestup tepla je ve skutečnosti asi o pětinu intenzivnější, proto se můžeme setkat s konstantou 1,13.

Termofyzikální veličiny se při výpočtu vztahují ke střední teplotě filmu kondenzátu. Uvažované měrné skupenské kondenzační teplo l_{lg} se vztahuje k teplotě nasycené páry T_{sat} . Avšak lze ho dle Šesták a Rieger (1993) modifikovat, když budeme uvažovat vliv podchlazení kondenzátu na teplotu stěny T_w

$$l_{lg}^m = l_{lg} + \frac{3}{8}c_{p,l}(T_{sat} - T_w). \quad (3)$$

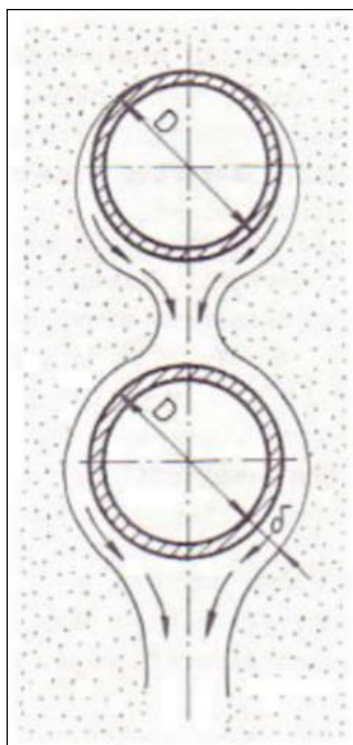
Filmová kondenzace na horizontální stěně/trubce

Jak uvádí Šesták a Rieger (1993), vztah pro výpočet kondenzace na horizontální trubce je velice podobný, jenom s pozměněnou konstantou a nahrazením výšky stěny L za vnější průměr trubky D :

$$\alpha = 0,725 \sqrt[4]{\frac{g\rho_l(\rho_l - \rho_g)l_{lg}\lambda_l^3}{\mu_l(T_{sat} - T_w)D}}. \quad (4)$$

Filmová kondenzace na horizontálním svazku trubek

Wilhelm Nusselt odvodil také vztah pro případ, kdy je nad sebou umístěno n trubek stejného vnějšího průměru. Je předpokládáno, že vzniklý kondenzát přeteče celý z jedné trubky na nejbližší trubku níže, viz obrázek 10.



Obrázek 10 Schéma filmové kondenzace na horizontálním svazku trubek. Převzato Šesták a Rieger (1993). (30.10.2020)

Dle Šesták a Rieger (1993) je zde třeba uvažovat podchlazení kondenzátu – rovnice (3). Mezi trubkami na povrchu filmu totiž může docházet k dodatečné kondenzaci. Vztah vypadá následovně:

$$\alpha = 0,728 \left[1 + 0,2 \frac{c_{p,l}(T_{\text{sat}} - T_w)}{l_{\text{lg}}} (n - 1) \right]^4 \sqrt{\frac{g \rho_l (\rho_l - \rho_g) l_{\text{lg}}^m \lambda_l^3}{n \mu_l (T_{\text{sat}} - T_w) D}}. \quad (5)$$

Experimenty prokázaly dobrou shodu s tímto vztahem v případě, když parametr $(n - 1)c_{p,l}(T_{\text{sat}} - T_w)/l_{\text{lg}}$ je menší než 2.

Další případy filmové kondenzace

Faktorů, které ovlivňují součinitel přestupu tepla při filmové kondenzaci, je mnoho. Některé vybrané budou dle Šesták a Rieger (1993) ve stručnosti popsány:

- a) **Vertikální trubky** – Vztah (2) byl zjištěn pro případ vertikální stěny, avšak když se bude uvažovat malá tloušťka filmu vůči průměru trubky, může se rovnice použít i na vertikální trubky.
- b) **Vliv rychlosti páry na tok filmu** – V určitých případech může proud páry ovlivňovat tok filmu kondenzátu. Například při kondenzaci uvnitř vertikálních trubek pára proudící vzhůru kondenzát zpomaluje. Pára proudící dolů kondenzát naopak zrychluje a tím zintenzivňuje přestup tepla.

- c) **Přehřátá pára** – V případě kondenzace přehřáté páry je odvedené kondenzační teplo větší než v případě páry nasycené o tzv. *přehřívací teplo*.
- d) **Turbulentní režim toku filmu** – Někdy může tloušťka filmu narůst natolik, že dojde k přechodu do turbulentního režimu proudění. Ke konduktivnímu přenosu tepla se poté přidá vliv turbulence a přestup tepla se zintenzivní.

Kapičková kondenzace

Druhým typem kondenzace s odděleným kontaktem médií je kondenzace *kapičková*. Anglicky nazývaná *droplet condensation*. S ní se dle Sazima (1993) můžeme setkat tehdy, když teplosměnná plocha není smáčivá s kondenzátem. Nesmáčivé kapaliny mají velké hodnoty povrchového napětí σ zaručujícího kulovité tvary kapiček. Například rtuť má při teplotě 25 °C hodnotu povrchového napětí $\sigma_{\text{Hg}} = 485 \cdot 10^{-3} \text{ N m}^{-1}$, zatímco voda pouze $\sigma_{\text{H}_2\text{O}} = 72,8 \cdot 10^{-3} \text{ N m}^{-1}$, jak uvádí Engineering ToolBox (2005). Proto voda je na běžných kondenzátorech smáčivá. Pro zajištění nesmáčivosti je ale také možné povrchově upravit teplosměnnou plochu například různými nátěry. Avšak problém je v tom, tyto úpravy nevydrží delší dobu provozu, a navíc jejich účinek může být omezen jakýmkoliv znečištěním. Tento fenomén se zkoumá již devět desetiletí a stále neposkytuje dostatečně uspokojivé výsledky pro použití ve velkém měřítku v průmyslu, jak uvádí Ahlers et al. (2019).

Dle Sazima (1993) je představa o kapičkové kondenzaci taková, že vzniká na mikronerovnosti ochlazovacího povrchu neboli na tzv. *kondenzačním jádru*. Pro vznik kapičky kondenzátu je nejprve třeba podchladiť páru

$$T_{\text{sat}} - T_{\text{w}} = \frac{2\sigma_1 T_{\text{sat}}}{R_0 \rho_1 l_{\text{lg}}}, \quad (6)$$

kde R_0 je minimální poloměr kapičky a idealizovaného kondenzačního jádra

$$R_0 = \frac{2\sigma_1 T_{\text{sat}}}{\rho_1 l_{\text{lg}} (T_{\text{sat}} - T_{\text{w}})}. \quad (7)$$

Z rovnice (7) plyne, že čím větší je podchlazení páry $T_{\text{sat}} - T_{\text{w}}$ vůči teplotě kondenzující páry T_{sat} , tím menší kapičky kondenzátu vznikají. Postupně s časem se poté kapičky zvětšují. Jak uvádí Sazima (1993), kapičky se na svislé stěně zvětšují do okamžiku, kdy gravitační síla kapičky překoná sílu setrvačnou a sílu kapilární. V tom okamžiku kapička začíná sjíždět po povrchu a strhává s sebou kapičky pod ní, čímž se začnou tvořit další větší kapičky a děj se znovu opakuje. V případě malých kapiček má fázové rozhraní největší povrch a tím pádem i intenzivnější přenos tepla.

V literatuře můžeme nalézt mnoho různých korelací. Uvedeme si pro názornost pouze dvě vybrané kritériální rovnice dle Sazima (1993), které popisují přenos tepla při kapičkové kondenzaci. Rovnice jsou empiricky získané a platí vždy v určitém rozsahu termofyzikálních veličin. Nusseltovo číslo při kapičkové kondenzaci páry v rozmezí tlaků $0,12 \cdot 10^5 \text{ Pa} < p < 1 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ a v rozmezí Prandtlova čísla $1,75 < Pr < 3,65$ lze určit z korelace

$$\text{Nu}_k = 3,2 \cdot 10^{-4} \cdot \text{Re}_k^{-0,84} \cdot \text{Pr}^{1/3} \cdot K_k^{1,16} \quad (8)$$

pro rozmezí Reynoldsova čísla $8 \cdot 10^{-4} < \text{Re}_k < 3,3 \cdot 10^{-3}$. A z korelace

$$\text{Nu}_k = 5 \cdot 10^{-6} \cdot \text{Re}_k^{-1,57} \cdot \text{Pr}^{1/3} \cdot K_k^{1,16} \quad (9)$$

pro rozmezí Reynoldsova čísla $3,3 \cdot 10^{-3} < \text{Re}_k < 3,5 \cdot 10^{-2}$.

Reynoldsovo číslo je v těchto případech definováno jako

$$\text{Re}_k = \frac{u_k L}{\nu_1}, \quad (10)$$

kde za charakteristický rozměr L dosadíme poloměr kapičky R_0 ze vztahu (7) a rychlost u_k vypočítáme jako

$$u_k = \frac{\lambda_1 (T_{\text{sat}} - T_w)}{R_0 \rho_1 l_{\text{lg}}}. \quad (11)$$

V rovnicích (8) a (9) dále vystupuje kondenzační kritérium K_k , které se vyjádří následovně:

$$K_k = k(T_{\text{sat}} - T_w) L_p, \quad (12)$$

kde L_p je Laplaceovo kritérium

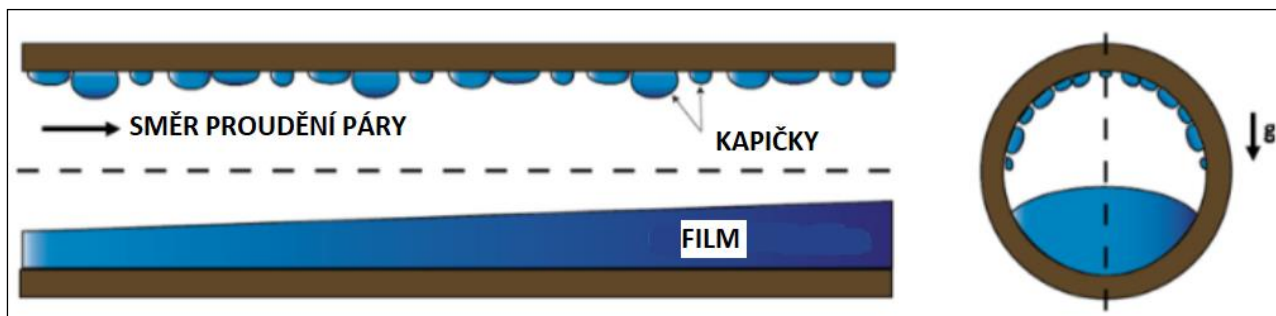
$$L_p = \frac{2}{l_{\text{lg}}} \left(\frac{\sigma_1}{\rho_1 \nu_1} \right)^2 \frac{T_{\text{sat}}}{T_{\text{sat}} - T_w} \quad (13)$$

a součinitel k vyjadřuje pokles povrchového napětí s teplotou. Jeho často používaná hodnota pro vodu je $k = 1,942 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$.

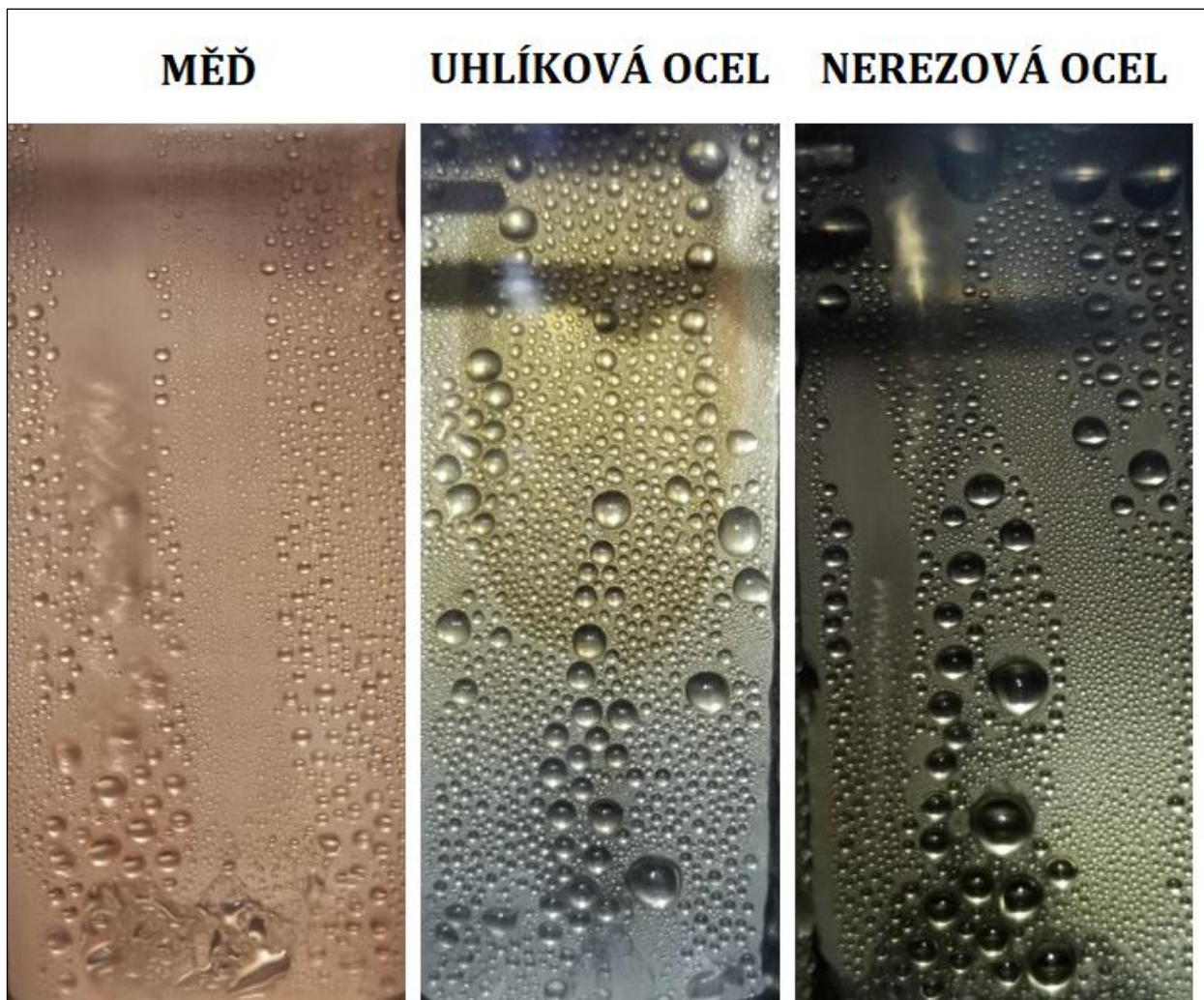
Součinitel přestupu tepla α se pak vypočítá z Nusseltova čísla:

$$\text{Nu}_k = \frac{\alpha R_0}{\lambda_1}. \quad (14)$$

Dle Šesták a Rieger (1993) bylo experimentálně dokázáno, že za určitých podmínek má kapičková kondenzace 2 až 20krát intenzivnější přenos tepla než kondenzace filmová. Avšak při větších rozdílech teploty stěny vůči teplotě nasycení je intenzivnější zase kondenzace tvořící film, jak uvádí Sazima (1993). Jako názorná ukázka obou typů kondenzace s odděleným kontaktem médií slouží obrázek 11. Kapičková kondenzace na různých materiálech je vidět na obrázku 12.



Obrázek 11 Schéma filmové a kapičkové kondenzace.
 Převzato z <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120172>. (2.11.2020)



Obrázek 12 Kapičková kondenzace na různých materiálech.
 Převzato z <https://www.1-act.com/resources/tech-papers/vertical-surface-dropwise-condensation-heat-transfer-using-self-healing-coatings/>. (2.4.2021)

1.4.2 Kondenzátory s nepřímým kontaktem médií

K docílení kondenzace s nepřímým kontaktem médií je třeba teplosměnné plochy, oddělující chladící médium od kondenzující složky.

Trubkové kondenzátory

Trubkové kondenzátory jsou nejběžnějším typem vůbec, používají se například v elektrárnách nebo destilačních kolonách. Jsou to vlastně trubkové výměníky tepla, ve kterých dochází k požadované kondenzaci. Mohou být horizontální i vertikální. Skládají se z pláště, tedy válcové nádoby s nejčastěji plochými či eliptickými dny, a z trubek usazených v trubkovnici buď zavařením nebo zaválcováním. Přívod a odvod média do a z trubek je oddělen stěnou od mezitrubkového prostoru, ve kterém proudí druhé médium. Trubkový svazek podpírají ještě segmentové přepážky, které ještě navíc plní funkci usměrnění toku média v plášti a zajišťují intenzivnější přestup tepla. Mnoho konstrukčních variant tohoto typu výměníku/kondenzátorů můžeme najít ve standardech TEMA (Tubular Exchanger Manufacturers Association), jak uvádí Butterworth (1988). Reálný trubkový kondenzátor je vidět na obrázku 13.

V případě kondenzátorů může být kondenzující médium uvnitř i vně trubek. Kondenzátor s kondenzací v plášti, což je častější případ, je nad úroveň hladiny vybaven odfukovým hrdlem pro nezkondenzovatelné inertní plyny. Tyto plyny totiž snižují součinitel přestupu tepla kondenzátoru a tím ho činí méně účinným. Dle Butterworth (1988) se kondenzace v trubkách volí především pro korozivní či vysokotlaká parní média.



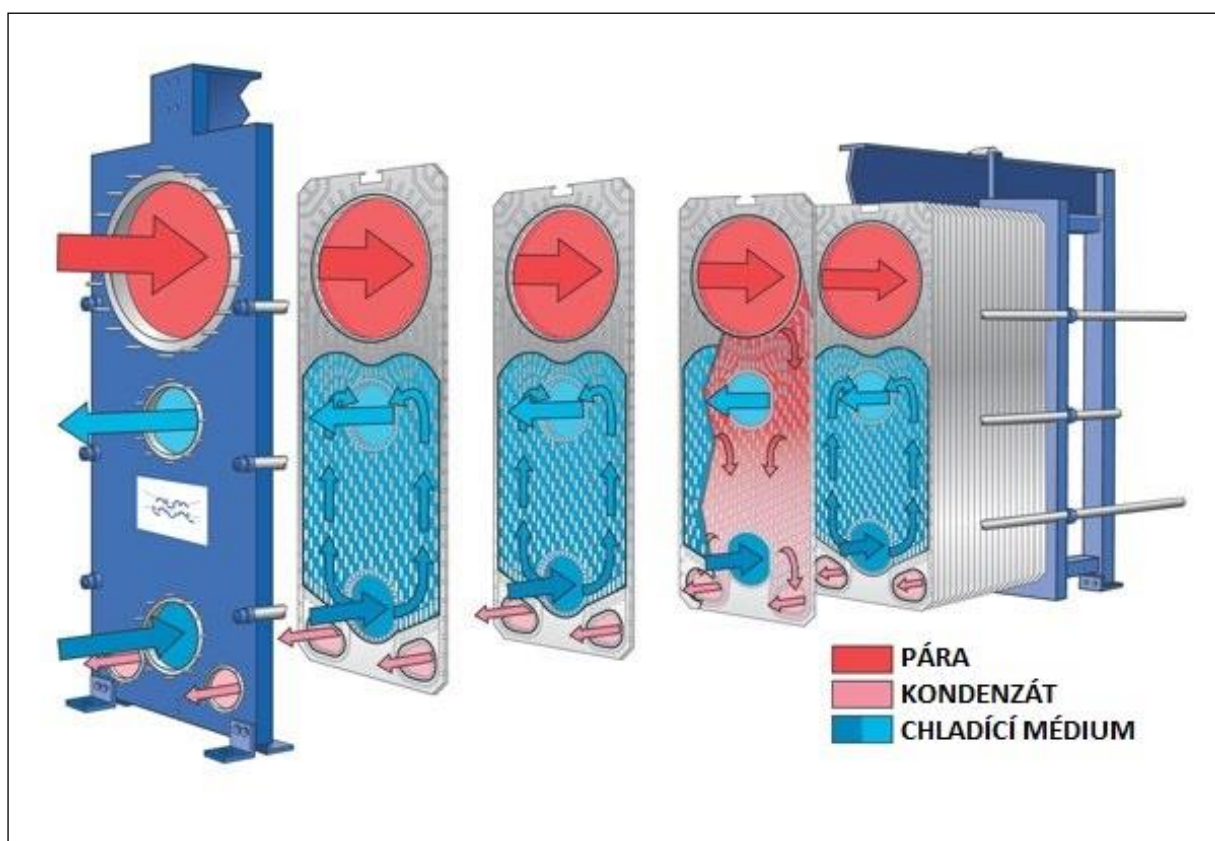
Obrázek 13 Trubkový kondenzátor.

Převzato z <https://www.indiamart.com/proddetail/shell-and-tube-condenser-20684353612.html>. (5.11.2020)

Deskové kondenzátory

Deskové kondenzátory jsou vlastně deskové výměníky tepla. Thonon (1995) uvádí, že ačkoliv původní aplikace deskových výměníků byla pasterizace mléka, postupně se začaly využívat i v dalších odvětvích, například jako kondenzátory ve čpavkových chladicích systémech.

Deskové kondenzátory se skládají z profilovaných desek naskládaných na sebe. Desky jsou profilovány z důvodu větší teplosměnné plochy, a tedy intenzivnějšího přestupu tepla. U kondenzátorů je třeba dosáhnout rovnoměrného rozložení toku médií pro co nejvyšší účinnost. V deskách jsou umístěny kruhové otvory pro vstup a výstup médií. Vstupující pára vstupuje do horní části kondenzátoru a kondenzát vystupuje spodem, jak je zobrazeno na obrázku 14. Kondenzující a chladící média proudí většinou ob jednu desku. K izolaci médií vůči sobě slouží u běžných deskových výměníků těsnění, u kondenzátoru jsou ale desky z důvodu vyšších teplot pevně přivařeny a tím pádem se stávají nerozebíratelnými, jak uvádí Šesták a Žitný (1997).

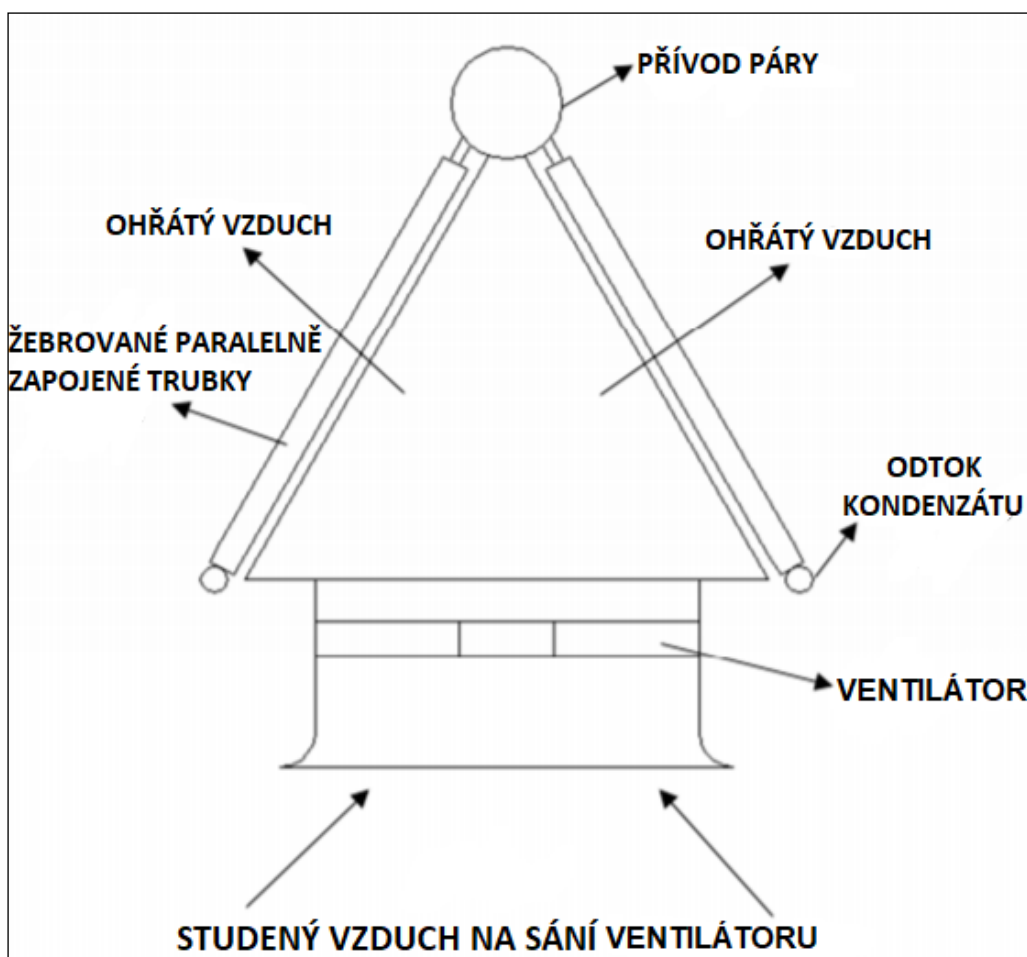


Obrázek 14 Deskový kondenzátor. Převzato z <https://www.alfalaval.com/microsites/gphe/types/alfacond/>. (5.11.2020)

Oproti trubkovým kondenzátorům mají deskové příznivější cenu, větší kompaktnost a vyšší součinitel prostupu tepla. Ovšem jejich nevýhoda spočívá v nižším rozsahu teplot a tlaků. Desky se totiž začnou příliš namáhat. Tím se omezuje škála jejich využití.

Vzduchové kondenzátory

Vzduchové kondenzátory se používají například v oblastech, kde není možné využít jiné chladicí médium. Vzduchové kondenzátory se dále užívají všude, kde se chtějí uspořit provozní náklady za chladicí média. Jedná se o trubky nebo svazek trubek, ve kterých proudí kondenzující pára a které ochlazuje proud vzduchu. Trubky mívají žebrování z důvodu zvýšení teplosměnné plochy. Nejjednodušším typem je kondenzátor, jehož chladicí vzduch proudí pomalou přirozenou konvekcí. Tento typ kondenzátoru můžeme nalézt například doma v lednici. Druhým typem je využití ventilátorů pro vytvoření nucené konvekce, což je nákladnější na provozní i investiční náklady, hlučnější, avšak zrychlující celý proces kondenzace. Tento typ se využívá například v elektrárnách pro kondenzaci vyexpandované páry, jak uvádí Mecholic (2018). Na obrázku 15 je vidět schéma vzduchového kondenzátoru s ventilátorem před teplosměnnou plochou. Další varianta kondenzátoru je opačná, kdy ventilátor je za teplosměnnou plochou a nasává tedy již ohřátý vzduch.



Obrázek 15 Vzduchový kondenzátor. Převzato z <https://doi.org/10.3390/en12234560>. (5.11.2020)

1.5 Kondenzace s přímým kontaktem médií

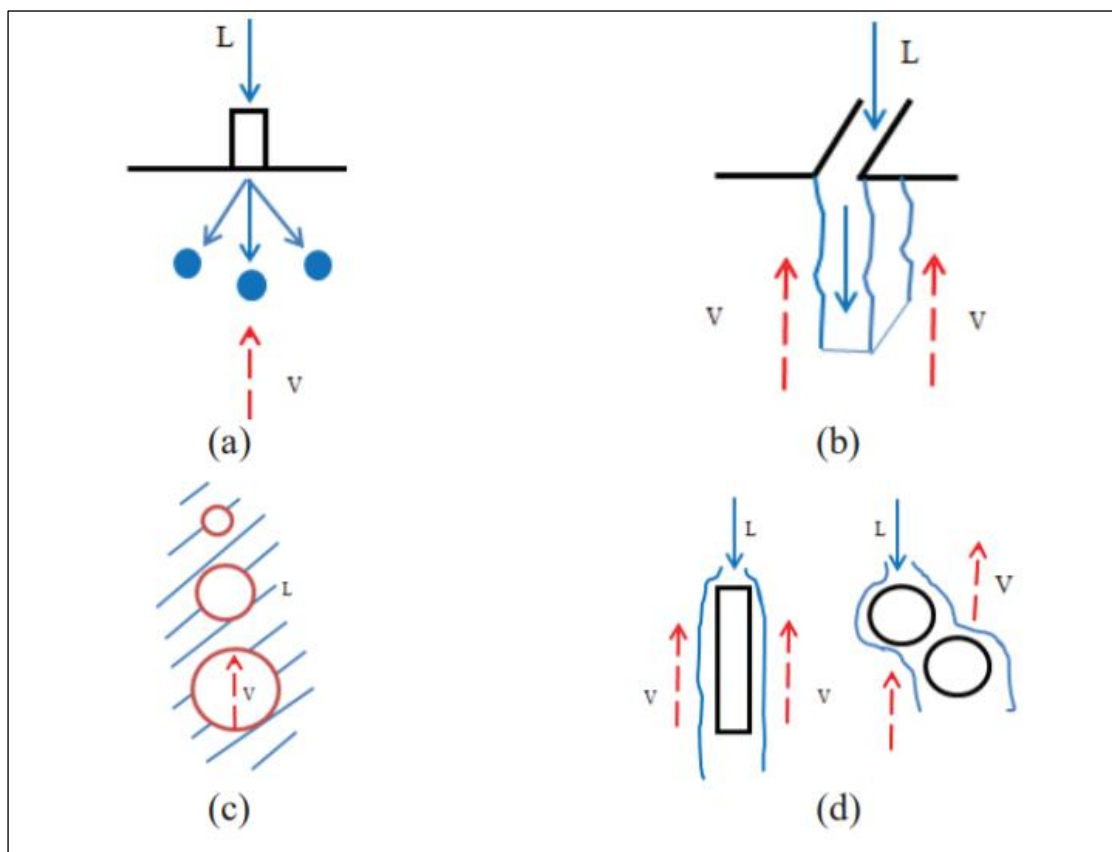
Druhou kategorií kondenzace je kondenzace bez teplosměnné plochy, kde se média přímo mísí. V angličtině se jí říká *direct contact condensation*, zkráceně *DCC*. Tuto zkratku budu používat ve zbylé části této práce.

Rozdíly přímé a nepřímé kondenzace.

DCC díky přímé interakci médií umožňuje efektivnější přenos tepla, a dokonce i umožňuje přenos hmoty díky absenci teplosměnné plochy. Právě přenos hmoty může být žádoucí, avšak také vůbec být nemusí. Kondenzátory DCC mají nižší investiční i provozní náklady, a to zejména kvůli jednodušší konstrukci, méně časté korozi, méně častému foulingu a jednodušší údržbě. Naopak v čem se DCC jeví nevýhodnější, je právě mísení proudů. Mísení může způsobit kontaminaci látek nebo změnu koncentrací, ať už například kvůli absorpci nebo extrakci. Další nevýhodou je oproti kondenzátorům s teplosměnnou plochou potřeba přivádět obě média pod stejným tlakem, jak uvádí Kreith a Boehm (1988).

1.5.1 Typy kondenzace s přímým kontaktem médií

DCC lze dle Hewitt et al. (2000) rozdělit do čtyř hlavních typů. Tyto typy jsou názorně ukázány na obrázku 16.



Obrázek 16 Schéma čtyř hlavních typů DCC. Převzato z Hewitt et al. (2000). (12.11.2020)

- a) DCC na kapičkách (obr. 15a) vypadá tak, že chladící voda je vstříkována skrze hlavici, která zajistí produkci malých kapiček. Kapičky poté sprchují v kondenzačním prostoru páru. Pára během tohoto procesu na kapkách kondenzuje a vytváří na nich vrstvu filmu. Kondenzace je s rostoucí vzdáleností letu kapky čím dál méně intenzivní, protože vytvořený film na kapkách je v podstatě dalším termickým odporem bránícím přenosu tepla. Dle Kreith a Boehm (1988) se však v praxi tento termický odpor často zanedbává, protože vrstva filmu bývá velice malá. S postupem času se během letu kapička ohřívá, což způsobí nižší teplotní rozdíl a tím pádem opět méně intenzivní přenos tepla.
- b) DCC na proudu kapaliny (obr. 15b) je velmi podobná DCC na kapičkách, avšak místo kapiček je pára v kondenzátoru skrápěna proudem kapaliny.
- c) Proublávaná DCC (obr. 15c) je z hlediska médií přesně naopak oproti předchozím dvěma typům. Vstříkuje se totiž pára do nádrže s kapalinou, kde následně kondenzuje.
- d) DCC na filmu kapaliny (obr. 15d) si lze představit například jako náplňovou kolonu, ve které na povrchu částic vzniká vrstva filmu kapaliny. Film se poté dostává do styku s kondenzující parou. Uspořádání může být jak protiproudé, tak souproudé. Tímto typem DCC se budu v rámci literární rešerše zabývat nejvíce.

2 Literární řešerše

2.1 DCC na kapičkách

Ford a Lekic (1973)

Ford a Lekic v roce 1973 sledovali růst sprchujících kapek vody během DCC vodní páry. Model zjednodušili na nestacionární přenos tepla v pevné kouli a zanedbali tepelný odpor na fázovém rozhraní. Uvažovali pouze vedení tepla kondukcí a uvažovali také pouze malé průměry kapek. Výsledkem jejich experimentu je rovnice popisující růst kapičky

$$\frac{D}{D_i} = 1 + \psi \sqrt{1 - \exp(-\pi^2 Fo)}, \quad (15)$$

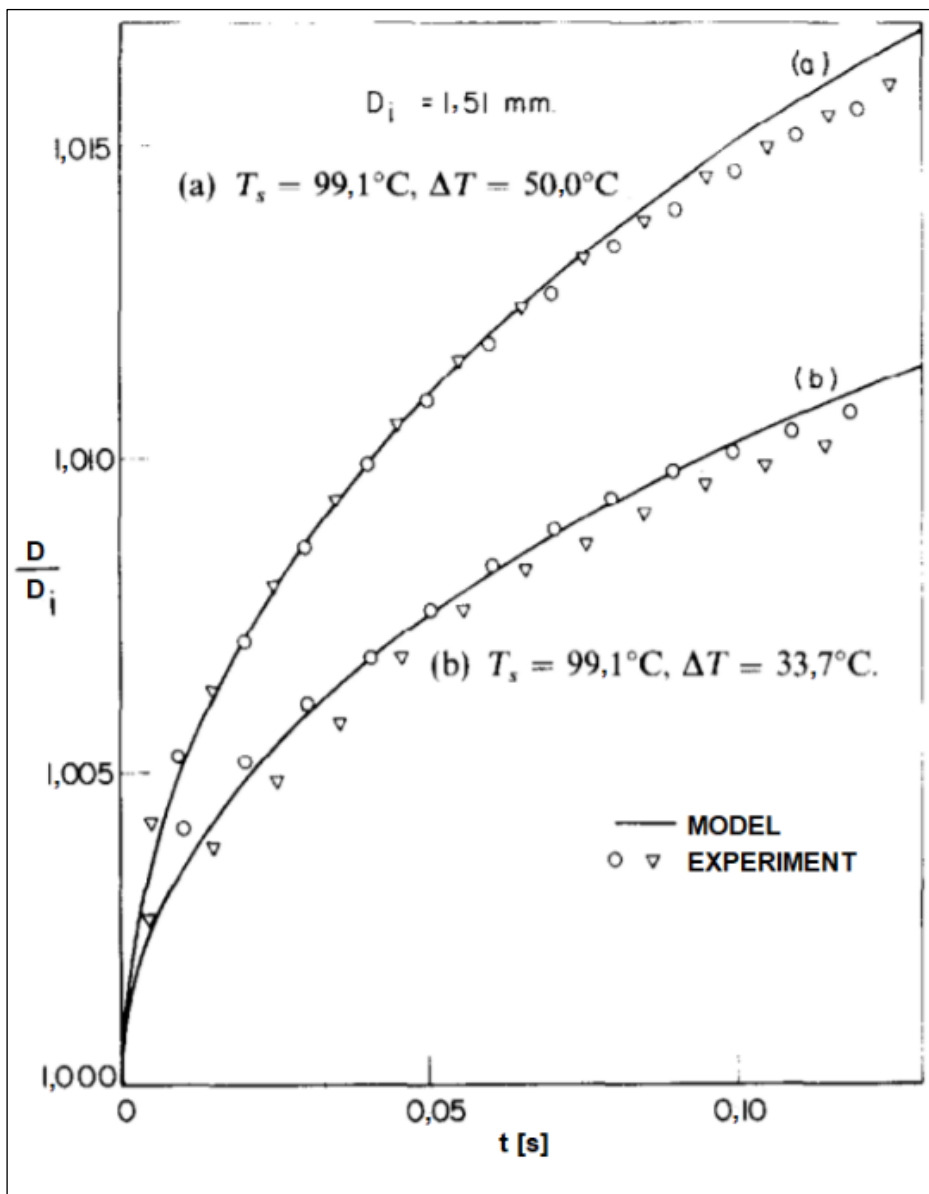
kde index i značí počáteční vlastnosti kapičky a člen ψ se vypočítá jako

$$\psi = \sqrt[3]{\left(1 + \frac{c_{p,l}(T_{\text{sat}} - T_i)}{l_{\text{lg}}}\right) - 1} \quad (16)$$

a Fo je Fourierovo číslo:

$$Fo = \frac{4at}{D_i^2}. \quad (17)$$

V rovnici (17) se vyskytuje t jako čas a a jako součinitel teplotní vodivosti. Experiment prováděli při rychlosti páry nižší než $60,96 \text{ mm s}^{-1}$ a počátečními velikostmi kapiček $1,51 \text{ mm}$ a $1,76 \text{ mm}$. Na obrázku 17 je vidět porovnání naměřených hodnot s těmi vypočtenými z rovnice (15). Sice se autorům podařilo zachytit pouze krátký časový úsek, naměřená data ale korelaci odpovídají vcelku dobře. Ze závislosti je patrné, že při větším podchlazení kapky $\Delta T = T_{\text{sat}} - T_i$ dochází k jejímu většímu růstu.



Obrázek 17 Závislost růstu kapky na čase. Převzato z Ford a Lekic (1973). (14.11.2020)

Ford a Lekic (1980)

O sedm let později spolu autoři opět zkoumali kondenzaci páry na kapičkách vody hlouběji. Během výzkumu předpokládali, že se kapky vzájemně mezi sebou neovlivňují a nemají žádný vliv na rychlost páry. Další předpoklad byl, že koalescence kapek nebo naopak rozbíjení kapek na menší kapičky neovlivňuje přenos tepla. Počet kapek o průměru mezi $D - (dD/2)$ a $D + (dD/2)$ se vypočítá jako

$$dn = \frac{\dot{m}_1 P}{\rho_1 \sqrt{\pi}} \frac{D_m}{D_i (D_m - D_i)} \frac{6}{\pi D_i^3} \exp(-P^2 y^2) dD_i, \quad (18)$$

kde průměr kapky D se vypočítá z rovnice (15) a kde P se uvažuje jako bezrozměrný parametr rovnoměrnosti rozstříku, D_m jako maximální průměr kapky závisující na velikosti trysky a y jako bezrozměrná funkce velikosti kapky

$$y = \ln \left(\frac{ID_i}{D_m - D_i} \right), \quad (19)$$

kde symbol I je bezrozměrný distribuční parametr šikmosti. Množství tepelného toku, které přijaly rozstříkované kapky během kondenzace ve vzdálenosti z od trysky, lze pak určit z

$$\dot{Q}_z = \frac{\pi}{6} \rho_1 l_{1g} \int_0^{D_m} (D^3 - D_i^3) dn. \quad (20)$$

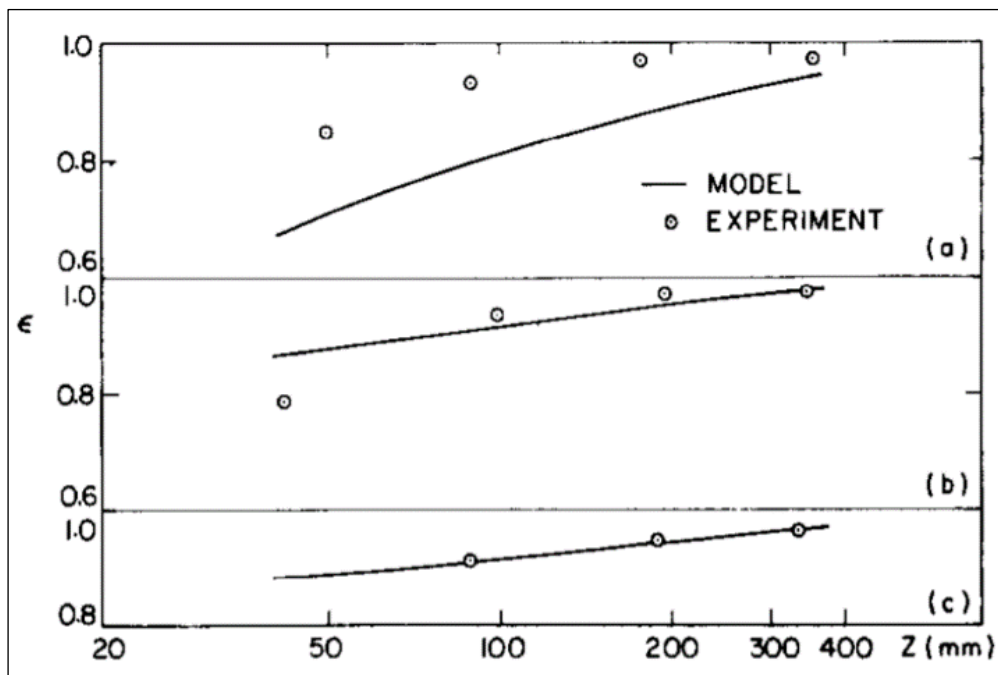
Celkové množství tepla, které může být přijato kapalinou za jednotku času lze vyjádřit

$$\dot{Q}_T = \dot{m}_1 (h_c - h_i), \quad (21)$$

kde h_c je měrná entalpie kondenzátu a h_i je měrná entalpie kapky na počátku. Účinnost se již vypočítá jako

$$\epsilon = \frac{\dot{Q}_z}{\dot{Q}_T}. \quad (22)$$

Ford a Lekic měřili hodnoty také experimentálně. Jako kondenzační prostor použili válcovou nádobu o průměru 305 mm a výšce 850 mm. K nástříku kapek byly postupně použity tři kuželové trysky o různé velikosti. Během experimentu měřili teplotu na vstupu páry a vody, dále měřili teplotu na výstupu kondenzátu v různých vzdálenostech od trysky, konkrétně 42 – 356 mm. Experimentem se ukázalo, že se průměr kapek jeví jako nejvýznamnější parametr ovlivňující tepelnou účinnost. Její vysoké hodnoty vypovídají o tom, že lze takto čistou páru velmi efektivně zkondenzovat. Výsledky jsou vidět na obrázku 18. Jsou znázorněny tři případy, kdy zejména poslední dva vykazují velice přesnou shodu s teoretickou předpovědí.

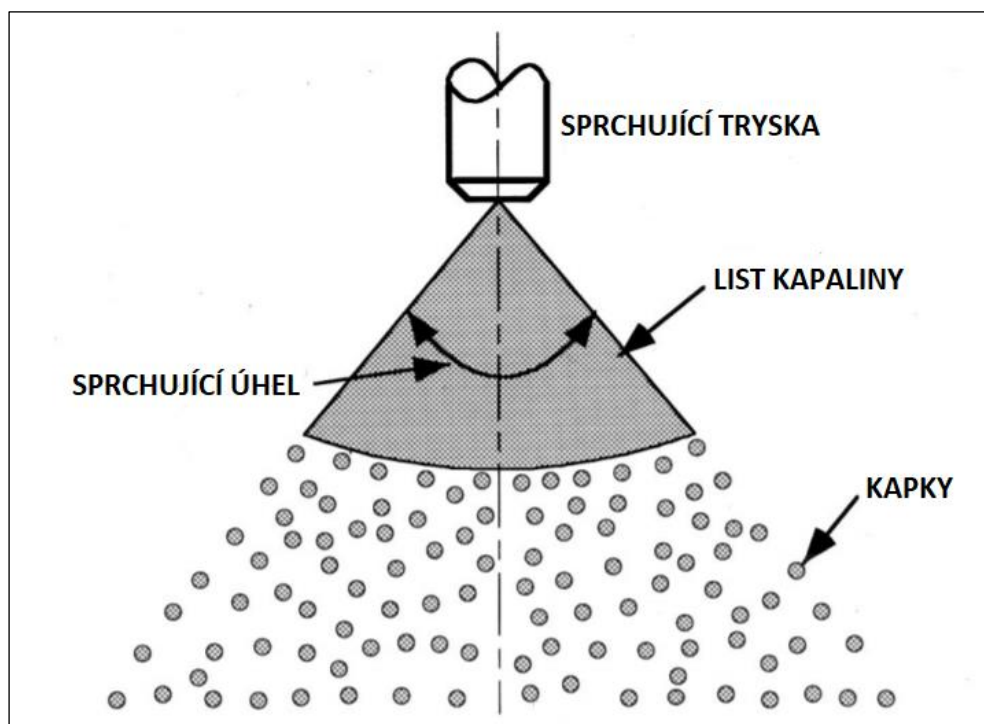


Obrázek 18 Závislost tepelné účinnosti na vzdálenosti od sprchovací trysky. Převzato z Ford a Lekic (1980). (14.11.2020)

- (a) Velikost trysky G1/4", tlaková ztráta v trysce $\Delta p = 34$ kPa, tlak páry $p = 99$ kPa
- (b) G3/8", $\Delta p = 30,6$ kPa, $p = 99$ kPa
- (c) G1/2", $\Delta p = 34$ kPa, $p = 99$ kPa

Takahashi et al. (2001)

Takahashi et al. (2001) uvažují, že kapalina opouštějící trysku nejprve vytvoří souvislý kužel (list kapaliny), který se poté rozpadne na kapky, jak je vidět na obrázku 19. Proto počítali kondenzaci pro obě tyto oblasti zvlášť.



Obrázek 19 Schéma sprchující trysky. Převzato z Takahashi et al. (2001). (16.11.2020)

Ačkoliv stejný předmět výzkumu mělo mnoho autorů před nimi, jak uvádí Takahashi s kolegy, chtěli získat spolehlivější experimentální data. V tomto experimentu je totiž technicky obtížné měřit teplotní profil na listu kapaliny, protože jeho tloušťka se pohybuje mezi jednotkami až stovkami mikrometrů. Předchozí výzkumníci například vůbec nezmínili velikost použitých termočlánků, proto mohli použít relativně větší termočlánky, než je žádoucí, a tím způsobit značné odchylky měření. Takahashi et al. (2001) tedy k výzkumu použili velmi malé termočlánky s rychlou odezvou, které zaznamenávaly teploty na listu kapaliny tak, že byly umístěné na pohybující se konzoli ve vodorovném směru. Pro první oblast, tedy kuželový list kapaliny, určovali bezrozměrnou střední teplotu

$$\bar{T}^* = \frac{T_{\text{sat}} - \bar{T}}{T_{\text{sat}} - T_i}, \quad (23)$$

kde \bar{T} je průměrná teplota vody získaná integrací radiálního teplotního profilu pomocí naměřených hodnot

$$\bar{T} = \frac{2}{r_2^2 - r_1^2} \int_{r_1}^{r_2} rT(r)dr, \quad (24)$$

kde r je poloměr kuželu ve vzdálenosti x od trysky.

Podle Hasson et al. (1964) je třeba pro zjednodušení uvažovat v listu kapaliny přenos tepla pouze kondukcí a zanedbat růst tloušťky kondenzátu na listu kapaliny. Hodnota bezrozměrné střední teploty se poté vypočítá pro malé hodnoty Graetzova čísla jako

$$\bar{T}^* = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{4\pi^2}{3Gz}\right) \quad (25)$$

a pro velké hodnoty Graetzova čísla jako

$$\bar{T}^* = 1 - \frac{8}{\sqrt{3\pi Gz}}. \quad (26)$$

Graetzovo číslo se pro tento případ dle Hasson et al. (1964) určí ze vztahu

$$Gz = \frac{4\delta^2 u}{ax}, \quad (27)$$

kde x je vzdálenost ve svislém směru, u je rychlost ve směru proudění a δ je tloušťka souvislého listu kapaliny, který je nepřímo úměrný poloměru r ve vzdálenosti x . Tloušťka se vypočítá jako

$$\delta = \frac{\dot{m}}{2\pi r \rho u}. \quad (28)$$

Voda vystupující z trysky však autorům vykazovala určité množství turbulencí, kterými se snažili nadále zabývat. Pro turbulence použili model od Celata et al. (1989). Jeho porovnání s naměřenými daty bude vidět na obrázcích níže.

Pro druhou oblast výzkumu Takahashiho s kolegy, tedy samotné kapičky, počítali účinnost kondenzace pomocí bezrozměrné teploty T_m^* , definované obdobně jako rovnice (23), tedy

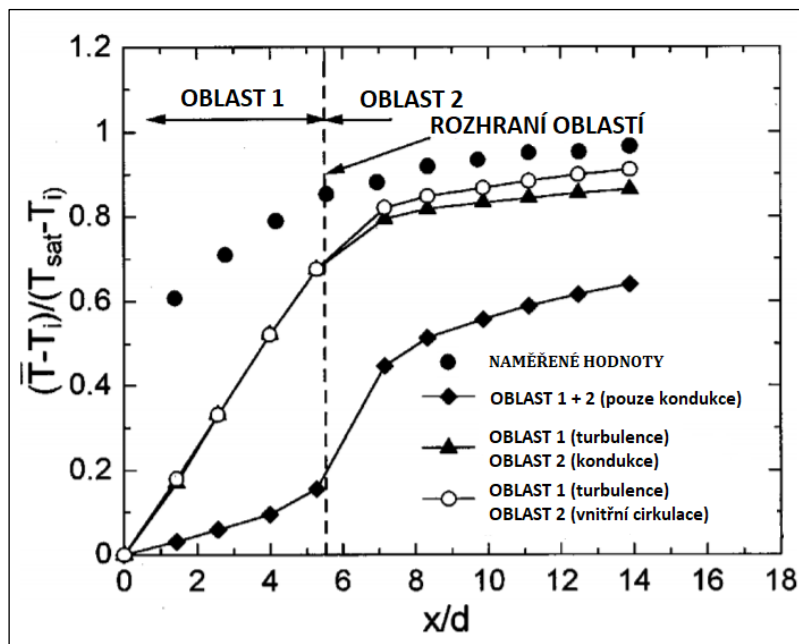
$$T_m^* = \frac{\bar{T} - T_i}{T_{\text{sat}} - T_i}, \quad (29)$$

$$T_m^* = 1 - \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp(-n^2 \pi^2 Fo), \quad (30)$$

v němž zavedli empirický korekční součinitel C

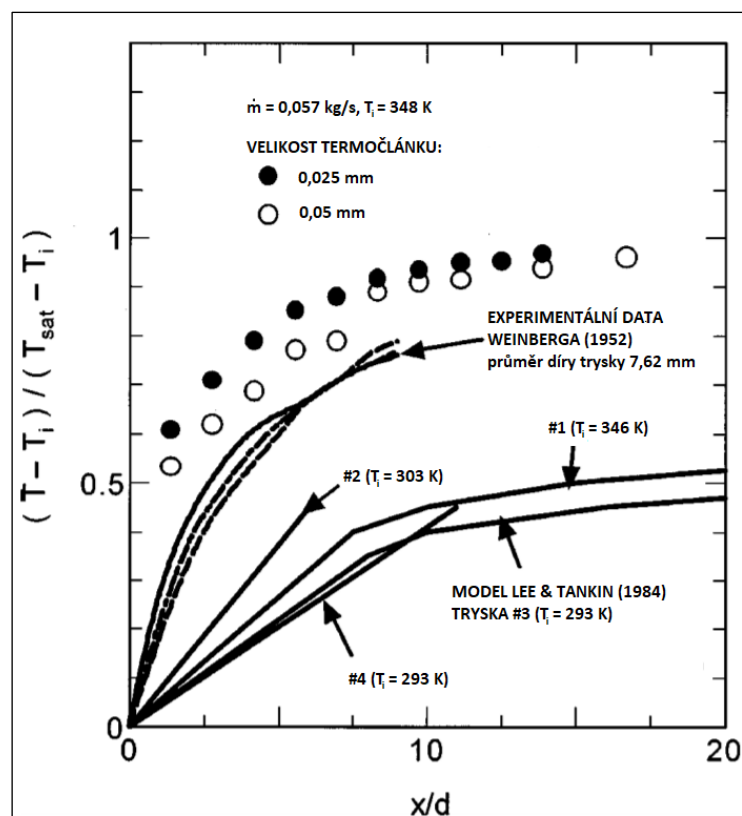
$$T_m^* = 1 - \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp(-n^2 C \pi^2 Fo). \quad (31)$$

Výsledkem experimentu bylo porovnání experimentálně naměřených hodnot s matematickými modely autorů, kteří se touto problematikou zabývali před nimi. Došli k závěru, že v případě uvažování samotné kondukce v obou oblastech jsou analytické modely nepřesné a velmi podhodnocující skutečné hodnoty. Když se ale alespoň v první oblasti, tedy listu kapaliny, uvažuje vliv turbulence, jak je psáno výše, jsou výsledky věrohodnější. Model se také přiblíží skutečnosti, když se uvažuje vliv cirkulace kapaliny uvnitř kapičky. Autoři uvádí tyto podmínky experimentu: nasycená pára o atmosférickém tlaku, hmotnostní průtok vody $0,057 \text{ kg s}^{-1}$, teplota vody na vstupu $75 \text{ }^\circ\text{C}$, průměr kapek $0,295 \text{ mm}$, rychlost kapky $8,2 \text{ m s}^{-1}$, kinematická viskozita páry $2,26 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. Výsledek je vidět na obrázku 20 jakožto závislost účinnosti kondenzace na vzdálenosti od trysky (poměr axiální vzdálenosti a průměru díry trysky).



Obrázek 20 1 - Závislost účinnosti kondenzace na vzdálenosti od trysky. Převzato z Takahashi et al. (2001). (16.11.2020)

Zároveň autoři porovnávají své měření s naměřenými hodnotami Weinberga (1952). Zde je vidět již zmiňovaný efekt použití modernějších termočlánků díky menším rozměrům a rychlejší odezvě. Použité termočlánky měly průměr 0,025 mm a 0,05 mm. Pomocí těchto termočlánků je naměřena vyšší účinnost kondenzace. K porovnání autoři přidali taktéž analytický model dvojice Lee a Tankin (1984). Výsledek je vidět na obrázku 21.



Obrázek 21 2 - Závislost účinnosti kondenzace na vzdálenosti od trysky. Převzato z Takahashi et al. (2001). (16.11.2020)

2.2 DCC na proudu kapaliny

Genić et al. (2008)

Genić et al. zkoumali přestup tepla při DCC vodní páry v patrové koloně s plnými patry, kde kapalina pouze přepadává přes okraj pater. Vycházeli z předpokladů, že pro přestup tepla uvažují pouze teplo kondenzační, zatímco teplo citelné zanedbají. Zanedbali též změnu tlaku v aparátu, jakýkoliv prostup tepla stěnou kolony a také jakýkoliv vliv nekondenzujících plynů. Bilanci tepla pro kapalinu předepsali jako

$$Lc_{p,L}dt_L + c_{p,L}t_L dL = \alpha_L(t_{\text{cond}} - t_L)dS_{LG} . \quad (32)$$

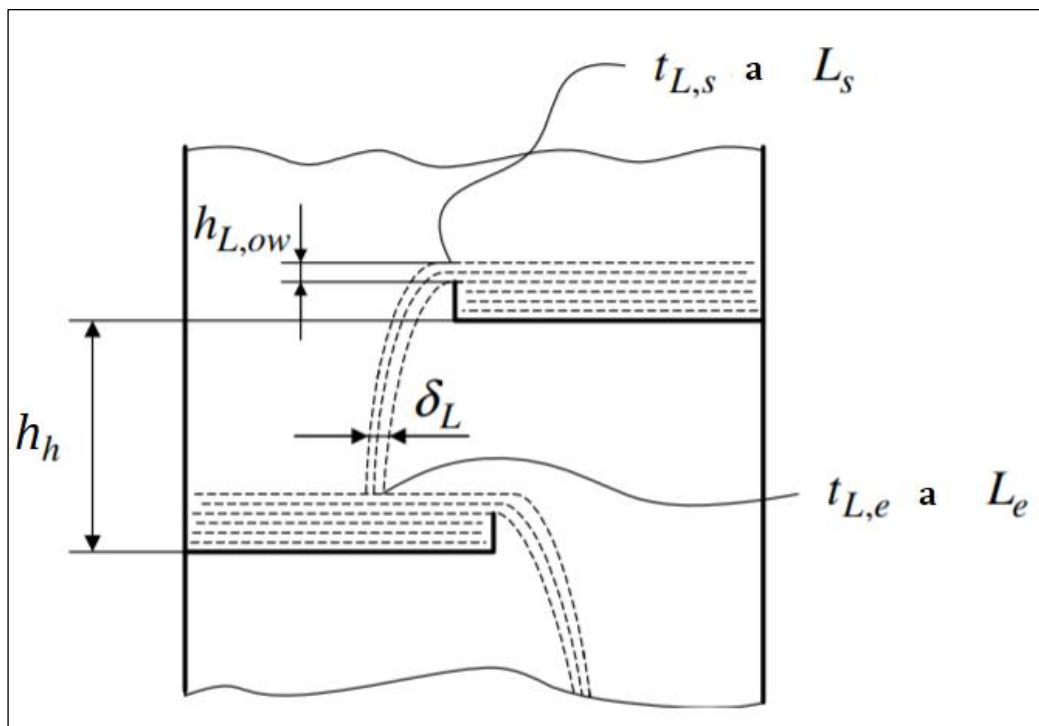
Hmotnostní průtok kapaliny se považuje za konstantní a proto $dL = 0$. Po úpravě máme vztah

$$\int_{t_{L,s}}^{t_{L,e}} \frac{dt_L}{t_{\text{cond}} - t_L} = \int_0^{S_{LG}} \frac{\alpha_L}{Lc_{p,L}} dS_{LG} . \quad (33)$$

Z inženýrského pohledu se dle autorů uvažují termofyzikální vlastnosti za konstantní a po integraci z rovnice vyplyne vztah pro tzv. *počet převodových jednotek*. Pomocí něj se může měřit intenzita přestupu tepla.

$$\ln \frac{t_{\text{cond}} - t_{L,s}}{t_{\text{cond}} - t_{L,e}} = \frac{\alpha_L S_{LG}}{Lc_{p,L}} = NTU_L . \quad (34)$$

Schéma přepadových pater lze vidět na obrázku 22.



Obrázek 22 Schéma přepadových pater. Převzato z Genić et al. (2008). (23.3.2021)

Počáteční rychlost kapaliny na přepadu $u_{L,w}$ se dle autorů vypočítá jako

$$u_{L,w} = \frac{L_S}{\rho_L W h_{L,w}}, \quad (35)$$

kde W je šířka přepadu a $h_{L,w}$ je výška hladiny kapaliny nad přepadem z patra

$$h_{L,w} = \left(\frac{3}{2} \frac{L_S}{0,63 W \rho_L \sqrt{2g}} \right)^{2/3}. \quad (36)$$

Plouštku proudu vody δ_L vyjádřili ze vztahu

$$\delta_L = \frac{L_S}{\rho_L W u_{L,av}}, \quad (37)$$

kde $u_{L,av}$ je tentokrát průměrná rychlost vody mezi patry

$$u_{L,av} = \frac{u_{L,w} + \sqrt{u_{L,w}^2 + 2gh_h}}{2}. \quad (38)$$

h_h v rovnici (38) značí vzdálenost mezi jednotlivými patry. Dále autoři ještě zadefinovali ekvivalentní průměr odpovídající proudu vody d_e

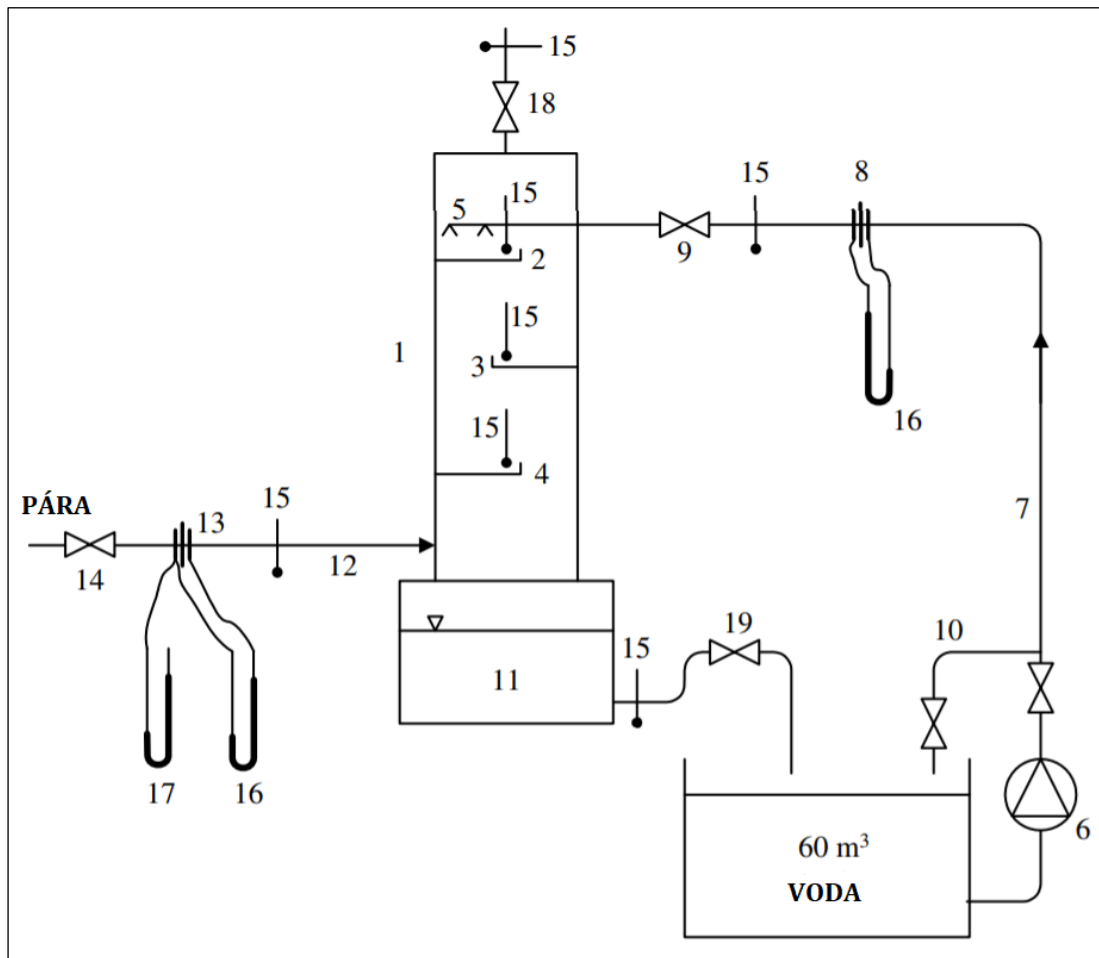
$$d_e = \frac{2W\delta_L}{W + \delta_L}. \quad (39)$$

Nutno podotknout, že průtok kapaliny musí být dostatečně velký, aby byla kapalina při přepadu z patra na patro v souvislá v celé své šířce i výšce. V opačném případě totiž pára nekondenzuje úplně a putuje k vrchu kolony, aniž by předala požadované teplo.

Experimentální zařízení je zobrazeno na obrázku 23. Kolona byla z uhlíkové oceli, její vnitřní průměr byl 309,7 mm. Uvnitř byly tři patra: vrchní (pozice 2), prostřední (pozice 3) a spodní (pozice 4). Patra byla totožná, byla vyrobena z měděného plechu tenkého 1 mm, přeпад na patrech byl ve výšce 40 mm a již zmiňovaná šířka přepadu $W = 289$ mm. Vzdálenost mezi jednotlivými patry byla 400 mm. Voda se do kolony přiváděla pomocí distribuční perforované trubky. Ve spodní části kolony byla vodní nádržka s nastavitelnou vodní hladinou pro směs vody a kondenzátu páry. Během experimentu se držela hladina této nádržky ve vzdálenosti 500 mm od spodního patra. Z kolony voda pokračovala do větší nádrže, odkud byla přečerpávána zpět do kolony. Generovaná pára byla přiváděna do kolony těsně nad její spodní nádržkou. Celá aparatura je umístěná v teplárně a je zde používána demineralizovaná voda.

Během experimentu se měřily tyto parametry:

- hmotnostní průtok vody na vstupu do kolony L_{in} ,
- hmotnostní průtok páry na vstupu do kolony G_{in} ,
- teplota vody na vstupu do kolony $t_{L,in}$,
- teplota vody na výstupu z kolony $t_{L,out}$,
- teploty $t_{L,s}$ a $t_{L,e}$ na jednotlivých patrech.



Obrázek 23 Schéma experimentálního zařízení s patrovou kolonou. Převzato z Genić et al. (2008). (23.3.2021)

Pro vyhodnocení naměřených hodnot autoři předpokládali úplné zkondenzování vodní páry, uvažovali tedy bilanci

$$L_{in} + G_{in} = L_{out} , \quad (40)$$

$$L_{in}c_{p,L}t_{L,in} + G_{in}h_G = L_{out}c_{p,L}t_{L,out} . \quad (41)$$

V předchozích rovnicích se však vyskytují dva hmotnostní průtoky vody na výstupu L_{out} . Autoři proto počítali s jejich střední hodnotou, což se později ukázalo jako velice přesný předpoklad, tedy

$$L_{out} = \frac{L_{out(40)} + L_{out(41)}}{2}. \quad (42)$$

Měření ukázala, že přestup tepla probíhal většinou hned na spodním patře. V určitém množství však probíhal také ve zbylých dvou patrech. Hrubý odhad přeneseného tepla na jednotlivých patrech autoři stanovili jako

$$\dot{Q}_{patro} \approx \frac{L_s + L_e}{2} c_{p,L} (t_{L,e} - t_{L,s}) \quad (43)$$

a hrubý odhad přeneseného tepla pro celou kolonu

$$\dot{Q}_{kolona} \approx \frac{L_{in} + L_{out}}{2} c_{p,L} (t_{L,out} - t_{L,in}). \quad (44)$$

Naměřený počet převodových jednotek se pohyboval v rozmezí $NTU_L = 0,032$ až $2,18$. Jako plochu S_{LG} , na které probíhá kondenzace, předpokládali

$$S_{LG} = 2h_h W \quad (45)$$

Hodnoty tohoto povrchu jsou pro vrchní a střední patro $S_{LG} = 0,231 \text{ m}^2$ a pro spodní patro $S_{LG} = 0,312 \text{ m}^2$. Nyní autoři mohli počítat součinitel přestupu tepla ze vztahu (34). Číselně se součinitel přestupu tepla pohyboval mezi $\alpha_L = 400 - 34800 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$. Autoři dále chtěli najít vhodnou korelaci pro naměřená data založenou na bezrozměrných číslech. Pomocí regresní analýzy sestrojili korelaci Nusseltova čísla

$$Nu = 5,8 \cdot 10^{-6} Re^{5/3} Pr^{1/3} Fr^{-2/3}, \quad (46)$$

kde Reynoldsovo číslo v rozsahu $Re = 3280$ až 34100 autoři počítali

$$Re = \frac{u_{L,av} d_e \rho_L}{\mu_L}. \quad (47)$$

Prandtlovo číslo v rozsahu $Pr = 2,43$ až $8,52$ autoři počítali

$$Pr = \frac{\mu_L c_{p,L}}{\lambda_L}. \quad (48)$$

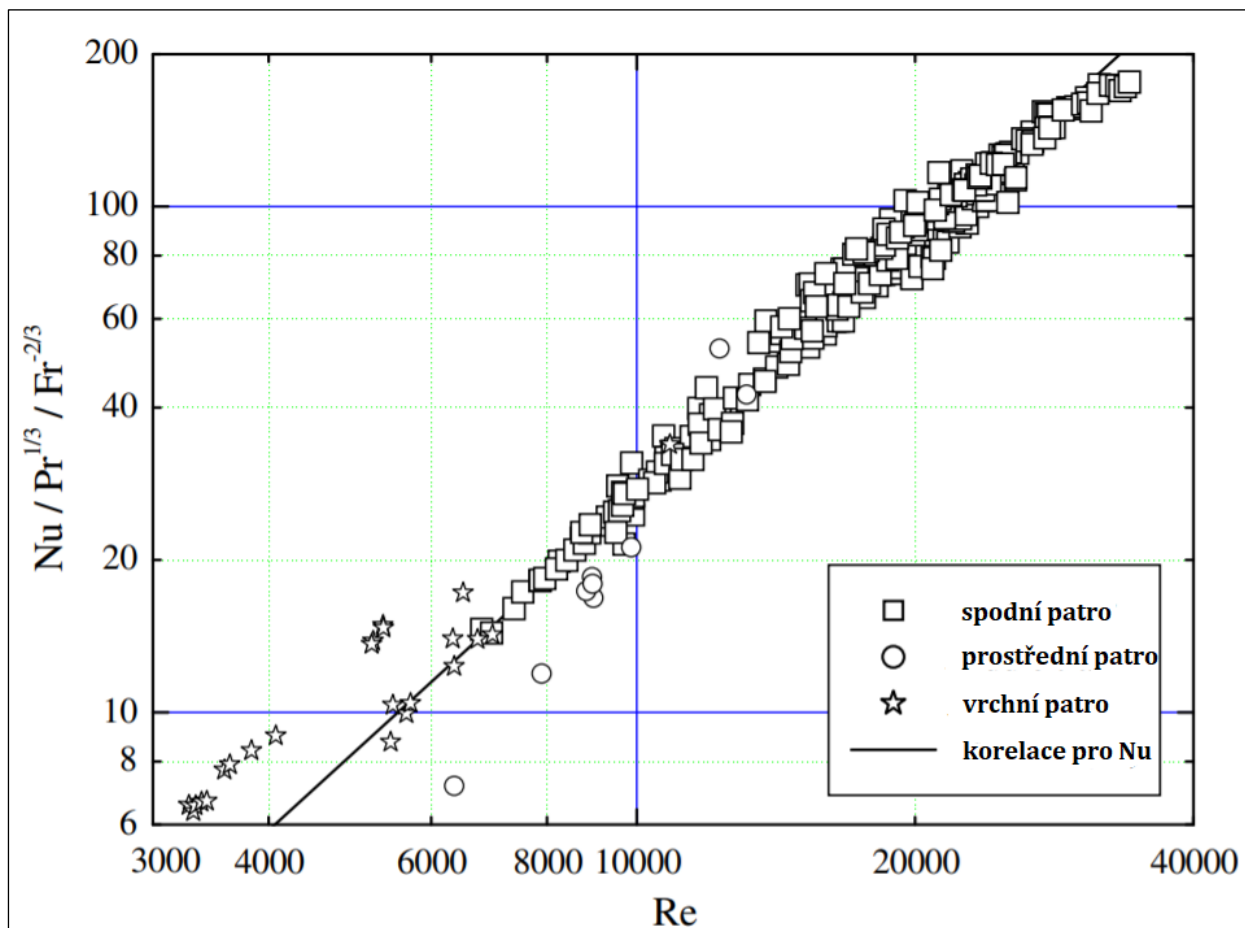
Froudeho číslo v rozsahu $Fr = 0,0237$ až $0,135$ autoři počítali

$$Fr = \frac{g d_e}{u_{L,av}^2}. \quad (49)$$

A Nusseltovo číslo v rozsahu $Nu = 55,8$ až 2000 autoři počítali

$$Nu = \frac{\alpha_L d_e}{\lambda_L}. \quad (50)$$

Na obrázku 24 je vidět porovnání naměřených hodnot s hodnotami vypočítanými pomocí korelace Nusseltova čísla. Celkem bylo pro korelaci použito dvě stě sedmdesát dva měření. Autoři považují korelaci se směrodatnou odchylkou naměřených hodnot 13,3 % jako přijatelnou pro inženýrské účely.



Obrázek 24 Porovnání naměřených hodnot s těmi vypočítanými pomocí korelace Nusseltova čísla. Převzato z Genić et al. (2008). (23.3.2021)

Ještě si dovoluji dodat, že autoři ve své práci čerпали z výzkumu Chernobilskiho et al. (1975) a porovnávali naměřená data s jejich korelací Nusseltova čísla. Výsledek ale korelaci neodpovídal.

2.3 Proublávaná DCC

de With et al. (2006)

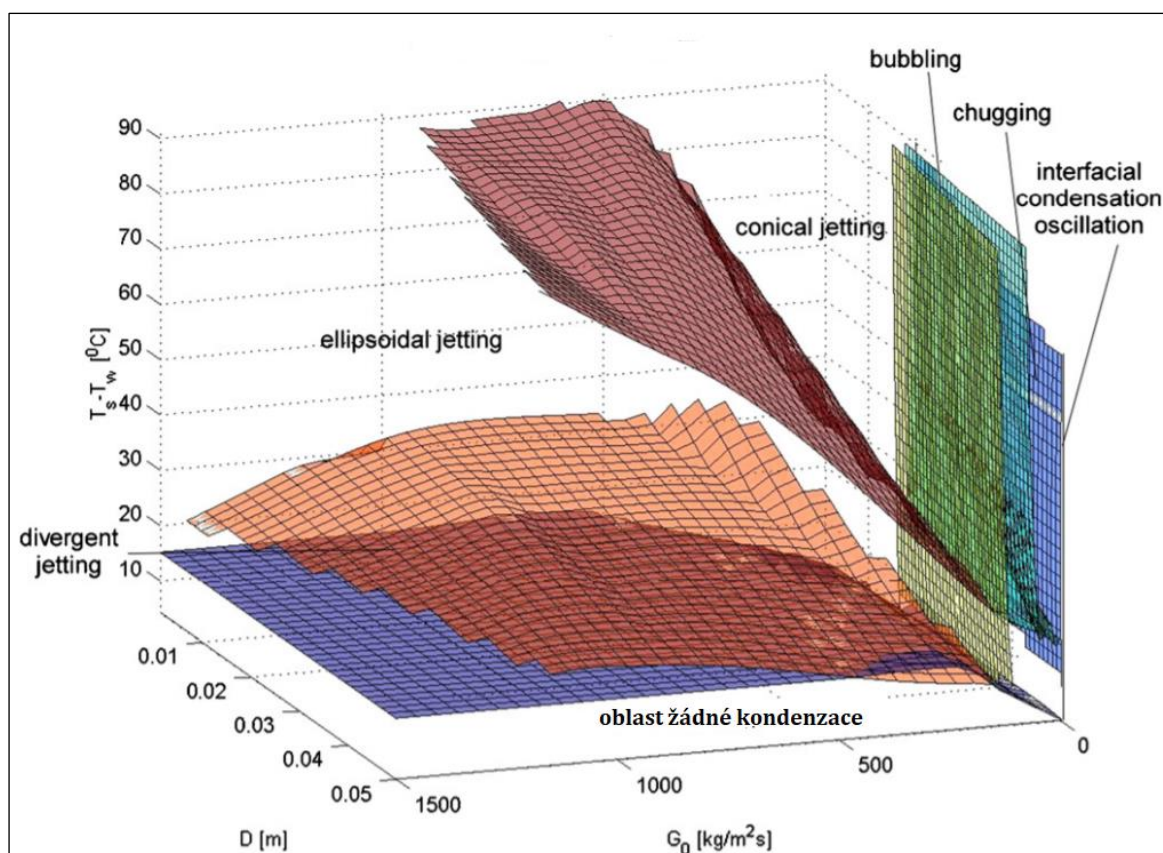
de With et al. zkoumali tři základní režimy DCC páry při jejím vstřikování do vody. První režim se nazývá *chugging*. Je charakterizován plochým či zakřiveným tvarem parního obláčku umístěného v injektoru nebo jeho okolí. Velikost obláčku se blíží velikosti injektoru. Obecně se *chugging* režim vyskytuje při nízkých průtocích páry, dle autorů do $80 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (ovšem v závislosti na teplotě kapaliny či průměru hrdla pro vstřikování páry). Během tohoto režimu je pára injektorem nasávána, protože rychlost kondenzace je vyšší než rychlost páry.

Druhý režim, tzv. *jetting*, se vyskytuje při průtoku páry nad $100 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Vznikají parní obláčky konstantní velikosti a tvaru. Autoři pozorovali v tomto režimu následující tvary obláčků: kónické (conical), elipsoidní (ellipsoidal), divergentní (divergent) a případně polokulovité (hemispherical)

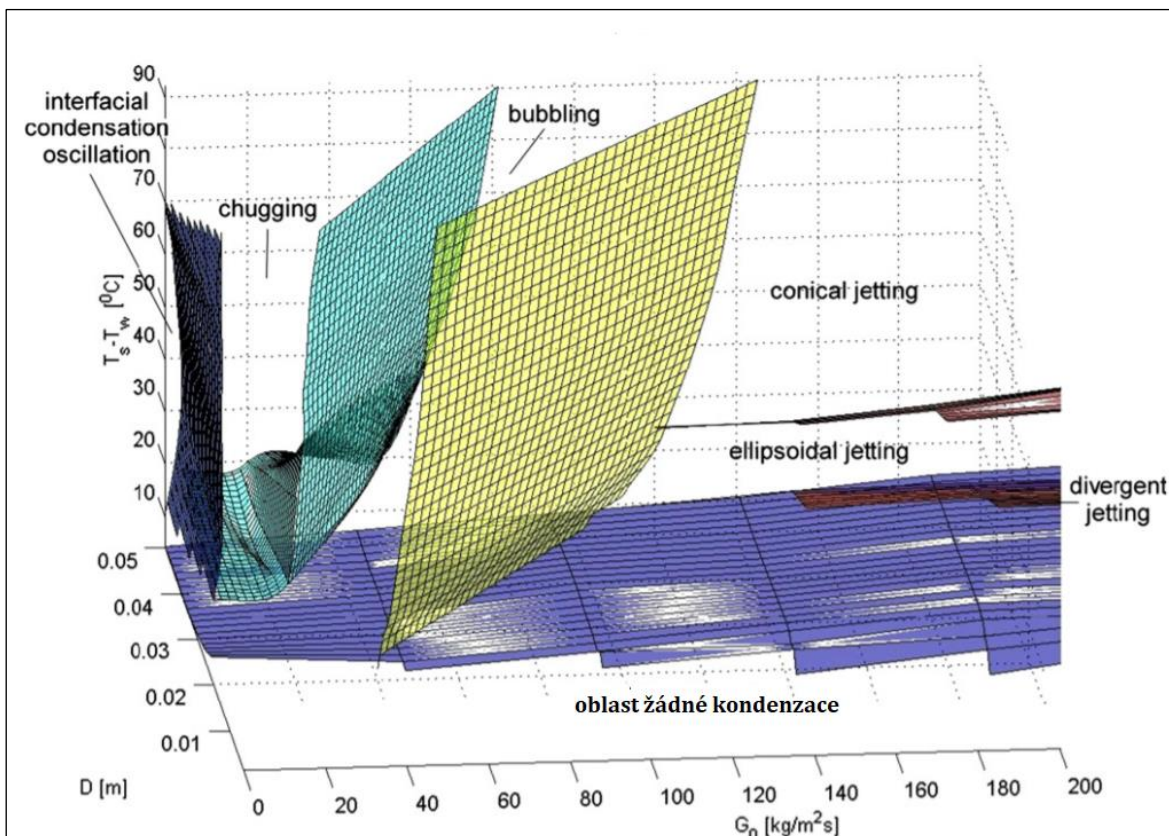
Mezi předchozími dvěma režimy se vyskytuje tzv. *bubbling*. Zde se na konci injektoru začínají tvořit pravidelné či nepravidelné bubliny páry. Bublina zde poté dále roste, než dosáhne své maximální velikosti. Následně se celá bublina nebo její část oddělí od injektoru a začne kondenzovat.

Poslední režim, kterého se docílí velice nízkým průtokem páry, dle autorů do $5 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, je tzv. *interfacial condensation oscillation*. Tento režim probíhá v injektoru pomocí pulzací.

Autoři, oproti svým předchůdcům, nebrali v potaz pouze průtok páry a teplotu kapaliny pro určení režimu DCC, ale také velikost parního injektoru. Pomocí sesbíraných experimentálních dat jiných autorů vytvořili 3D grafy těchto režimů, který je vidět na obrázku 25 pro velký průtok páry a na obrázku 26 naopak pro malý průtok páry. Oba tyto 3D grafy se zaměřují zejména na jetting režim.



Obrázek 25 3D graf režimů při probublávané DCC – velký průtok. Převzato z de with et al. (2006). (29.3.2021)



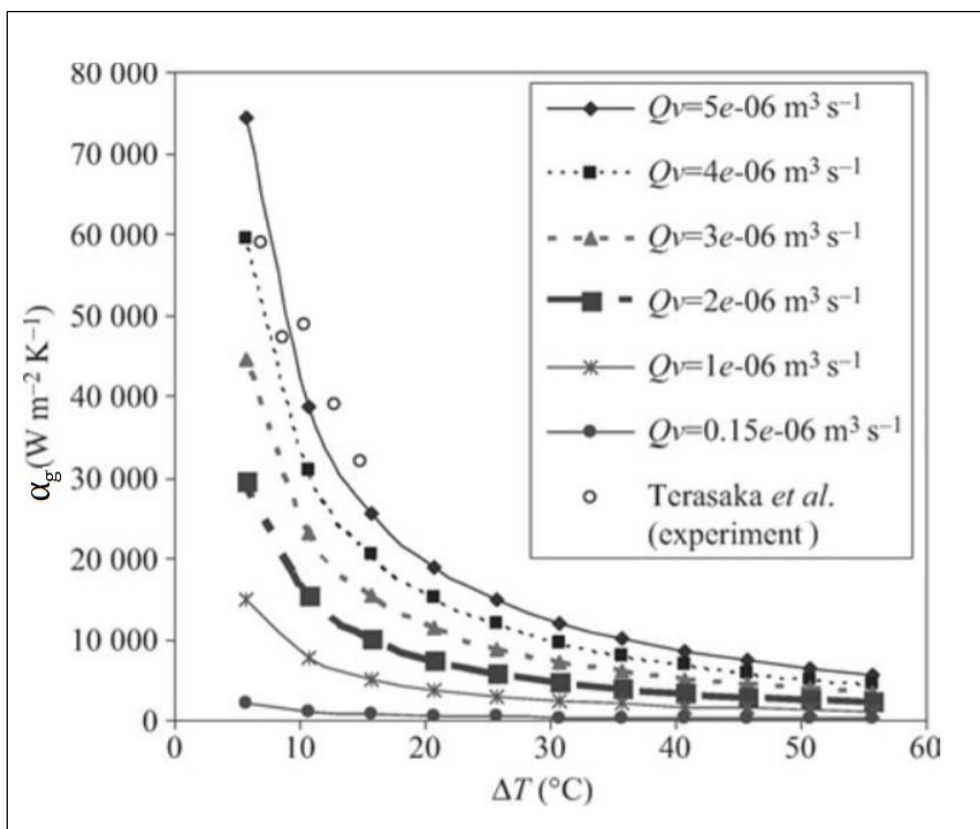
Obrázek 26 3D graf režimů při probublávané DCC – malý průtok. Převzato z de with et al. (2006). (29.3.2021)

Kar et al. (2007) a Terasaka et al. (1999)

Kar et al. (2007) navazuje na výzkum Terasaky a jeho kolegů, který se týká výpočtu součinitele přestupu tepla na straně plynu při DCC hexanu vstříkovaného do vodní nádrže. Model Terasaky et al. (1999) totiž předpovídá přesné hodnoty pouze do rozdílu teplot mezi fázemi $\Delta T < 14$ K. Kar s kolegy se tedy snažili najít přesnější model. Pro výpočet součinitele přestupu tepla na straně plynu vyšli ze vztahu

$$\alpha_g = \frac{u_c \rho_v l_{lg}}{T_v - T_c}, \quad (51)$$

kde u_c je rychlost páry na fázovém rozhraní. K jejímu určení postupně během svého výzkumu použili 5 různých jejích vyjádření. Tato vyjádření nejsou tolik podstatná, dovolím si je zde neuvádět. Nicméně odvodili nejpřesnější teoretický model, jehož výsledky můžete pro různé průtoky plynu vidět na obrázku 27.

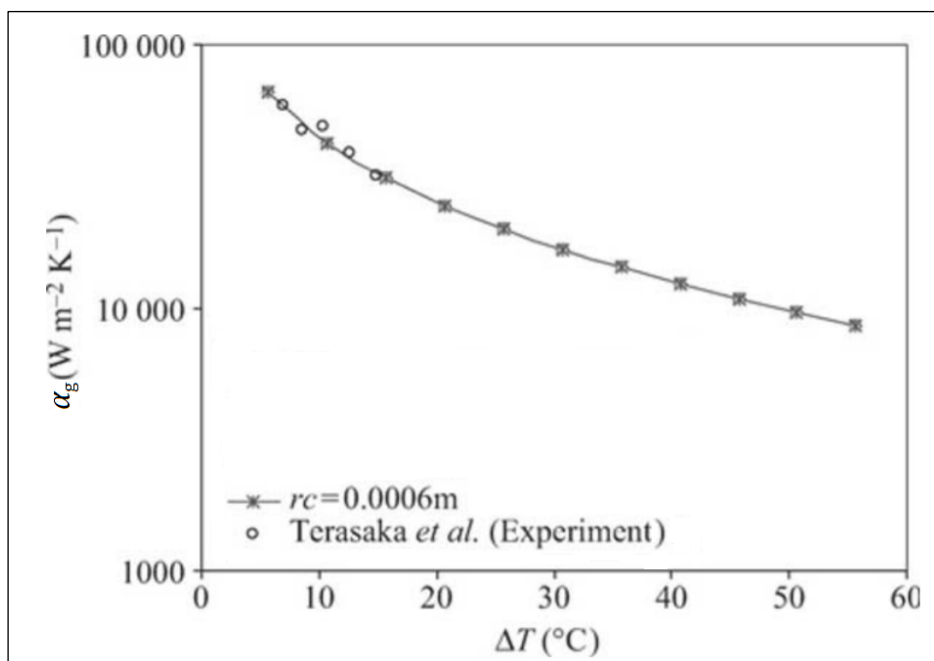


Obrázek 27 Závislost součinitele přestupu tepla na podchlazení páry pro různé objemové průtoky. Převzato z Kar et al. (2007). (30.3.2021)

Autorům se však stále nelíbila určitá odchylka od naměřených dat, proto vyvinuli semi-empirický model, jenž velice přesně předpovídá naměřené hodnoty. Vztah pro výpočet rychlosti páry na fázovém rozhraní vyjádřili následovně:

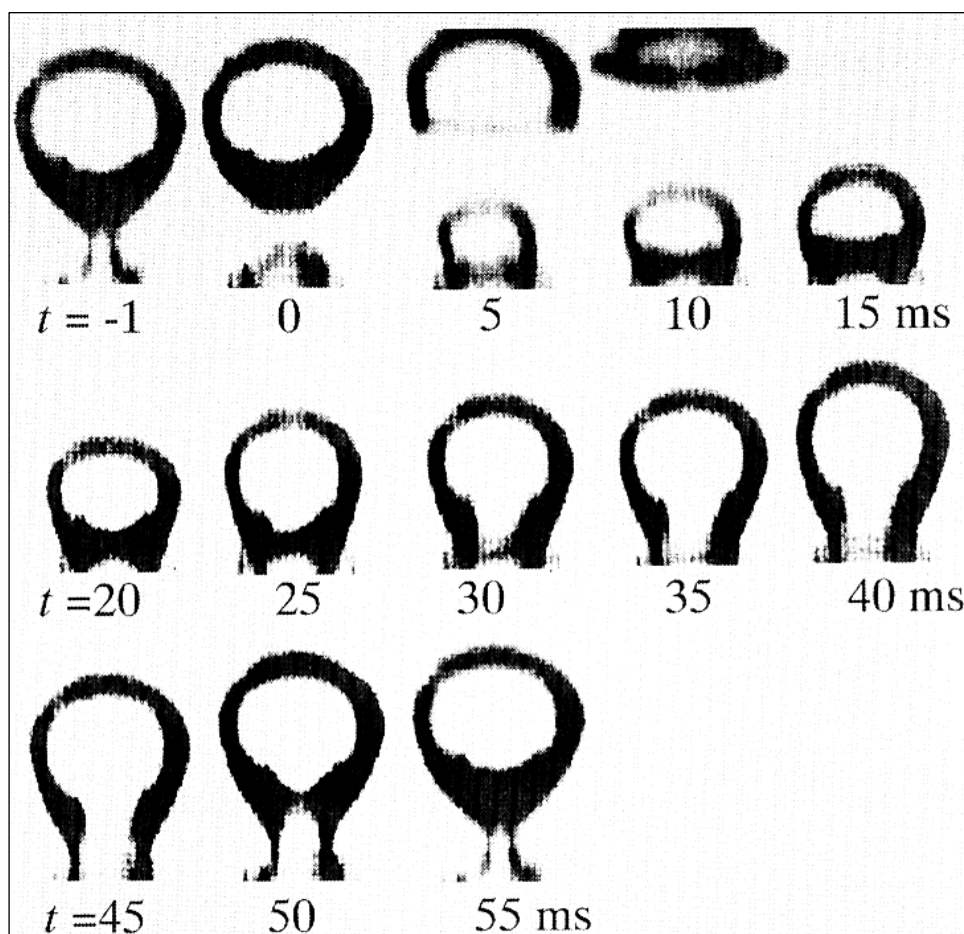
$$u_c = \frac{-2R\bar{\rho}_v}{M\rho_{v,l}u_c} \left(T_c - \frac{T_v + T_l}{2} \right) - \frac{2\mu_f}{\rho_{v,l}r_c} + \frac{\mu_f}{r_c} \left[\frac{1}{\rho_{v,l}} - \frac{1}{\rho_n} \right] - \frac{4\mu_f r_c}{\rho_n u_n r_n^2} (u_c + u_n) + u_n - 543,73(T_v - T_l)^{0,5608}, \quad (52)$$

kde R je univerzální plynová konstanta, r_c je poloměr bubliny páry, μ_f je dynamická viskozita par hexanu vztažená k teplotě na fázovém rozhraní a index n značí vlastnosti plynu v hrdlu, kterým proudí pára do napuštěné nádrže. Výsledek tohoto semi-empirického modelu pro $r_c = 0,0006$ m je vidět na obrázku 28. Dle autorů se tento model již může použít pro návrh kondenzátorů.



Obrázek 28 Závislost součinitele přestupu tepla na podchlazení páry – semi-empirický model. Převzato z Kar et al. (2007). (30.3.2021)

Terasaka et al. (1999) během experimentu pořídili fotografie tvorby a růstu bublin par hexanu ve vodě. Na obrázku 29 je můžete vidět pro $\Delta T = 7$ K a $Q_v = 3,38 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

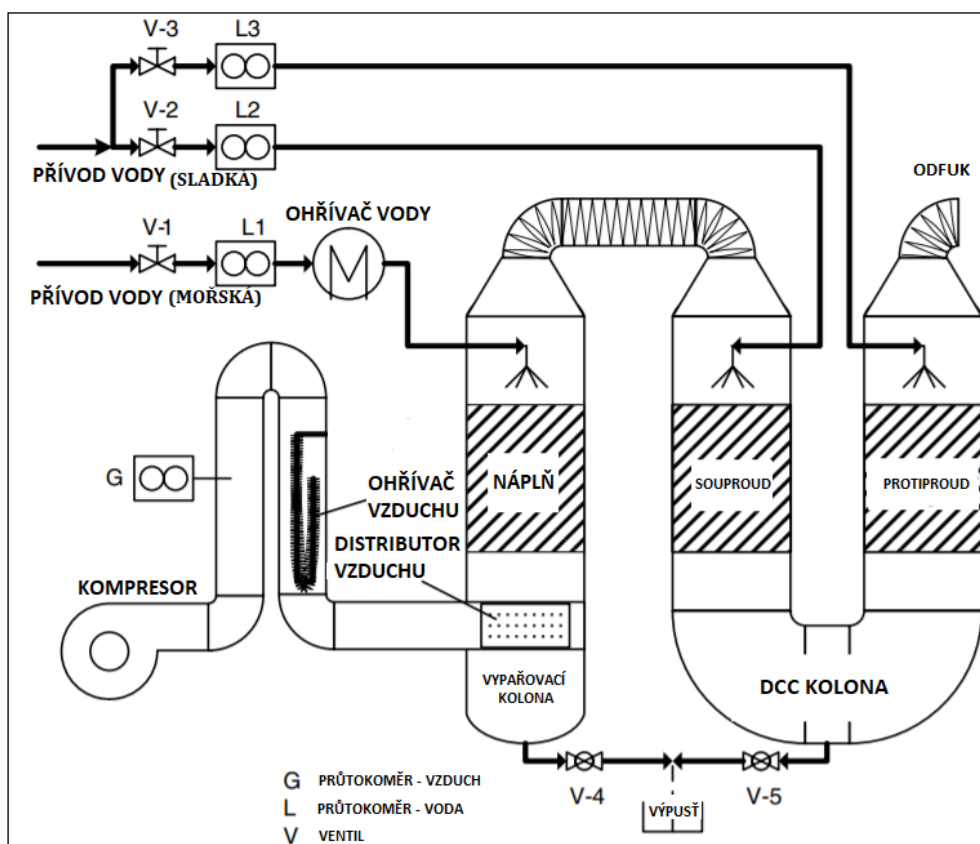


Obrázek 29 Fotografie růstu bublin par hexanu ve vodě při DCC Převzato z Terasaka et al. (1999). (30.3.2021).

2.4 DCC na filmu kapaliny

Li et al. (2006)

Li s kolegy se zabývali tímto typem DCC při destilačním odsolování mořské vody, konkrétně tzv. *diffusion driven desalination (DDD)*. Tento proces probíhá tak, že se mořskou vodou zvlhčuje proudící vzduch, načež obsažená vodní pára v tomto proudu zkondenzuje. Schéma zařízení, které Li et al. použili, je vidět na obrázku 20. Jako kondenzátor použili souproudou i protiproudou kolonu, ve kterých dochází ke styku studené vody a horkého vlhkého vzduchu. Souproudý i protiproudý režim běžel vždy separátně, aby mohly být výsledky použity k porovnání mezi nimi. Kolony byly vysoké 1,88 m a průměr měly 254 mm. Do kolon použili strukturovanou náplň HD Q-PAC od firmy Lantec o specifickém povrchu $e = 267 \text{ m}^2 \text{ m}^{-3}$, efektivním průměru částice $d_p = 0,017 \text{ m}$ a celkové výšce $h = 0,3 \text{ m}$. Pro protiproudý režim byla hustota hmotnostního toku vlhkého vzduchu $G = 0,6 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, podíl hmotnostního průtoku vody ku vzduchu \dot{m}_l/\dot{m}_a v rozmezí 0 až 2,5. Dále teplota nasyceného vzduchu na vstupu $T_{a,in}$ byla postupně 36,9 °C, 40,8 °C a 42,8 °C, vstupní teplota vody $T_{l,in}$ přibližně 20 °C. Pro souproudý režim byly tyto hodnoty velice podobné. Měřeny byly následující parametry: absolutní vlhkost vzduchu na výstupu z kondenzátoru ω_{out} , jeho teplota $T_{a,out}$ a teplota vody na výstupu $T_{l,out}$.



Obrázek 30 Schéma zařízení pro odsolování mořské vody (DDD). Převzato z Li et al. (2006). (27.12.2020)

Naměřené hodnoty byly poté porovnány s těmi predikovanými, které autoři vypočítali z rovnic (32), (33), (34). Níže uvedu vztahy pro protiproudý režim. Gradient teploty vody v kondenzátoru v případě protiproudého režimu se vypočítá jako

$$\frac{dT_1}{dz} = \frac{G}{L} \frac{d\omega}{dz} \frac{(l_{1g} - h_1)}{c_{p,l}} + \frac{\alpha e(T_1 - T_a)}{c_{p,l}L}, \quad (32)$$

kde L je hustota toku vody. Gradient teploty vzduchu v kondenzátoru počítali ze vztahu

$$\frac{dT_a}{dz} = -\frac{1}{1 + \omega} \frac{d\omega}{dz} \frac{h_1}{c_{p,g}} + \frac{\alpha e(T_1 - T_a)}{c_{p,g}G(1 + \omega)} \quad (33)$$

a gradient absolutní vlhkosti, kterou definují jako hmotnost vodní páry na hmotnost jednotky vzduchu, v kondenzátoru určili ze vztahu

$$\frac{d\omega}{dz} = \frac{dT_a}{dz} \frac{p}{p - p''(T_a)} \omega(B - 2CT_a + 3DT_a^2) \quad (34)$$

Tlak nasycených par vypočítali jako

$$p''(T_a) = A \exp(BT_a - CT_a^2 + DT_a^3), \quad (35)$$

kde za empirické konstanty dosadili $A = 0,611379$, $B = 0,0723669$, $C = 2,78793 \cdot 10^{-4}$, $D = 6,76138 \cdot 10^{-7}$ a teplotu T_a dosazovali ve stupních Celsia. Součinitel přestupu tepla pak vyjadřují s pomocí součinitelů přestupu tepla jak pro plynnou, tak kapalnou složku

$$\frac{1}{\alpha} = \frac{1}{\alpha_l} + \frac{1}{\alpha_g}. \quad (36)$$

Tyto součinitele počítali pomocí analogie mezi přestupem tepla a přestupem hmoty, tedy pro kapalnou složku

$$\frac{Nu_l}{Pr_l^{1/2}} = \frac{Sh_l}{Sc_l^{1/2}}, \quad (37)$$

z čehož vplyne

$$\alpha_l = \beta_l \left(\rho_l c_{p,l} \frac{\lambda_l}{D_l} \right)^{1/2}, \quad (38)$$

kde D_l je autodifúzní součinitel v kapalině a β_l je součinitel přestupu hmoty, který Li et al. (2006) určili z korelace z Onda et al. (1968)

$$\beta_l = 0,0051 Re_{l,w}^{2/3} Sc_l^{-1/2} (ed_p)^{0,4} \left(\frac{\mu_l g}{\rho_l} \right)^{1/3}. \quad (39)$$

Obdobně pro plynnou složku počítali součinitel přestupu tepla ze vztahu

$$\frac{\text{Nu}_g}{\text{Pr}_g^{1/3}} = \frac{\text{Sh}_g}{\text{Sc}_g^{1/3}}, \quad (40)$$

z čehož vyplýne

$$\alpha_g = \beta_g (\rho_g c_{p,g})^{1/3} \left(\frac{\lambda_g}{D_g} \right)^{2/3} \quad (41)$$

kde D_g je součinitel difúze plynu ve vzduchu. Součinitel přestupu hmoty pro plynnou složku vyjádřili autoři z korelace z Onda et al. (1968)

$$\beta_g = C \text{Re}_{g,A}^{0,7} \text{Sc}_g^{1/3} (ed_p)^{-2} e D_g, \quad (42)$$

kde konstanta C nabývá hodnoty 5,23 pro průměr náplňového tělíska $d_p \geq 0,015$ m a hodnoty 2 pro $d_p < 0,015$ m, jak uvádí Onda et al. (1968). Schmidtova a Reynoldsova čísla autoři definují jako

$$\text{Sc}_l = \frac{\mu_l}{\rho_l D_l}, \quad (43)$$

$$\text{Sc}_g = \frac{\mu_g}{\rho_g D_g}, \quad (44)$$

$$\text{Re}_{g,A} = \frac{G}{e \mu_g}, \quad (45)$$

$$\text{Re}_{l,W} = \frac{L}{e_w \mu_l}, \quad (46)$$

kde e_w je smočený specifický povrch, který Li et al. (2006) vyjádřili rovnicí

$$e_w = e \left\{ 1 - \exp \left[-2 \cdot 2 \left(\frac{\sigma_c}{\sigma_l} \right)^{3/4} \text{Re}_{l,A}^{1/2} \text{Fr}_l^{-0,05} \text{We}_l^{0,2} \right] \right\}. \quad (47)$$

Froudeho číslo pak definují jako

$$\text{Fr}_l = \frac{L^2 e}{\rho_l^2 g}, \quad (48)$$

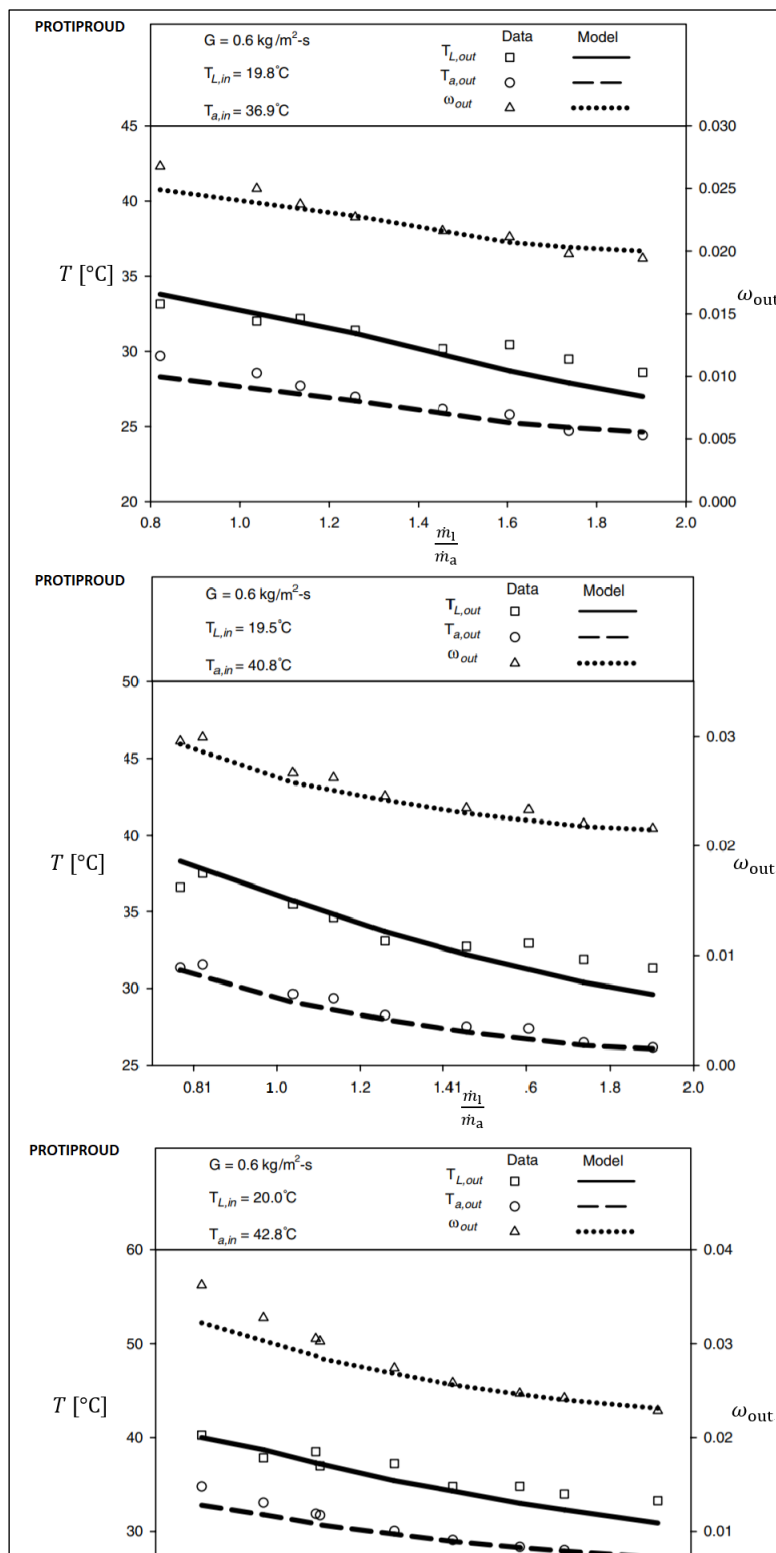
Weberovo číslo jako

$$\text{We}_l = \frac{L^2}{\rho_l \sigma_l e} \quad (49)$$

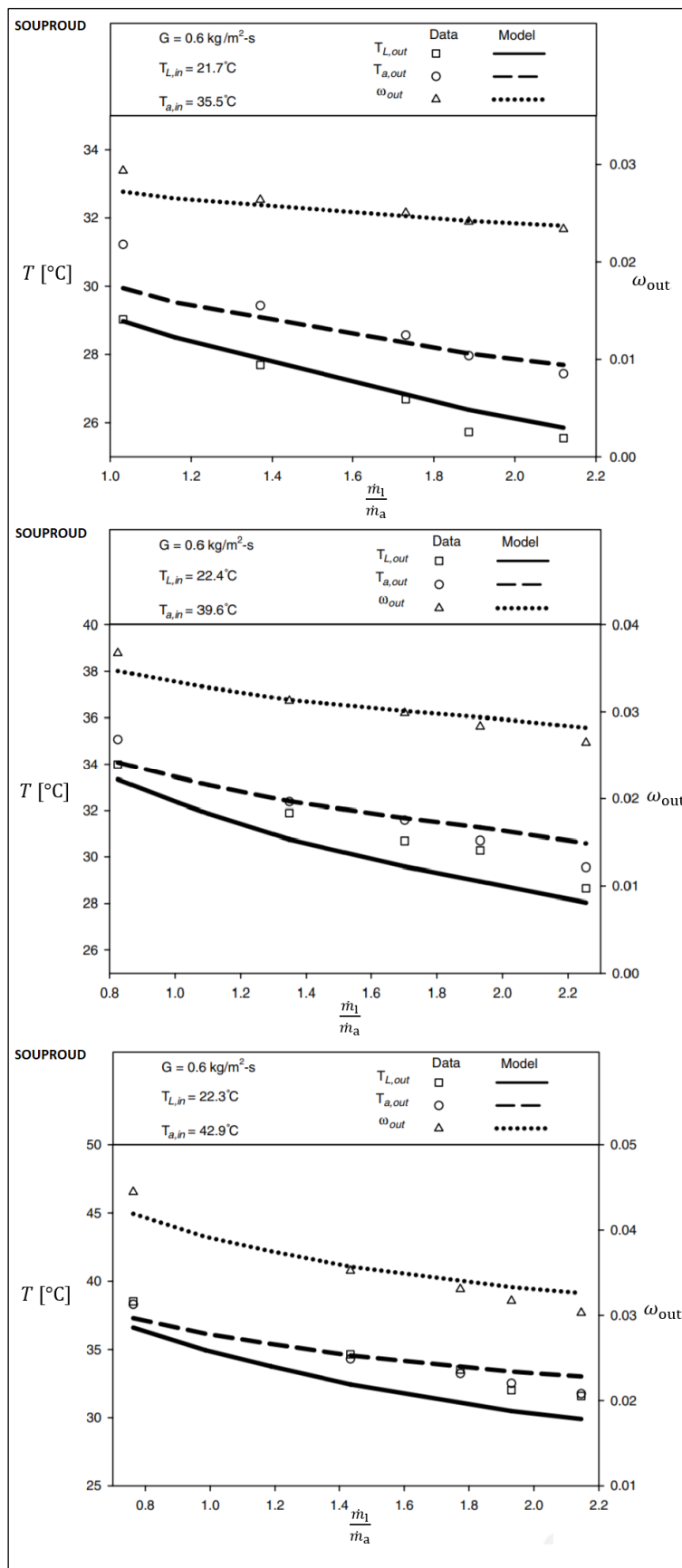
a Reynoldsovo číslo jako

$$\text{Re}_{l,A} = \frac{L}{e \mu_l}. \quad (50)$$

Porovnání naměřených a vypočítaných hodnot pro různé teploty vstupujícího vzduchu je vidět na obrázku 31 pro protiproudý režim a na obrázku 32 pro souprroudý. Souprroudý režim vykazuje horší shodu, a to zejména u vypočítaných hodnot teploty vody vystupující z kondenzátoru, avšak tato odchylka je dle autorů stále přijatelná, co se týče konstrukce kondenzátoru. Z grafů je zřejmé, že s rostoucím poměrem průtoku vody a průtoku vzduchu klesají všechny tři měřené veličiny.



Obrázek 31 Srovnání PP modelu s experimentem pro teploty vystupujícího vzduchu. Převzato z Li et al. (2006). (29.12.2020)



Obrázek 32 Srovnání SP modelu s experimentem pro teploty vystupujícího vzduchu. Převzato z Li et al. (2006). (29.12.2020)

Pro nejlepší funkci kondenzátoru je nutné, aby vystupující teplota vzduchu byla co nejnižší, a naopak vystupující teplota vody co nejvyšší. Li et al. (2006) zavedli účinnost kondenzace

$$\epsilon = \frac{\dot{m}_{\text{cond}}}{\dot{m}_a(\omega_{\text{in}} - \omega_{\text{sin } k})}, \quad (51)$$

kde \dot{m}_{cond} je kondenzační hmotnostní tok

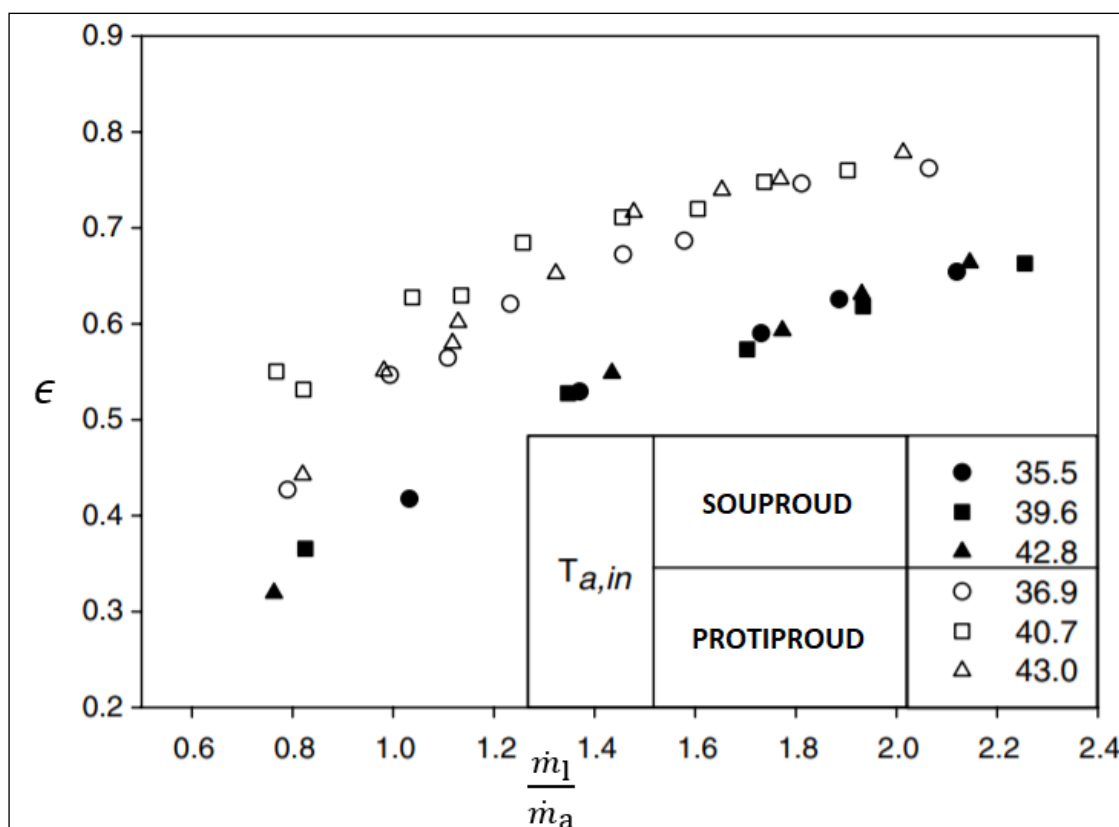
$$\dot{m}_{\text{cond}} = \dot{m}_a(\omega_{\text{in}} - \omega_{\text{out}}) \quad (52)$$

a kde $\omega_{\text{sin } k}$ je minimální možná absolutní vlhkost vzduchu vystupujícího z kondenzátoru, kterou lze určit z rovnice

$$\omega_{\text{sin } k} = \frac{0,622p''(T_{l,\text{in}})}{p - p''(T_{l,\text{in}})} \quad (53)$$

za předpokladu, že vystupující vzduch má stejnou teplotu jako vstupující voda.

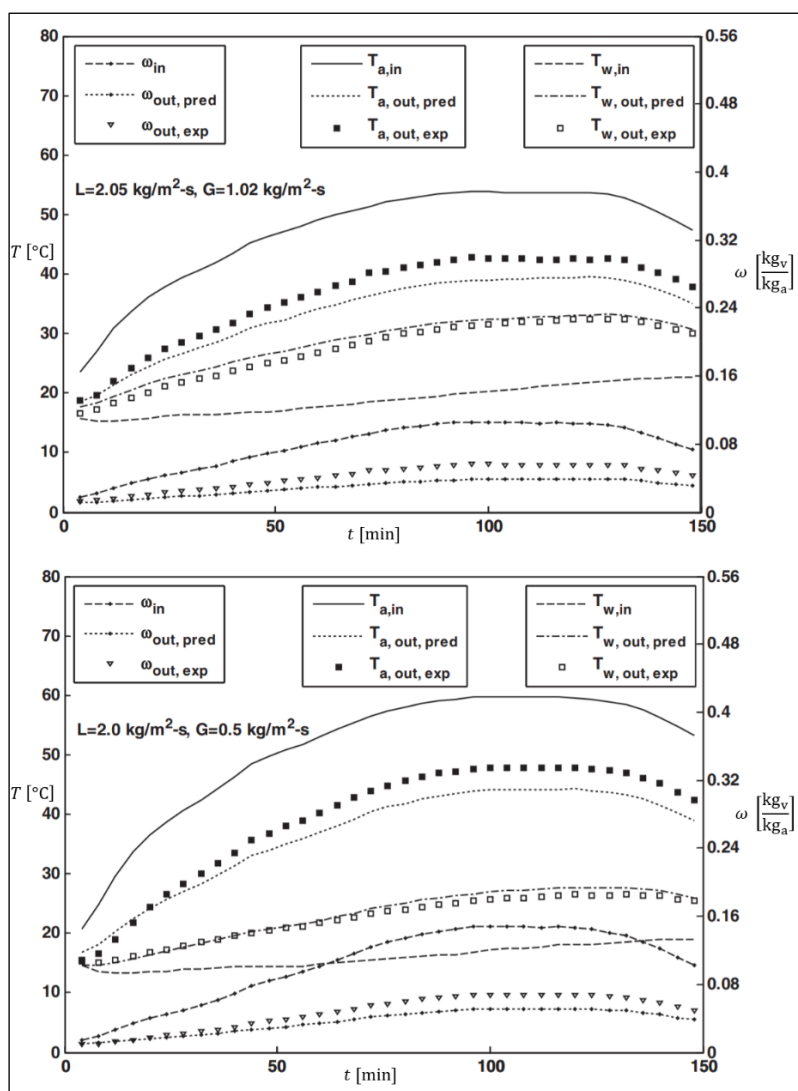
Na obrázku 33 je vidět účinnost kondenzace pro oba režimy. Na první pohled je zřejmé, že protiproudý režim je za stejných podmínek přibližně o 15 procentních bodů efektivnější než souproudý. Účinnost kondenzace je nejvíce závislá na poměru průtoku vody a průtoku vzduchu, kdežto na teplotu a vlhkost vstupujícího vzduchu citlivá příliš není. Účinnost obou režimů dosahuje prahové úrovně přibližně při $\dot{m}_l/\dot{m}_a = 2$, což autoři považují za optimální provozní poměr.



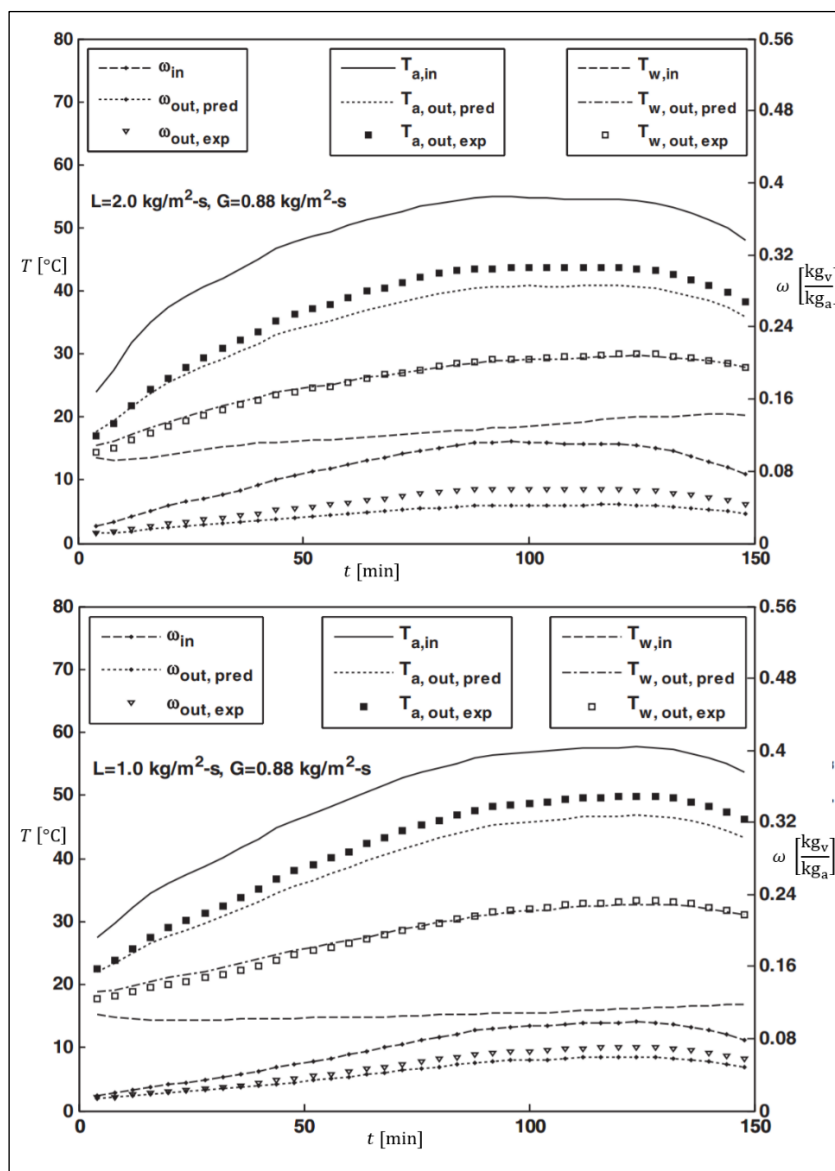
Obrázek 33 Porovnání účinnosti kondenzace pro protiproudý a souproudý režim. Převzato z Li et al. (2006). (29.12.2020)

Alnaimat et al. (2011)

Alnaimat et al. (2011) zkoumali také destilační odsolování mořské vody (DDD) na okruhu s hlavními prvky – kondenzátor a vypařovač, coby dvě náplňové kolony. Kondenzátor o průměru 241 mm byl naplněn také strukturovanou polypropylenovou náplní HD Q-PAC o celkové výšce 1 m. Co se týče kondenzace, navazovali na předešlý výzkum Li et al. (2006), akorát s tím rozdílem, že uvažovali změnu teplot vstupující vody i vzduchu v závislosti na čase. Důvodem bylo to, že např. ve skutečných procesech (DDD pomocí solární energie) tyto vstupní teploty nejsou stále stejné, ale mění se spolu s kolísavým výkonem solárních zdrojů. Výsledek jejich výzkumu je vidět na obrázcích 34 a 35, kdy porovnávali vypočtené a naměřené hodnoty vlhkosti, teploty vody a teploty vzduchu na výstupu z kondenzátoru v závislosti na době pozorování. Vypočtené hodnoty relativně spolehlivě korespondují s těmi naměřenými. Matematický model však mírně přeceňuje efekt kondenzace, protože předpovídá vyšší teplotu vystupující vody, nižší teplotu a vlhkost vystupujícího vzduchu, než je tomu ve skutečnosti.



Obrázek 34 1 - Závislost teplot médií a vlhkosti vzduchu na čase. Převzato z Alnaimat et al. (2011). (30.12.2020)

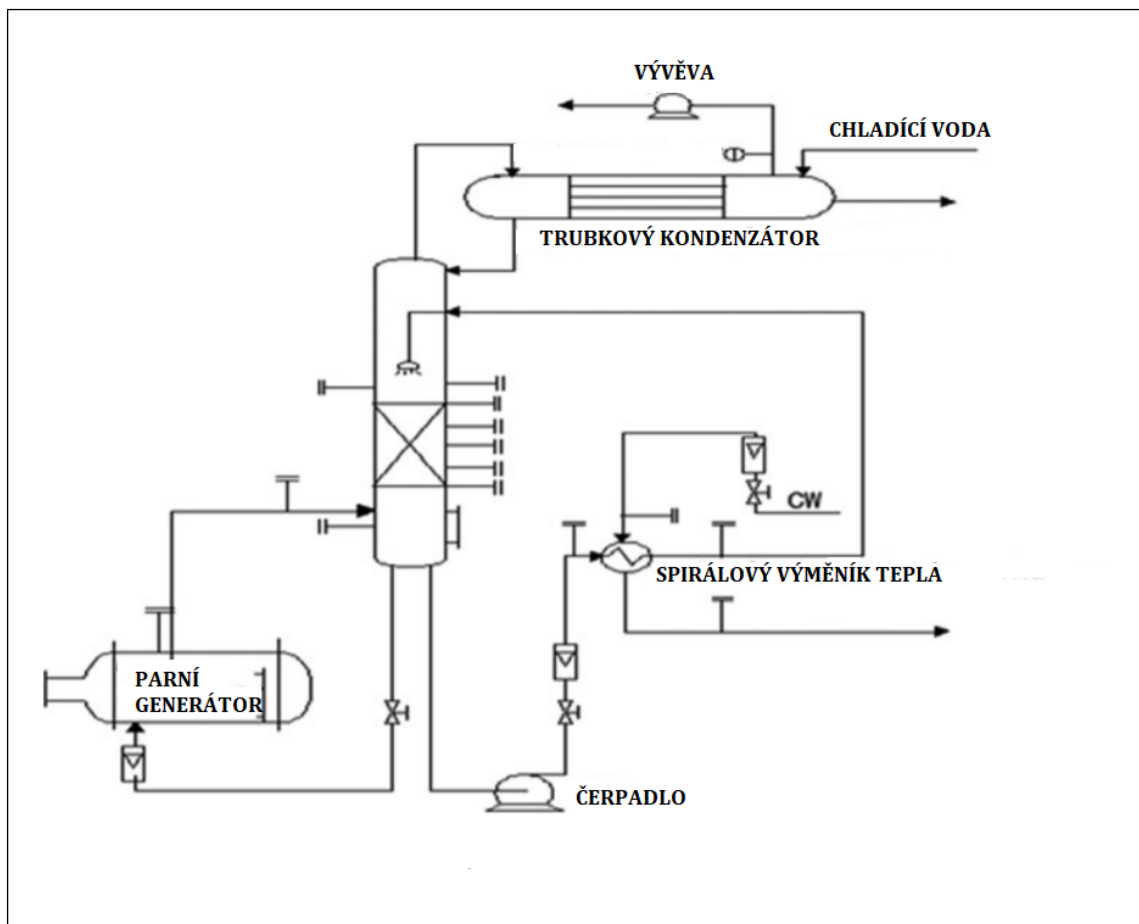


Obrázek 35 2 - Závislost teplot médií a vlhkosti vzduchu na čase. Převzato z Alnaimat et al. (2011). (30.12.2020)

Sun et al. (2014)

Autoři se zabývají údajně vůbec prvním výzkumem DCC směsí uhlovodíků v koloně se strukturovanou náplní, se kterou se můžeme hojně setkat v petrochemickém průmyslu. Výsledky jejich výzkumu by mohly být použity zejména pro simulaci a konstrukci kondenzátorů v rektifikačním procesu rafinérií.

Jako médium byla použita nafta. Schéma experimentu je zobrazeno na obrázku 36. Použili vakuový systém o tlaku 5,33 až 7,33 kPa. Samotný kondenzátor měl průměr 0,257 m, výšku 1,2 m a uvnitř byl vyplněn čtyřmi vrstvami strukturované náplně Tupac 125Y. Každá vrstva měla výšku 0,15 m. Teplota kapaliny na vstupu do kondenzátoru se pohybovala mezi 303 a 317 K, teplota generované páry mezi 403 a 412 K. Celkem bylo provedeno 194 měření.



Obrázek 36 Schéma experimentu. Převzato z Sun et al. (2014). (15.1.2021)

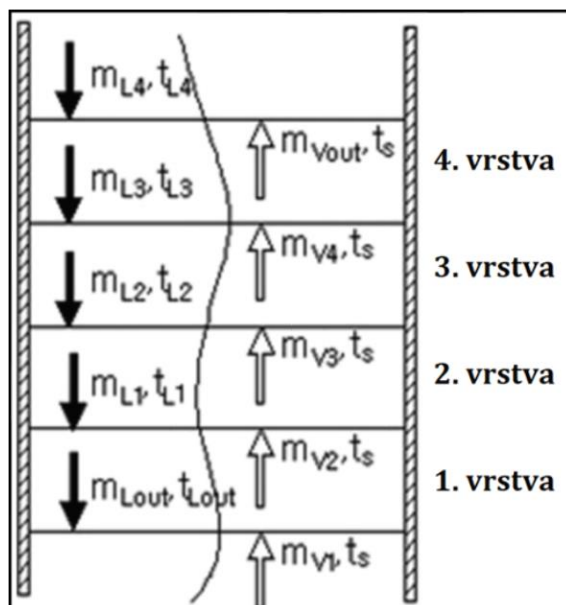
K matematickému modelu experimentu se autoři rozhodli zkoumat tepelné toky jednotlivými vrstvami. A to za předpokladů, že se zanedbá citelné teplo, čímž se pro proces uvažuje pouze teplo kondenzační a že se teplota napříč náplní uvažuje konstantní. Jak je vidět na obrázku 37, tepelné toky jednotlivých pater lze vyjádřit jako

$$\dot{Q}_1 = \dot{m}_{L1} c_{p,L} (t_{L,out} - t_{L1}) = l_{lg} (\dot{m}_{V1} - \dot{m}_{V2}), \quad (54)$$

$$\dot{Q}_2 = \dot{m}_{L2} c_{p,L} (t_{L1} - t_{L2}) = l_{lg} (\dot{m}_{V2} - \dot{m}_{V3}), \quad (55)$$

$$\dot{Q}_3 = \dot{m}_{L3} c_{p,L} (t_{L2} - t_{L3}) = l_{lg} (\dot{m}_{V3} - \dot{m}_{V4}), \quad (56)$$

$$\dot{Q}_4 = \dot{m}_{L4} c_{p,L} (t_{L3} - t_{L4}) = l_{lg} (\dot{m}_{V4} - \dot{m}_{V,out}). \quad (57)$$



Obrázek 37 Schéma přestupu tepla kolonou. Převzato z Sun et al. (2014). (15.1.2021)

Sun et al. (2014) dále vycházeli pro výpočet tepelného toku z obecného vztahu

$$\dot{Q} = UV\Delta t_{\ln} . \quad (58)$$

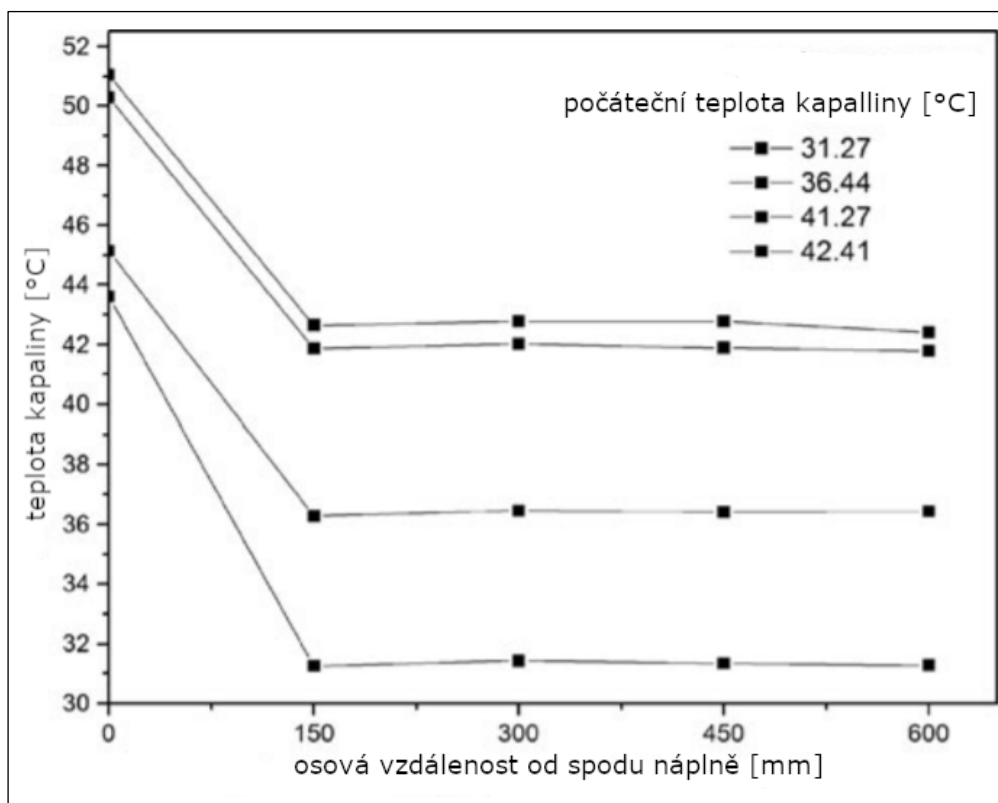
Protože z hlediska kondenzace je zdaleka nejvýznamnější první vrstva, vztahuje se k ní objemový součinitel přestupu tepla

$$U = \frac{\dot{Q}_1}{V\Delta t_{\ln}} . \quad (59)$$

Střední logaritmický teplotní spád Δt_{\ln} počítali jako

$$\Delta t_{\ln} = \frac{t_{L,out} - t_{L1}}{\ln \frac{t_S - t_{L,out}}{t_S - t_{L1}}} . \quad (60)$$

Z experimentálně naměřených dat autoři zjistili, že v první vrstvě strukturované náplně opravdu dochází k největšímu přestupu tepla. Výsledky měření teploty kapaliny v závislosti na osové vzdálenosti od spodu náplně jsou zobrazeny na obrázku 38. Teplota kapaliny ve druhé až čtvrté vrstvě se zdá být již stabilní. Toto měření koresponduje také s experimenty ostatních autorů, kteří byli pro Sun et al. (2014) inspirací.



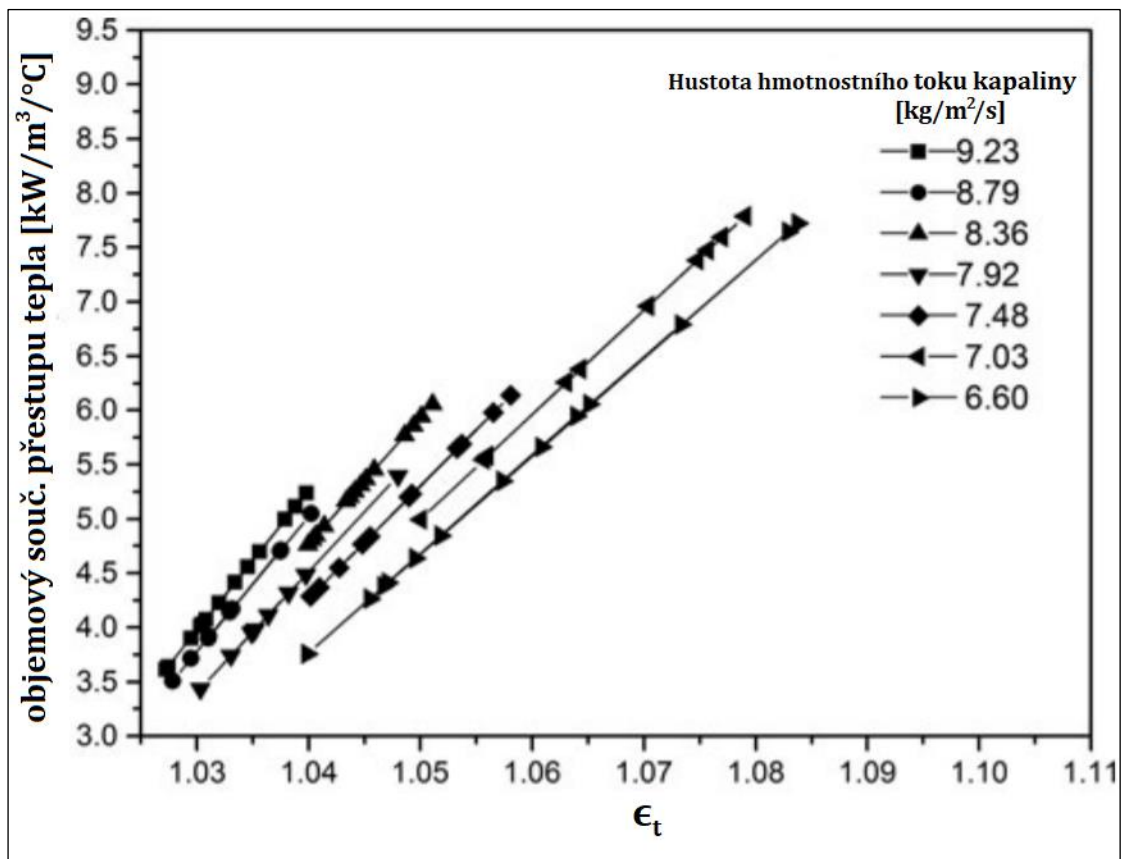
Obrázek 38 Závislost teploty kapaliny na vzdálenosti od spodu náplně. Převzato z Sun et al. (2014). (15.1.2021)

Například Li et al. (2013) měřili ten samý experiment, avšak pouze s vodou a vodní parou, pro které kondenzace probíhala výhradně pouze v první vrstvě za teplot vstupující vody 52,8 °C, respektive 65,2 °C. Kdežto za nižších teplot, řádově 30 až 40 °C, byl pozorován významný přestup tepla také ve druhé vrstvě strukturované náplně, ne pouze v první jako u experimentu od Sun et al. (2014). Nicméně z těchto měření lze vyvodit, že teplota vstupující kapaliny ovlivňuje výšku náplně kondenzátoru.

Autoři dále zdefinovali teplotní účinnost

$$\epsilon_t = \frac{t_S - t_{L,in}}{t_S - t_{L,out}}, \quad (61)$$

která bere v úvahu právě počáteční teplotu kapaliny. Jak uvádí autoři, pokud je tato účinnost rovna jedné, znamená to, že se neuskutečňuje žádný přenos tepla. Vliv této účinnosti na objemový součinitel přestupu tepla je pro různé průtoky zobrazen na obrázku 39. Z měření se jeví tento vliv jako lineární.



Obrázek 39 Závislost objemového součinitele přestupu tepla na účinnosti kondenzace. Převzato z Sun et al. (2014). (15.1.2021)

Výsledkem experimentu Suna a kolegů byla korelace pro objemový součinitel přestupu tepla

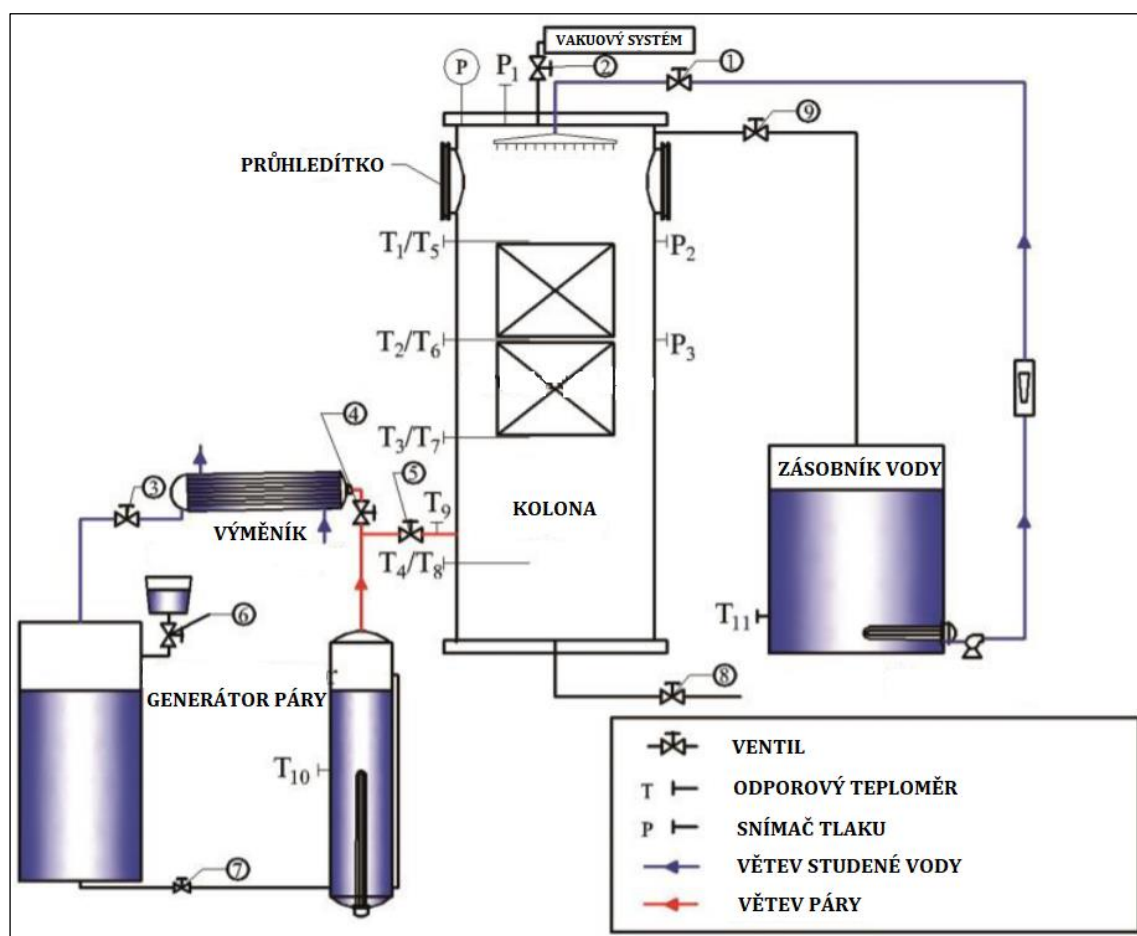
$$U = 13,25L^{1,01}G^{-0,0067}(\epsilon_t - 1). \quad (62)$$

Je nutné podotknout, že tato korelace platí pouze pro měřenou naftu a pro zařízení popisované výše. Autory naměřené hodnoty objemového součinitele přestupu tepla dávají velice přesnou shodu s těmi predikovanými.

Ještě si dovolím poznamenat, že inspirací autorů pro zmíněnou korelaci jsou práce Jamese Rutherforda Faira a jeho kolegů, například Huang a Fair (1989), kteří zkoumali přestup hmoty a tepla v náplňových kolonách pro systém plyn – kapalina. Nutno však podotknout, že především pro přestup tepla bez fázové změny. Výsledky jejich práce jsou tedy užitečné především pro prosté směšovací ohříváče/chladiče. Na základě experimentů tito autoři předepsali korelace pro různá náplňová tělíska v systémech vzduch – voda či vzduch – olej.

Hu et al. (2017)

Další zajímavá práce je od čínských autorů, kteří analyzovali chování kondenzace páry na studené vstříkované studené vodě v koloně s kovovou strukturovanou náplní 250Y o specifickém povrchu $e = 250 \text{ m}^2 \text{ m}^{-3}$. Experiment probíhal tak, že nechali kolonu napouštět parou a když byla kolona plná, začali páru pomocí vody kondenzovat. Jedná se tedy o vsádkový, nikoliv průtočný systém. Kolona byla válcová železná nádoba o průměru 0,325 m a výšce 1,045 m. Pod sprchovací hlavicí umožňující rovnoměrnou distribuci studené vody byly umístěny dvě vrstvy náplně, každá o průměru 0,2 m a výšce 0,18 m. Kolona byla napojena na vakuový systém. Celé schéma zařízení je vidět na obrázku 40.



Obrázek 40 Schéma zařízení. Převzato z Hu et al. (2017) (22.2.2021)

Pro analýzu přenosu tepla vyšli autoři z tepelné bilance, že studená voda přijímá teplo ze stěny kolony, samotné náplně a především páry. Tepelný tok vody lze vyjádřit jako

$$\dot{Q}_l = \dot{V}_l \rho_l c_{p,l} (t_{l,out} - t_{l,in}) \quad (63)$$

a zároveň jako

$$\dot{Q}_l = UV_{ef} \Delta t_{ln} , \quad (64)$$

kde V_{ef} nazvali autoři efektivní objem přenosu tepla. Vypočítá se ze vztahu

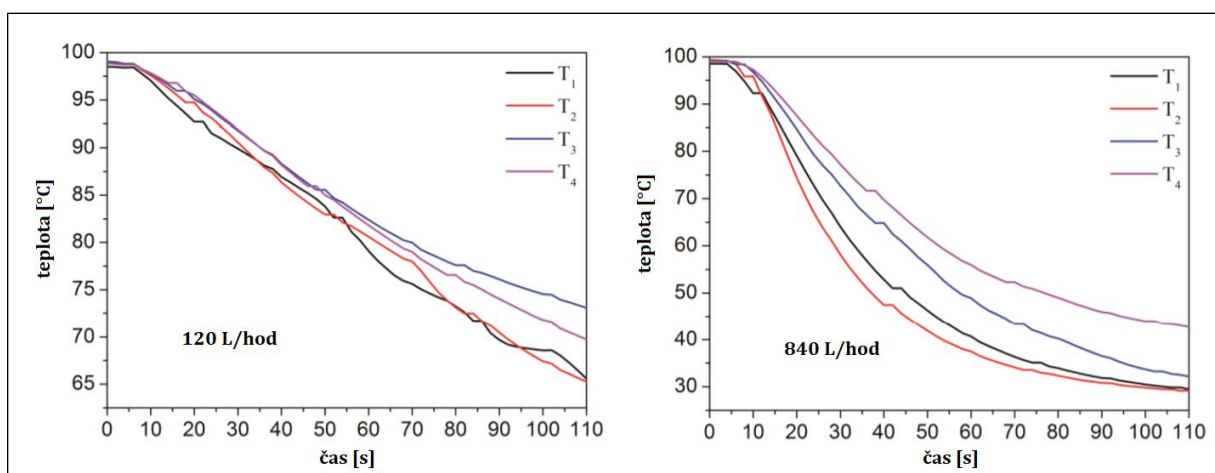
$$V_{ef} = \frac{\pi}{4} D^2 \Delta z . \quad (65)$$

D je průměr kolony a Δz je podle autorů vzdálenost výskytu většinové kondenzace, která začíná sprchovacím hrdlem a končí čtvrtým snímačem teploty, tedy 0,855 m. Střední logaritmický teplotní spád Hu s kolegy definuje jako

$$\Delta t_{ln} = \frac{(t_{g,i} - t_{l,in}) - (t_{g,o} - t_{l,out})}{\ln \frac{t_{g,i} - t_{l,in}}{t_{g,o} - t_{l,out}}}, \quad (66)$$

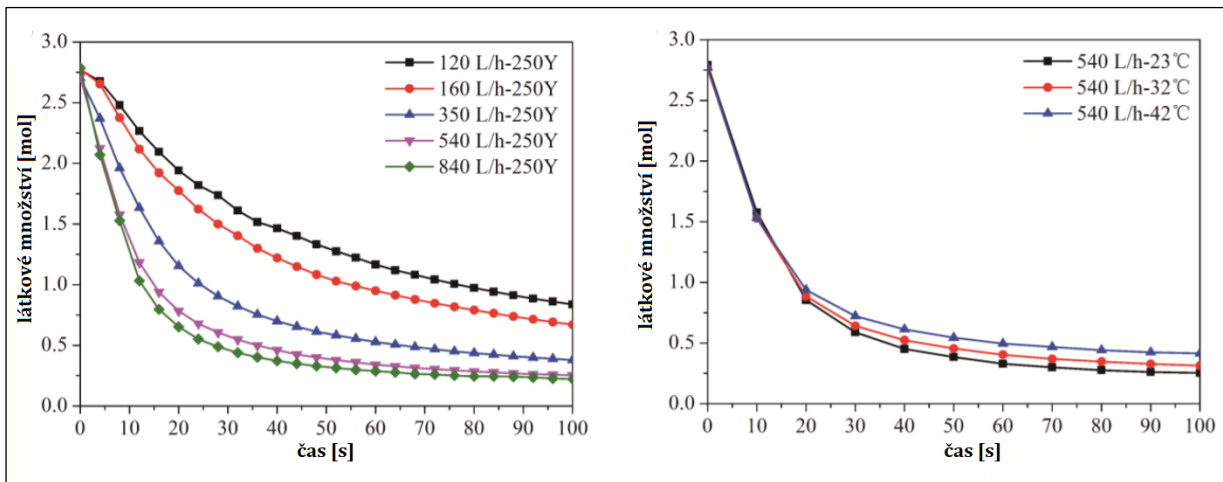
kde $t_{g,i}$ je počáteční teplota páry a $t_{g,o}$ je zase teplota páry v daném okamžiku o .

Na obrázku 41 je vidět závislost teploty uvnitř kolony na čase, kdy dochází ke kondenzaci pro dva vybrané průtoky vody. Připomeňme si, že je kolona vždy na počátku naplněna párou a ta je poté zcela zkondenzována. Z měření je zřejmé, že zvyšující průtok kapaliny významně zvyšuje účinek kondenzace.



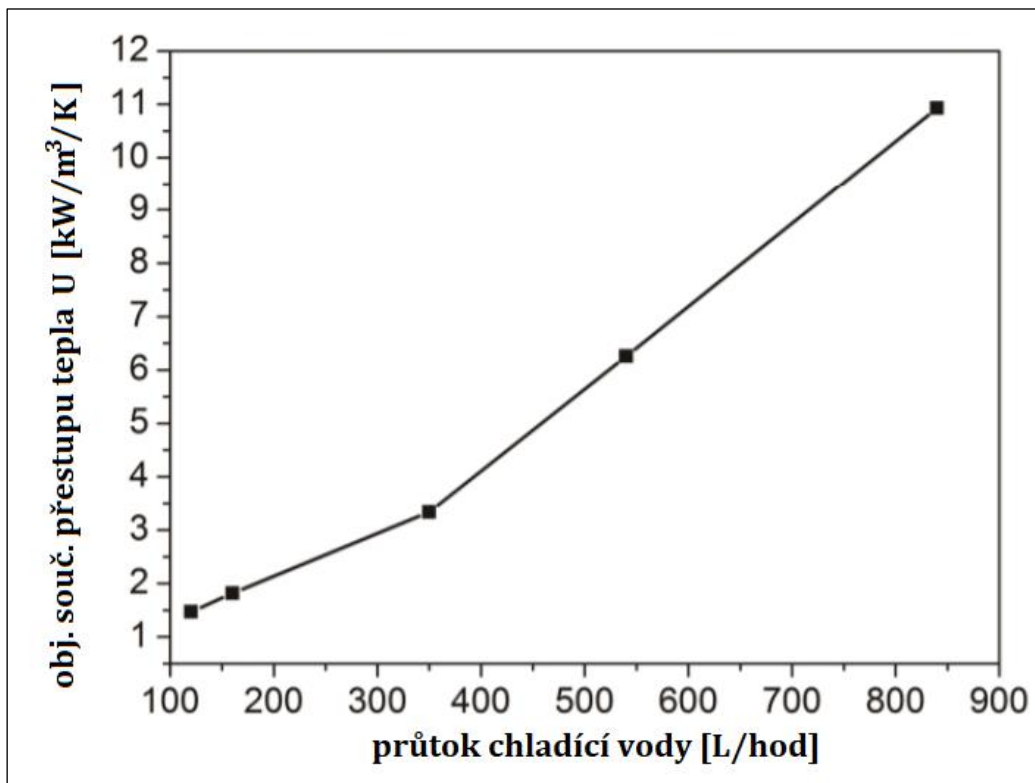
Obrázek 41 Závislost teploty v kondenzátoru na čase. Převzato z Hu et al. (2017). (22.2.2021)

Na obrázku 42 je vidět změna látkového množství páry s časem pro různé průtoky a teploty chladicí vody. Látkové množství počítali pomocí Soave – Redlich – Kwongovy stavové rovnice. Výsledky měření ukazují, že teplota sice nemá takový vliv jako průtok vody, ale kondenzaci také v určité míře ovlivňuje.



Obrázek 42 Závislost látkového množství na čase. Převzato z Hu et al. (2017). (22.2.2021)

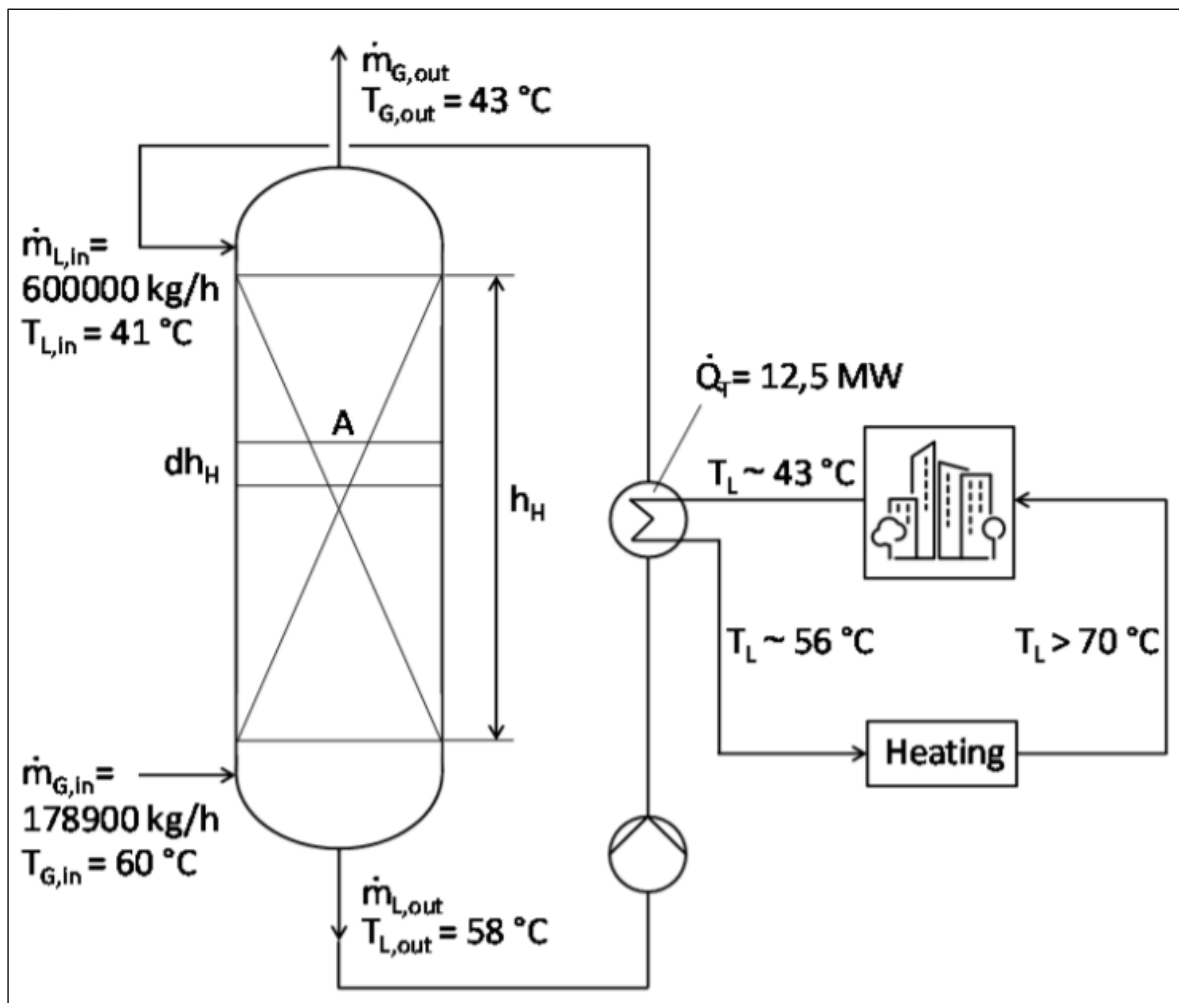
Na obrázku 43 je zobrazena závislost objemového součinitele přestupu tepla na průtoku vody. Hodnota součinitele se pro nejvyšší měřený průtok vyšplhala až na hodnotu $10,93 \text{ kW m}^{-3} \text{ K}^{-1}$.



Obrázek 43 Závislost objemového součinitele přestupu tepla na průtoku vody. Převzato z Hu et al. (2017). (22.2.2021)

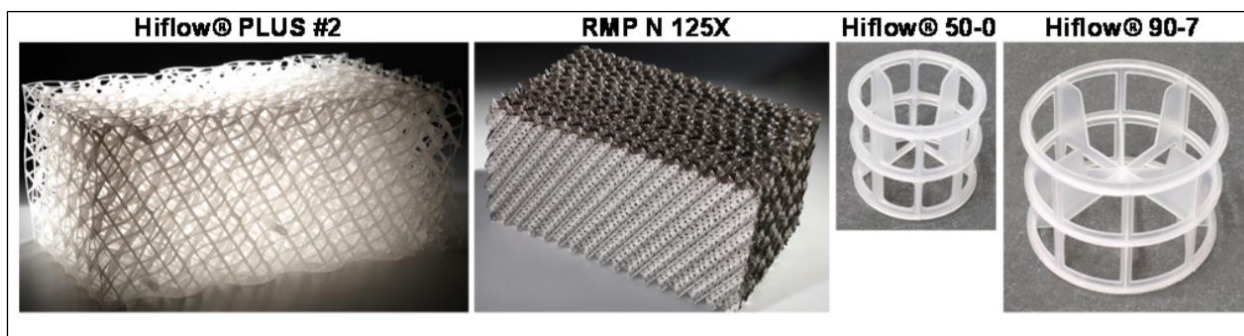
Cervera et al. (2018)

Cervera et al. (2018) použili pro svůj výzkum reálný případ z průmyslové aplikace. Nasycený proud spalin o hmotnostním průtoku 178900 kg h^{-1} a teplotě 60 °C je v náplňovém kondenzátoru zkrápěn vodou o průtoku 600000 kg h^{-1} a teplotě 41 °C . Zkondenzované spaliny ohřívají vodu a spolu putují do externího výměníku tepla, kde figurují jako zdroj tepla pro další účely. Schéma je vidět na obrázku 44.



Obrázek 44 Schéma technologie. Převzato z Cervera et al. (2018). (27.2.2021)

Předmětem jejich výzkumu byla analýza čtyř různých kondenzátorů s různými tělisky. Dva druhy tělísek byly strukturované, zatímco další dva byly volně sypané, viz obrázek 45. Princip výpočtu spočíval v tom, že nejdříve odhadli průměr kolony a na základě průměru a vstupních parametrů počítali tlakovou ztrátu pomocí programu Rapsody 3.10. Následně však pro všechny čtyři případy nastavili stejnou tlakovou ztrátu, konkrétně 10 mbar, a dopočítávali zpětně průměr kolony. Tím docílili toho, že všechny kondenzátory mají stejné provozní náklady a liší se pouze náklady investičními. Investiční náklady zahrnují cenu náplně, nádobu – kolonu a všechny její vnitřní součásti jako potrubí, rošty, podpěry, distributory kapaliny a odlučovač kapek.



Obrázek 45 Použité druhy náplně kondenzátoru během experimentu. Převzato z Cervera et al. (2018). (27.2.2021)

Výsledek výzkumu je shrnut v tabulce 2. Zjistili, že pro dosažení požadovaných vlastností se průměr kolony a objem náplně významně liší právě v závislosti na použitých tělískách. Dalo by se očekávat, že kondenzátor s tělísky o největším specifickém povrchu (RMP N 125X) by měl vyžadovat nejmenší kondenzátor, což odpovídá skutečnosti. Zároveň je však tato možnost také nejdražší, a to kvůli kovovému materiálu náplně. Dále z výzkumu vyplynulo, že kondenzátor s náplní o druhém největším specifickém povrchu (Hiflow® 50-0) vyžaduje největší kolonu. To je způsobeno výpočtem, kdy se počítal průměr kolony pro danou tlakovou ztrátu (viz výše). Průměr kolony pro tento případ vyšel zdaleka největší, a proto zde mají média nejnižší objemový průtok, což se projeví nižší intenzitou přenosu tepla, a tedy také nutností mít největší objem náplně. Z experimentu vyplynulo jako nejlepší řešení použít kondenzátor se strukturovanou polypropylenovou náplní Hiflow® PLUS#2. Tato možnost vychází nejlépe jak z pohledu investičních nákladů, tak také z pohledu možnosti instalace náplně do ležící kolony při její výrobě a následné přepravě, což u volně sypané náplně není možné, jak uvádí autoři.

Tabulka 2 Výsledek experimentu – kondenzátory dle náplně. Převzato z Cervera et al. (2018). (27.2.2021)

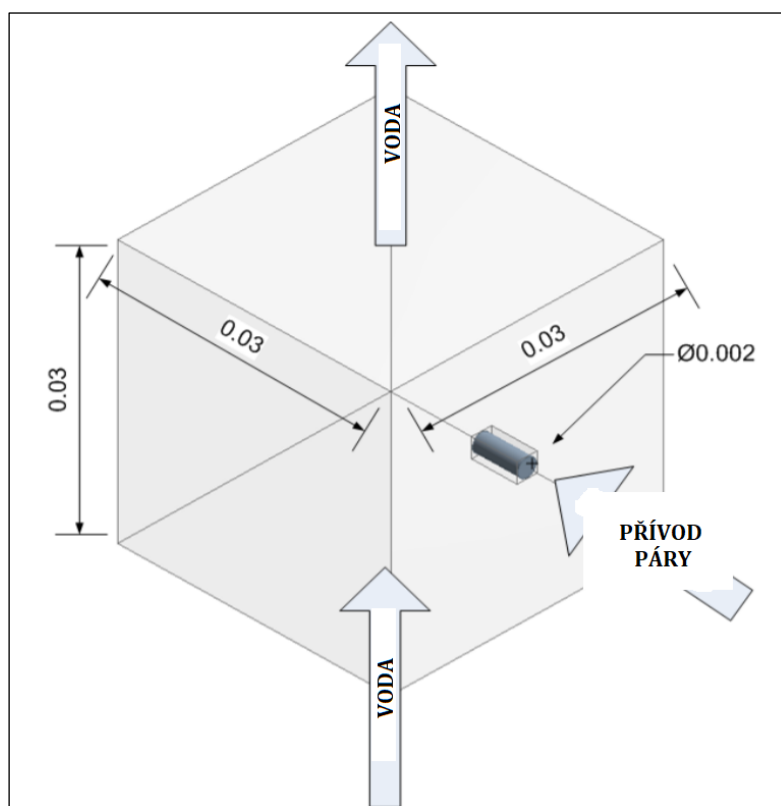
Tělíska	Specifický povrch [m ² m ⁻³]	Poróznost [%]	Materiál	Průměr kolony [m]	Objem náplně [m ³]	Hustota objemového průtoku kapaliny [m ³ m ⁻² h ⁻¹]	Relativní investiční náklady [–]
Hiflow® 50-0	110	94,7	Polypropylen	5,66	141	24,8	1
Hiflow® 90-7	76	97	Polypropylen	4,82	133	34,2	0,89
Hiflow® PLUS#2	100	95	Polypropylen	4,81	109	34,3	0,87
RMP N 125X	125	98,7	Ocel AISI 304	4,47	96	39,8	1,13

2.5 DCC zkoumaná numericky

V rámci této práce bych také chtěl okrajově ukázat vybranou numerickou studii, která se týká směšovací kondenzace.

Narayanan et al. (2018)

Narayanan et al. (2018) zkoumali kondenzaci podzvukového proudu páry ve vodě proudící křížovým tokem, schematicky je tato situace zobrazena na obrázku 46. Cílem autorů bylo vytvořit vůbec první numerickou studii DCC na proudící kapalině a porovnat výsledky s experimentálními daty, konkrétně studie Clerx et al. (2009). Jak se ve studii ukázalo, numerický model předpovídá součinitel přestupu tepla o 13 % větší, než je ten naměřený.

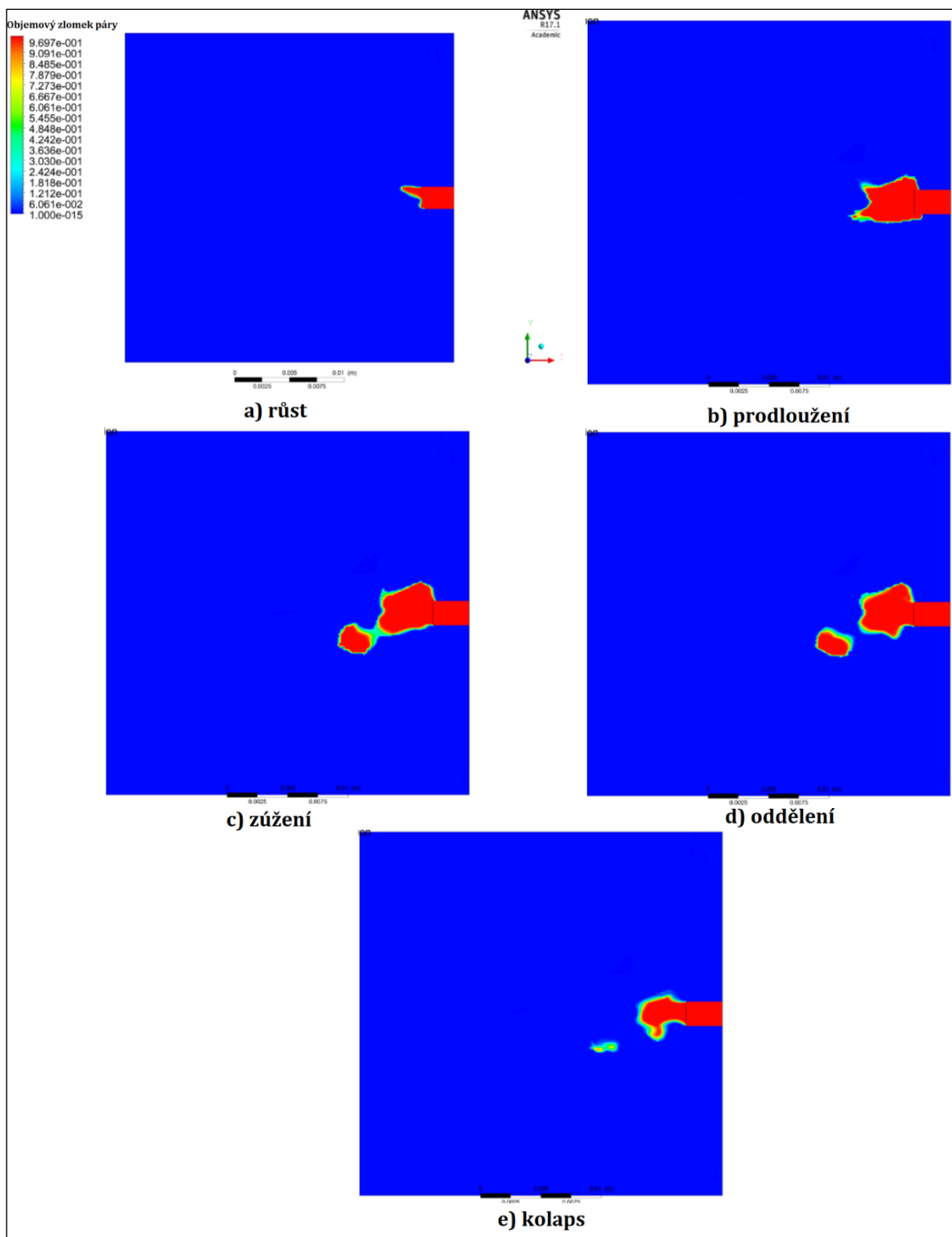


Obrázek 46 Schéma zkoumané situace. Převzato z Narayanan et al. (2018) (14.3.2021)

V této geometrii se autoři pokusili modelovat typický cyklus DCC, který se skládá z fází:

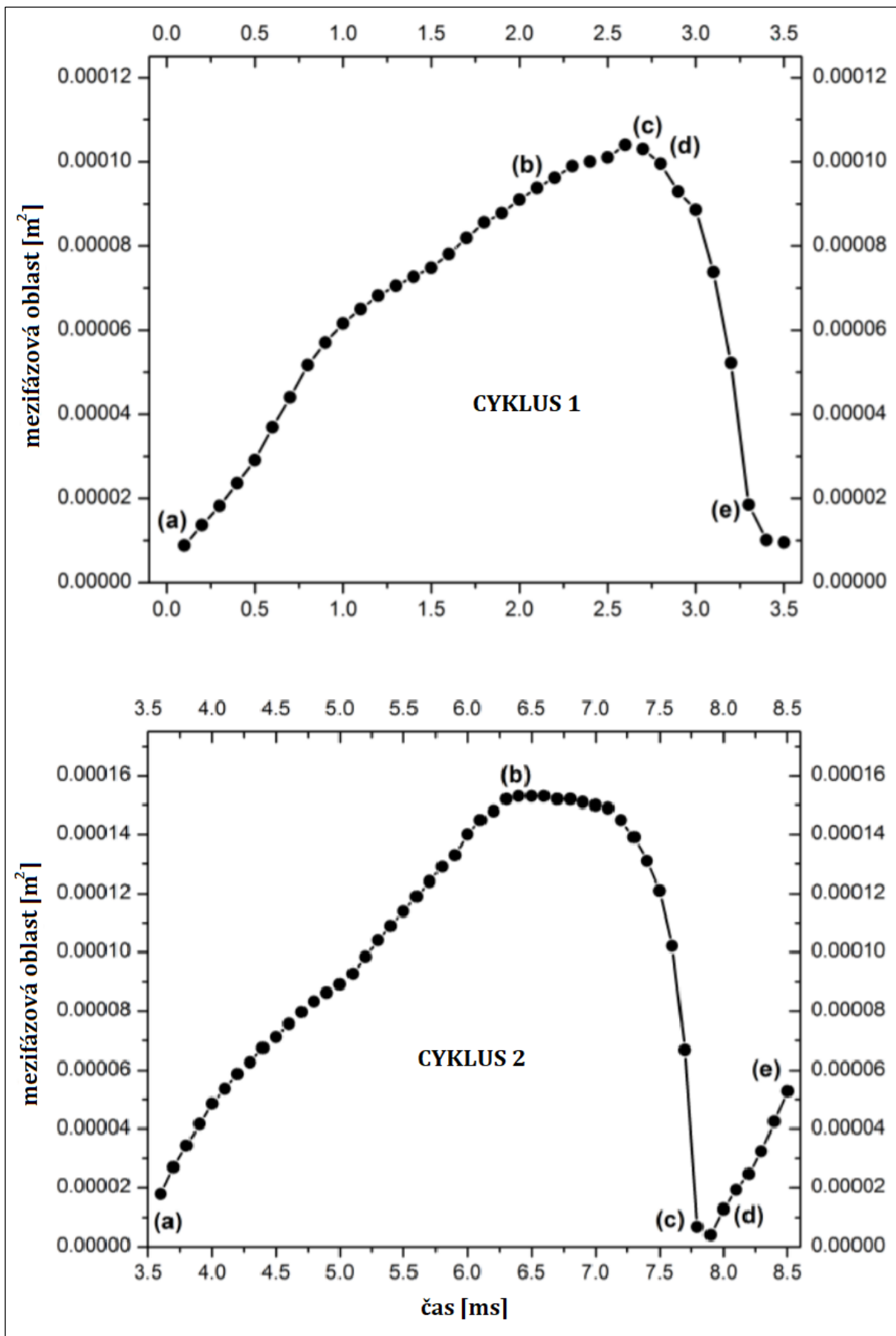
- Růst – Zde začíná parní oblak růst
- Prodloužení – Zde parní oblak dosáhne své maximální délky
- Zúžení – Zde se parní oblak zúží jak kvůli nestabilnímu proudu, tak kvůli počátku kondenzace
- Oddělení – Zde se část parního oblaku oddělí na malý obláček
- Kolaps – Zde se před chvílí oddělený parní obláček rozplyne

Tyto fáze, které jsou zobrazeny pomocí softwaru ANSYS CFX® na obrázku 47, se po sobě neustále opakují.



Obrázek 47 Fáze DCC cyklu modelované v ANSYS CFX®. Převzato z Narayanan et al. (2018). (14.3.2021)

Jak autoři uvádějí, nepravidelnost tvarů parních obláček může být způsobena turbulencí nebo nestabilní povahou kondenzace páry v daných provozních podmínkách. Na obrázku 48 jsou dále zobrazeny velikosti parních obláčků v závislosti na čase během dvou po sobě jdoucích cyklů.



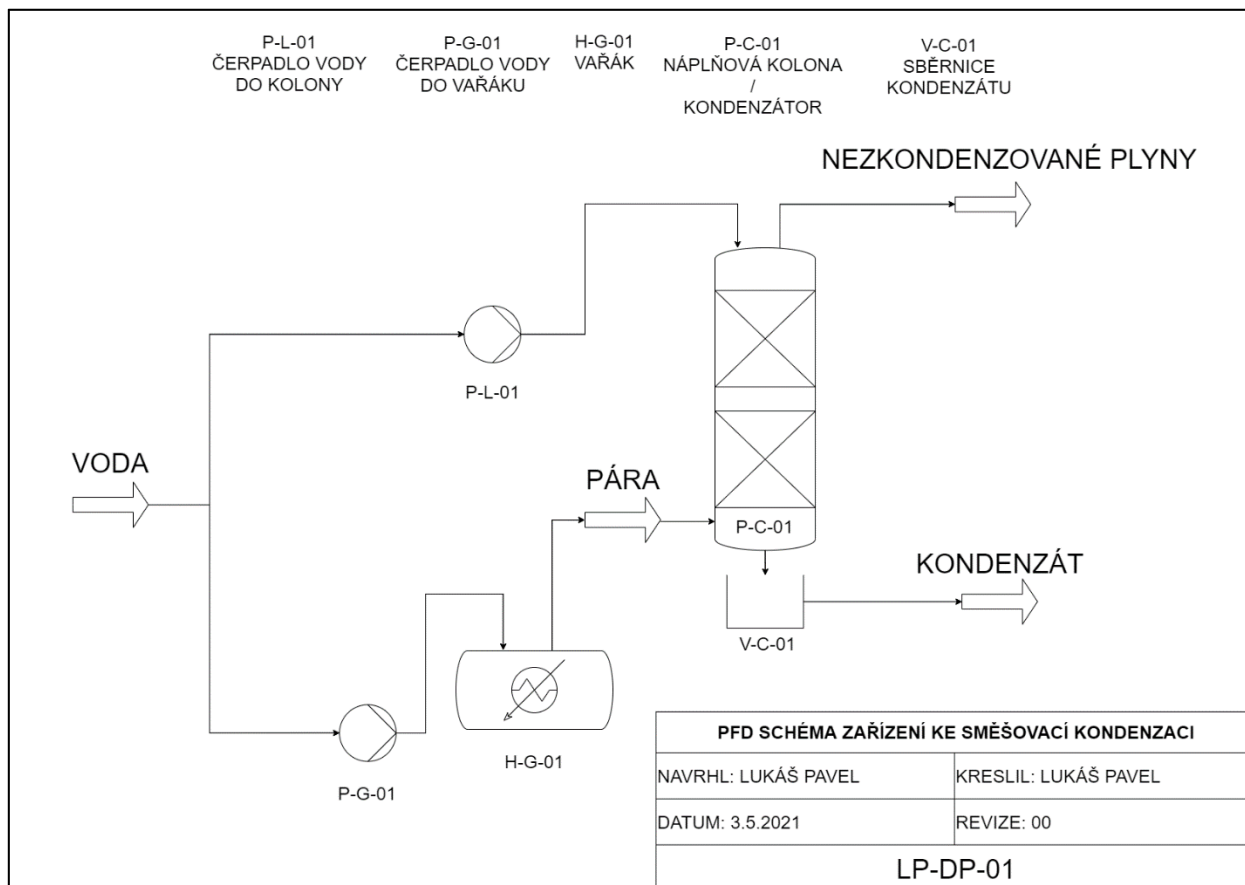
Obrázek 48 Závislost velikosti parních obláčků na čase během dvou cyklů. Převzato z Narayanan et al. (2018). (14.3.2021)

Je patrné, že ve fázi růstu a prodloužení roste mezifázová oblast v obou cyklech. Rozdíl nastává až ve fázi kolapsu, kdy ve druhém cyklu mezifázová oblast začíná narůstat oproti cyklu prvnímu. Tato rozdílnost se dle autorů přisuzuje fázi růstu dalšího, tedy třetího, cyklu. Osobně se domnívám, že tento růst na konci každého cyklu bude s přibývajícím množstvím cyklů čím dál významnější a první cyklus tedy považuji jen za jakýsi „rozběh“. Autoři dále zkoumali výchylky tlaku během jednotlivých fází a zjistili, že tlak může vzrůst během jednoho cyklu až o 350 kPa.

Jako další práce o podobné problematice, tedy numerické studii týkající se DCC proudu páry na podchlazené kapalině doporučuji například Xu et al. (2013), Clark a Brandt (2005), Simpson a Chan (1982) nebo Narayanan et al. (2020).

3 Návrh laboratorního zařízení

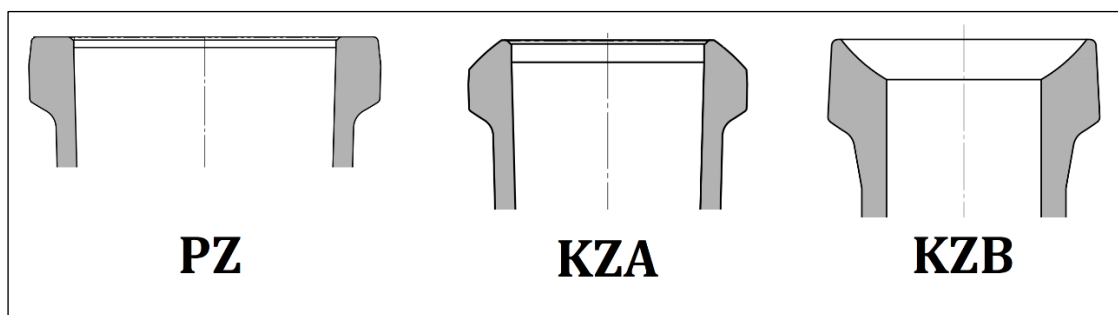
Cílem praktické části práce je návrh experimentálního zařízení, které by umožňovalo studium přenosu tepla a jevů probíhajících při kondenzaci. PFD schéma aparátu je zobrazeno na obrázku 49.



Obrázek 49 PFD experimentálního zařízení

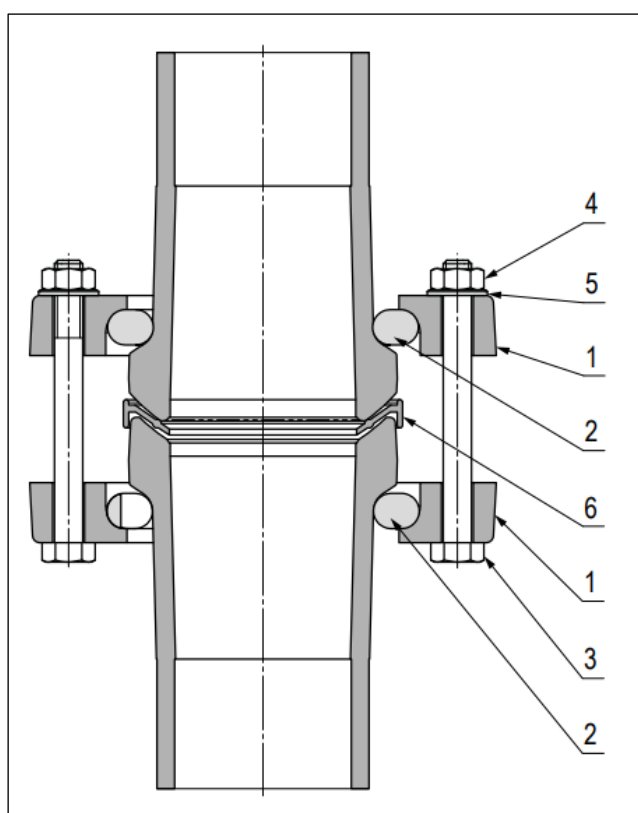
Základním prvkem zařízení je skleněný protiproudý náplňový kondenzátor o vnitřním průměru 100 mm. Jako náplň budou použity volně sypané keramické Raschigovy kroužky. Voda bude do kolony přiváděna pomocí čerpadla. Pára se bude generovat v parním generátoru.

Jedním z výrobců skleněných aparátů a jejich dílů je KAVALIERGLASS, a.s. Tento výrobce používá skleněné části buď s plochými koncovkami PZ (plochý zábrus) nebo kulovými koncovkami KZ (kulový zábrus) a to ve variantě KZA (samčí konec) nebo KZB (samičí konec). Tyto koncovky jsou pro představu zobrazeny na obrázku 50.



Obrázek 50 Vybrané koncovky skleněných částí. Převzato z https://www.kavalier.cz/download/lightproducts_downloads_cs/1528264510_cs_katalog-aparatur-2018.pdf. (3.5.2021)

Spojování skleněných částí se uskutečňuje pomocí přírub. Pro názornost je takový přírubový spoj vidět na obrázku 51.



Obrázek 51 Přírubové spojení skleněných částí s koncovkami KZA/KZB. Převzato z https://www.kavalier.cz/download/lightproducts_downloads_cs/1528264510_cs_katalog-aparatur-2018.pdf. (4.5.2021)

- 1) Příruba
- 2) Podložný segment
- 3) Šroub
- 4) Matice
- 5) Podložka
- 6) Těsnění

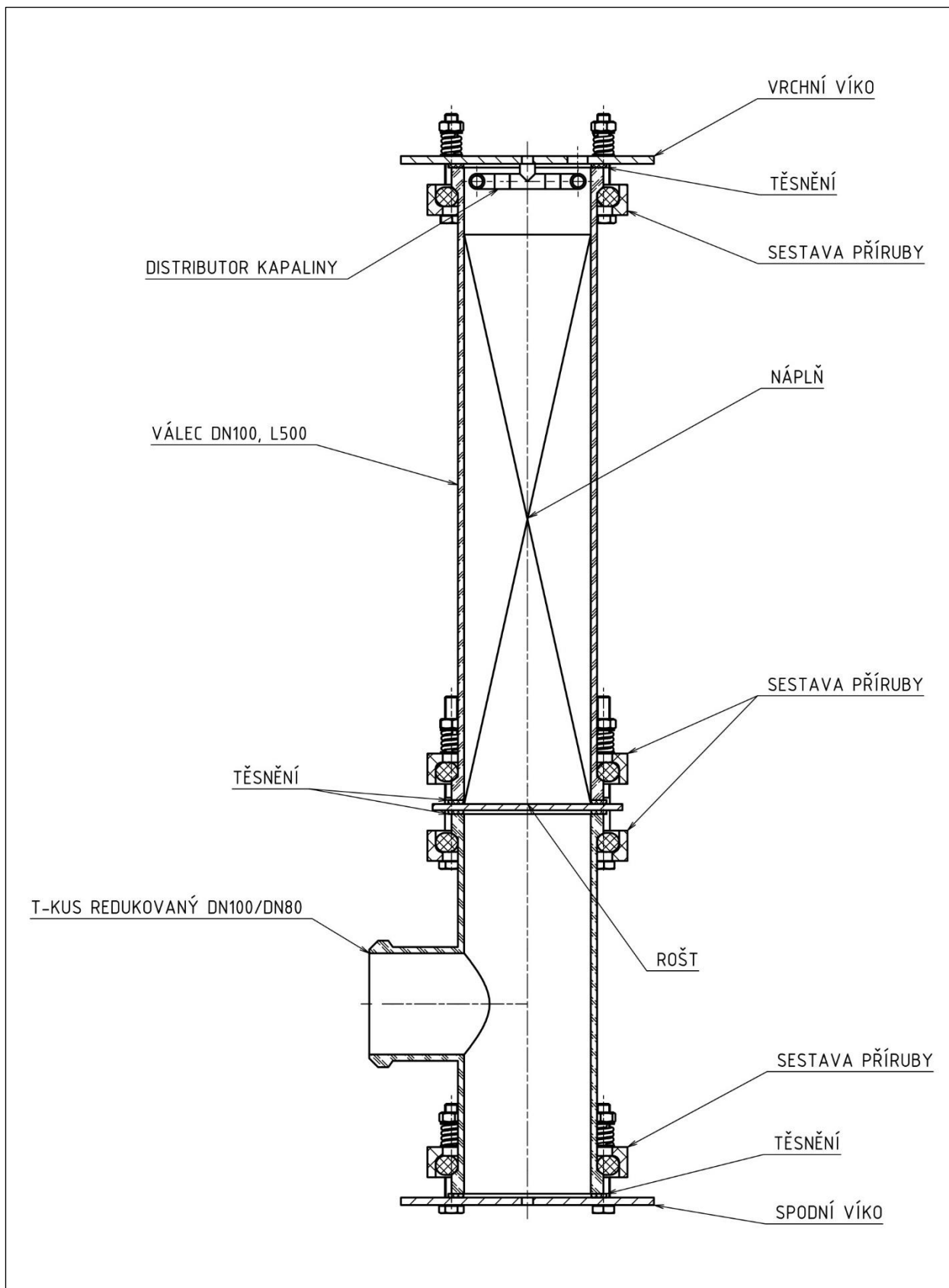
Sklo, ze kterého je uvažováno zařízení, je schopné vydržet i nízký tlak, řádově až 1,5 kPa, jak uvádí výrobce. Naopak maximální namáhání vnitřním přetlakem je pro použitou dimenzi DN80 300 kPa, dimenzi DN100 200 kPa a dimenzi DN200 100 kPa. Výrobce doporučuje provozovat zařízení s ohledem na těsnící a spojovací materiál do teploty cca 200 °C.

3.1 Kondenzátor

Jako základní konstrukční prvek pro stavbu kondenzátoru byl vybrán skleněný válec jmenovitého průměru DN100. Od této volby se pak odvíjí volba dalších prvků. Na zmíněný válec o délce 500 mm navazuje redukovaný T-kus s odbočkou DN80, kterým bude přiváděna pára. Mezi těmito díly bude vložen perforovaný rošt, který bude nést náplňová tělíska. Těmi jsou keramické Raschigovy kroužky o průměru 10 mm. Náplň je vysoká 450 mm. Na vrchu kondenzátoru je víko z nerezové oceli. Toto víko je opatřeno třemi otvory. Jeden slouží k přívodu kapaliny do kondenzátoru včetně umístění zařízení k distribuci kapaliny po celém průměru kolony. Druhý otvor slouží k odvodu nezkondenzovaných plynů. Skrze třetí otvor se bude měřit teplota podél celé náplně pomocí několika termočlánků. Podobně na spodu kondenzátoru bude výpalek spodního nerezového víka, tentokrát ale pouze s jedním otvorem sloužícím k odvodu kondenzátu. Model kondenzátoru lze vidět na obrázcích 52 a 53.



Obrázek 52 3D model kondenzátoru



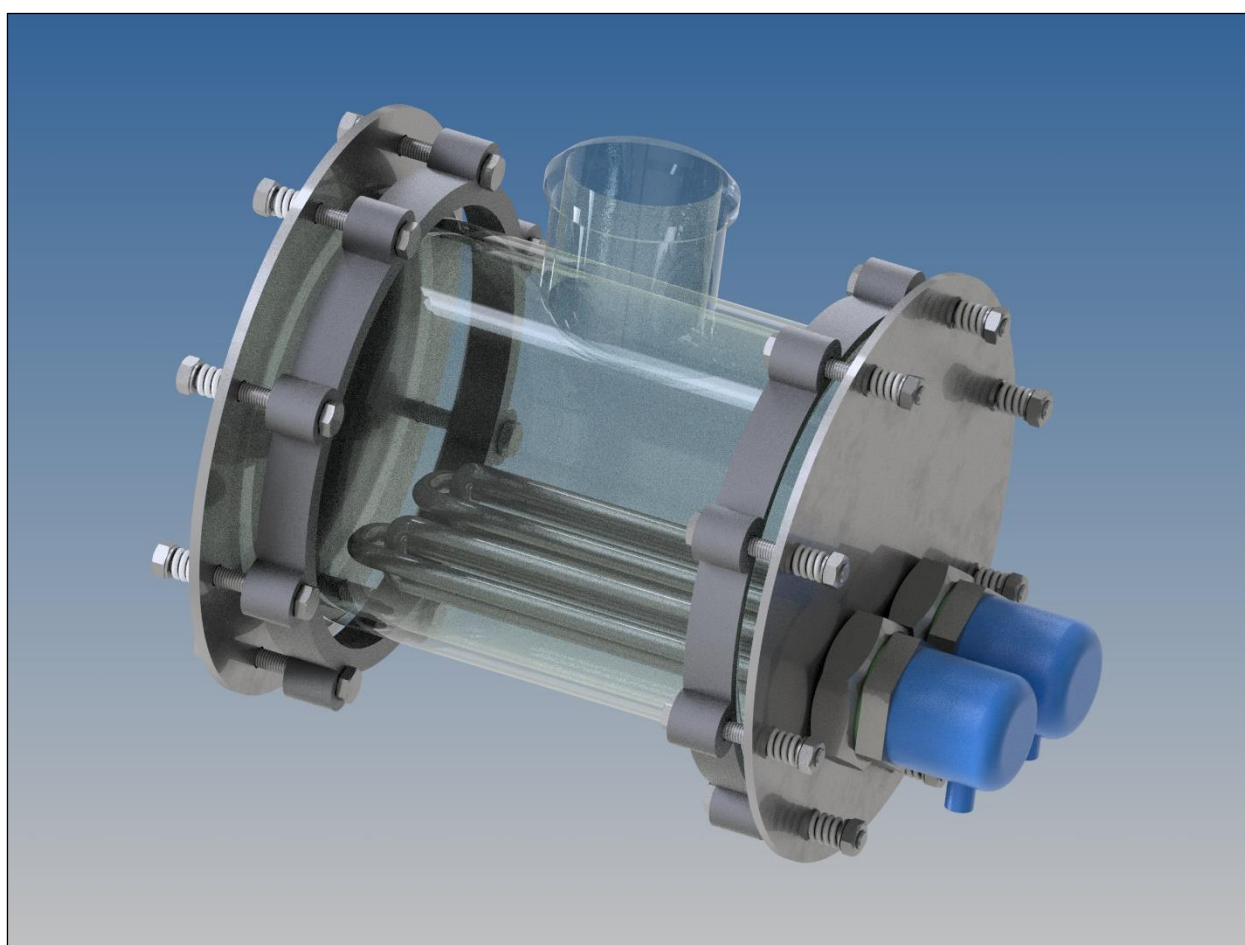
Obrázek 53 Řez kondenzátorem

3.2 Generátor páry

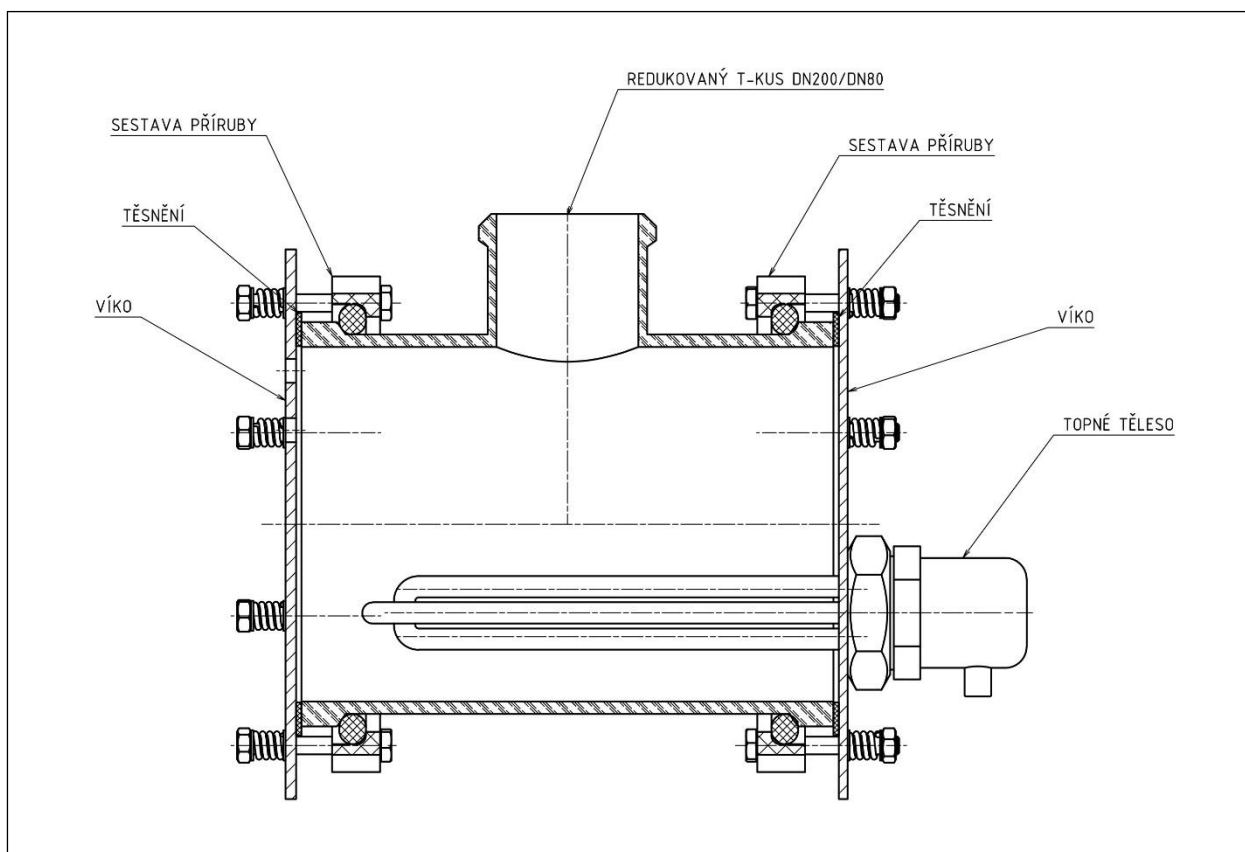
Jako generátor nasycené páry jsem zvolil horizontální redukovaný T-kus DN200 o délce 300 mm s odbočkou DN80. Z obou stran bude tento generátor páry zakončen nerezovými víky. V jednom víku budou otvory pro přívod vody a měření teploty generované páry. Ve druhém víku budou vypáleny otvory pro umístění topných těles. Potřebný výkon těchto topidel se spočítá jako součet citelného tepla se skupenským teplem varu.

$$\dot{Q} = \dot{m}_{1g}c_{p,l}(T_{\text{sat}} - T_{\text{in}}) + \dot{m}_{1g}l_{1g} \quad (67)$$

Do modelu jsem vložil topná tělesa od společnosti Backer ELTOP. Model generátoru páry je vidět na obrázcích 54 a 55.



Obrázek 54 3D model generátoru páry



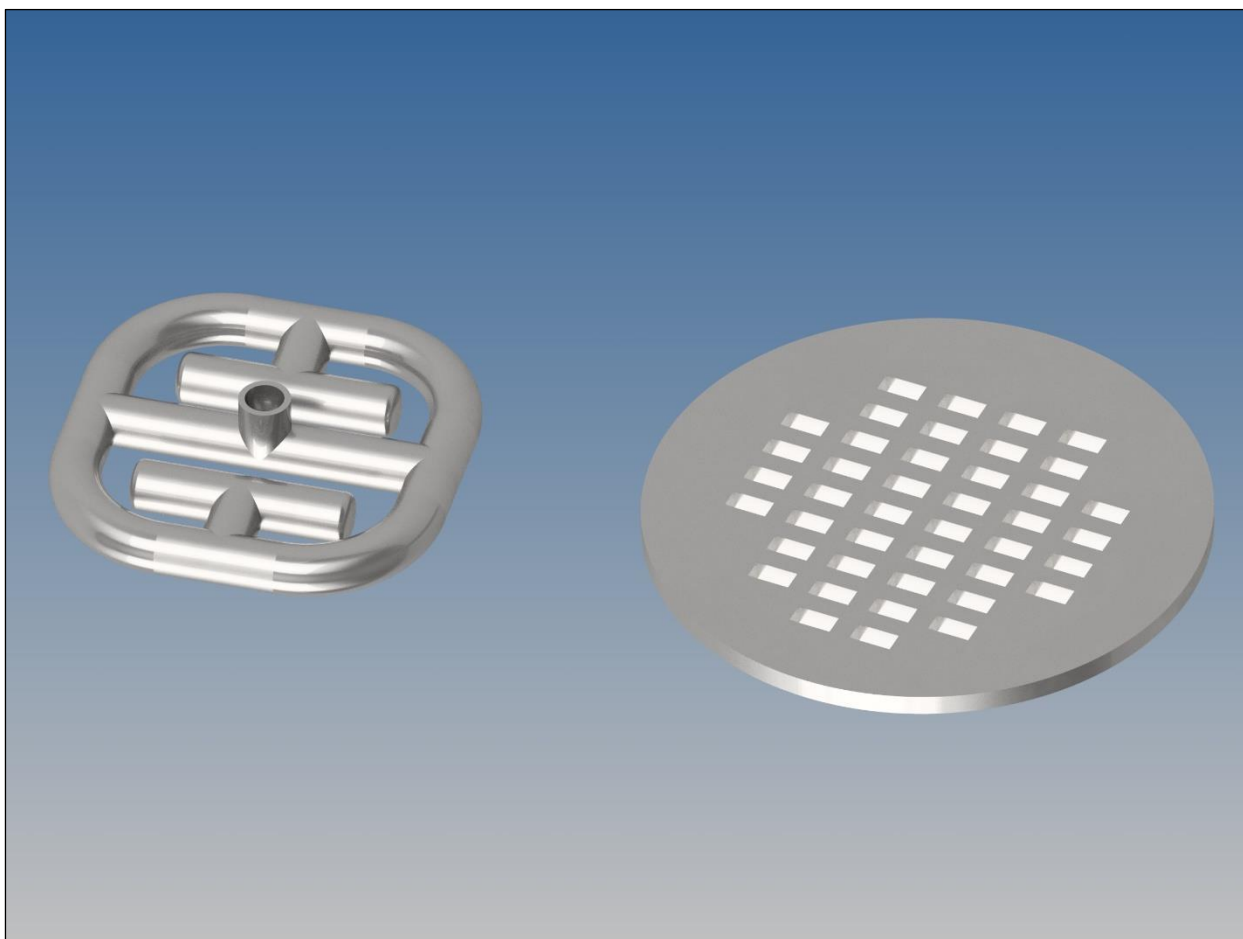
Obrázek 55 Řez generátorem páry

3.3 Příslušenství

Kromě kondenzátoru a generátoru páry je zapotřebí ještě několik důležitých prvků. Jedním z nich je například koleno, které spojuje tato dvě hlavní zařízení. Dalším prvkem je sběrná nádrž na kondenzát. V případě provozu v atmosférickém tlaku by stačilo mít vyvedenou hadičku do kýble či jiné nádoby. V případě provozu v podtlaku by bylo třeba přidat další válcovou část pod kondenzátor, která by byla opět přírubově spojena.

V řezu kondenzátoru je vidět distributor kapaliny. Ten jsem navrhl jako svařenec z trubiček, kolen, T-kusů a malých den v dimenzi DN8. Ze spodní části by byl rovnoměrně provrtaný.

Dále, jak je vidět v řezu kondenzátoru, je mezi přírubami vložen nosný rošt pod náplní. Ten uvažuji jako perforovaný výpalek z nerezové oceli. Distributor kapaliny i nosný rošt jsou vedle sebe zobrazeny na obrázku 56.



Obrázek 56 Distributor kapaliny a nosný rošt

3.4 Návarky

Dále je potřeba zajistit návarky na výše popsané otvory ve víkách. Návarky lze mít s vnitřním závitem (tzv. *mufna*), se závitem vnějším (tzv. *nípl*) nebo přímo matici se závitem metrickým M48x2. Tato matice je potřeba k přišroubování topných těles do generátoru páry. Dimenze návarků jsem volil G1/4“ pro přívod vody do kondenzátoru i do generátoru páry, G1/4“ pro odvod kondenzátu a G1/2“ pro odvod nezkondenzovaných plynů. Návarky pro termočlánky jsem předběžně volil G1/4“.

Na přívodu vody do kondenzátoru a na odvodu kondenzátu jsem uvažoval na návarcích přišroubované T-kusy G1/4“. Odbočky těchto T-kusů by opět sloužily k umístění termočlánků.

Celkový pohled na navržené experimentální zařízení je vidět na obrázku 57.



Obrázek 57 Celkový pohled na navržené experimentální zařízení

3.5 Instrumentace a další prvky

Voda se bude do kondenzátoru i do generátoru páry čerpat pomocí čerpadel v gumových hadičkách. Tyto hadičky jsou připojeny k závitovým hadičníkům pomocí utahovací objímky. Za čerpadlem, které napájí náplňový kondenzátor, je třeba umístit průtokoměr k určení objemového průtoku chladicí kapaliny. Na určení průtoku páry by byl sice také vhodný průtokoměr, ale vzhledem k jeho ceně by pro laboratorní účely měly posloužit prosté stopky a váha na nádrž s kondenzátem. V případě provozu v podtlaku, jak je uvedeno výše, by byla třeba další utěsněná skleněná nádoba, která by sloužila jako odměrka s ryskami pro zjištění průtoku kondenzátu. Teploty se budou měřit pomocí termočlánků, jak je již zmíněno výše. Termočlánky bych volil typu K, tedy dvojici kovů železo-konstantan. Na zpracování jejich signálu by byl potřeba A/D převodník připojený přes USB do počítače.

3.6 Matematický model experimentálního zařízení

Cílem matematického modelu experimentálního zařízení bude vypočítat teplotu vystupujícího kondenzátu a odhadnout součinitel přestupu tepla. Pro tento výpočet si dovoluji vyřknout určité předpoklady:

- a) u páry uvažuji pouze skupenské teplo kondenzační, teplo citelné zanedbávám
- b) kondenzátor považuji za dokonale izolovaný
- c) zanedbávám také teplo obdržené z náplňových tělísek, kde se předtím teplo naakumulovalo
- d) neuvažuji přítomnost inertních plynů
- e) uvažuji úplné zkondenzování páry
- f) termofyzikální vlastnosti uvažuji konstantní
- g) uvažuji rovnoměrné obtékání všech náplňových tělísek
- h) uvažuji proces kondenzace rovnoměrně rozložený na všech náplňových tělískách
- i) celý proces uvažuji nezávislý na čase

Dalším mým předpokladem je, podobně jako u Genić et al. (2008), že hustota hmotnostního průtoku kondenzátu se rovná součtu oběma vstupům do kolony, tedy

$$L_{\text{out}} = L + G . \quad (68)$$

Jako bilanci proudů uvažuji rovnici

$$G l_{\text{lg}} + L c_{\text{pl}} T_{\text{in}} = L_{\text{out}} c_{\text{pl}} T_{\text{out}} , \quad (69)$$

ze které následně počítám hodnotu vystupující teploty kondenzátu T_{out} .

Pro odhad součinitele přestupu tepla vyjdu z totožných vztahů jako Li et al. (2006), tedy, jak jsem již popisoval, budu muset vypočítat součinitele přestupu tepla jak pro kapalnou, tak pro plynnou fázi:

$$\frac{1}{\alpha} = \frac{1}{\alpha_{\text{l}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{g}}} . \quad (70)$$

Toho docílím z podobnosti přestupu tepla a hmoty, jak uvádí Li et al. (2006)

$$\frac{\text{Nu}_{\text{l}}}{\text{Pr}_{\text{l}}^{1/2}} = \frac{\text{Sh}_{\text{l}}}{\text{Sc}_{\text{l}}^{1/2}} \quad (71)$$

pro kapalnou fázi a

$$\frac{\text{Nu}_{\text{g}}}{\text{Pr}_{\text{g}}^{1/3}} = \frac{\text{Sh}_{\text{g}}}{\text{Sc}_{\text{g}}^{1/3}} \quad (72)$$

pro fázi plynnou. Z těchto rovnic vyjdou vztahy pro jednotlivé součinitele přestupu tepla

$$\alpha_1 = \beta_1 \left(\rho_1 c_{p,1} \frac{\lambda_1}{D_1} \right)^{1/2}, \quad (73)$$

$$\alpha_g = \beta_g (\rho_g c_{p,g})^{1/3} \left(\frac{\lambda_g}{D_g} \right)^{2/3}. \quad (74)$$

Pro vyřešení vztahů (72) a (73) je třeba určit součinitele přestupu hmoty pro obě fáze

$$\beta_1 = 0,0051 \text{Re}_{1,W}^{2/3} \text{Sc}_1^{-1/2} (ed_p)^{0,4} \left(\frac{\mu_1 g}{\rho_1} \right)^{1/3}, \quad (75)$$

$$\beta_g = 2 \text{Re}_{g,A}^{0,7} \text{Sc}_g^{1/3} (ed_p)^{-2} e D_g. \quad (76)$$

Dle Onda et al. (1968) se tato Reynoldsova a Schmidtova čísla uvedená v rovnicích výše vypočítají

$$\text{Sc}_1 = \frac{\mu_1}{\rho_1 D_1}, \quad (77)$$

$$\text{Sc}_g = \frac{\mu_g}{\rho_g D_g}, \quad (78)$$

$$\text{Re}_{g,A} = \frac{G}{e \mu_g}, \quad (79)$$

$$\text{Re}_{l,W} = \frac{L}{e_w \mu_1}. \quad (80)$$

Stejně tak, jak uvádí Onda s kolegy, se specifický smočený povrch náplňových tělísek určí

$$e_w = e \left\{ 1 - \exp \left[-2 \cdot 2 \left(\frac{\sigma_c}{\sigma_1} \right)^{3/4} \text{Re}_{l,A}^{1/2} \text{Fr}_l^{-0,05} \text{We}_1^{0,2} \right] \right\}, \quad (81)$$

kde vztahy pro výpočet Froudeho, Weberova a Reynoldsova čísla jsou

$$\text{Fr}_1 = \frac{L^2 e}{\rho_1^2 g}, \quad (82)$$

$$\text{We}_1 = \frac{L^2}{\rho_1 \sigma_1 e}, \quad (83)$$

$$\text{Re}_{l,A} = \frac{L}{e \mu_1}. \quad (84)$$

V literatuře je dostupný také druhý model pro výpočet součinitele přestupu tepla. Vychází z tzv. *Lewisova faktoru*. Tento faktor je definován jako

$$Le_{lf} = \frac{\alpha_{g/l}}{\beta_{g/l} c_{p,g/l} \rho_{g/l}} \quad (85)$$

a pro směs voda-vzduch byl původně uvažován přibližně jedna. Postupem času se přišlo na to, že se Lewisův faktor pohybuje v rozmezí 0,5 až 1,3. Více informací uvádí například článek zabývající se predikcí Lewisova faktoru u chladících věží, Kloppers a Kröger (2005). Nicméně článek Cervera et al. (2018), který je popsán v rešeršní části, uvažoval pro výpočet součinitele přestupu tepla Lewisův faktor $Le_{lf} = 1$.

Termofyzikální vlastnosti, které jsou potřeba pro výpočet vztahů výše, jsem pro zjednodušení zvolil vzhledem k teplotě nasycené vodní páry 100 °C a k teplotě vody 20 °C. Pára i voda jsou uvažovány pro atmosférický tlak. Číselně jsou tyto veličiny shrnuty v tabulce 3.

Tabulka 3 Číselné hodnoty termofyzikálních vlastností pro výpočet. Data převzata z Onda et al. (1968), <https://dtrx.de/od/diff/> https://www.engineeringtoolbox.com/air-diffusion-coefficient-gas-mixture-temperature-d_2010.html, http://www.peacesoftware.de/einige/werte/wasser_dampf_e.html, http://ceramicsupportball.com/products/036_10mm_ceramic_rasc_hig_ring.html

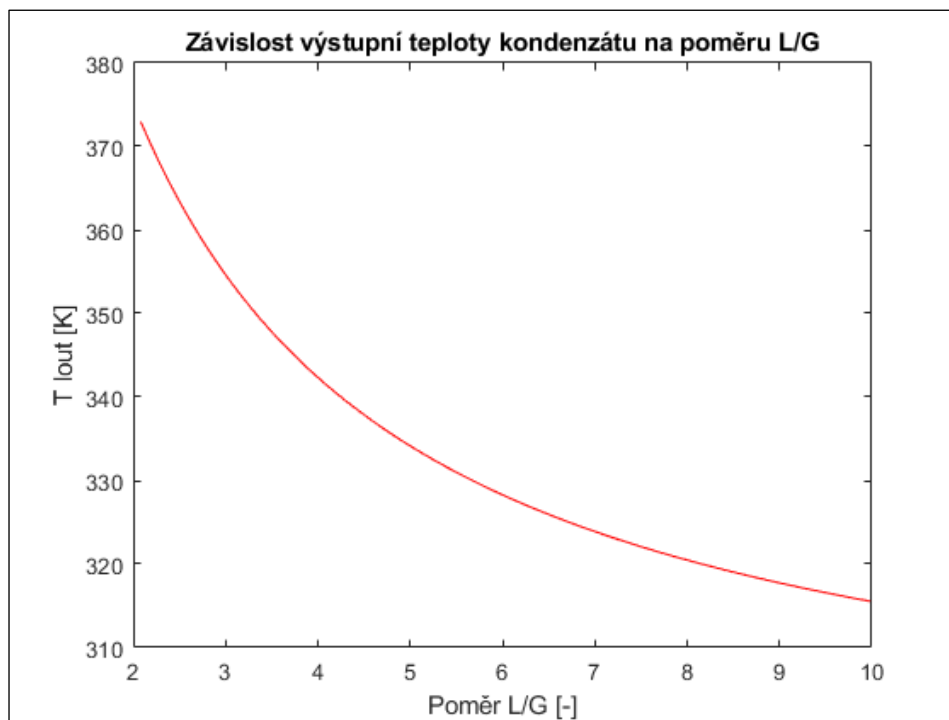
Termofyzikální vlastnosti – voda 20 °C	
Hustota ρ_l	998,2 kg m ⁻³
Dynamická viskozita μ_l	0,001 Pa s
Povrchové napětí σ_l	72,8 · 10 ⁻³ N m ⁻¹
Součinitel tepelné vodivosti λ_l	0,6 W m ⁻¹ K ⁻¹
Měrná tepelná kapacita při konstantním tlaku $c_{p,l}$	4185 J kg ⁻¹ K ⁻¹
Součinitel autodifúze pro vodu D_l	2,02 · 10 ⁻⁹ m ² s ⁻¹
Termofyzikální vlastnosti – vodní pára 100 °C	
Hustota ρ_g	0,598 kg m ⁻³
Dynamická viskozita μ_g	1,23 · 10 ⁻⁵ Pa s
Součinitel tepelné vodivosti λ_g	0,025 W m ⁻¹ K ⁻¹
Měrná tepelná kapacita při konstantním tlaku $c_{p,g}$	2078 J kg ⁻¹ K ⁻¹
Součinitel difúze vodní páry ve vzduchu D_g	0,399 · 10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
Měrné skupenské kondenzační teplo l_{lg}	2256 · 10 ³ J kg ⁻¹
Keramické Raschigovy kroužky	
Průměr d_p	0,01 m
Specifický povrch e	440 m ² m ⁻³
Povrchové napětí vztahované k náplni σ_l	47 · 10 ⁻³ N m ⁻¹

Teplota vystupujícího kondenzátu

Skript v programu Matlab pro výpočet teploty kondenzátu z rovnice 69 vypadá následovně.

```
close all;
clear all;
%%%kapalina
T_lin = 293.15; %K
L = 1; %kg/(m^2*s)
c_pl = 4185; %J/(kg*K)
%%%plyn
T_gin = 373.15; %K
pomerLG = (0:0.01:10);
G = L./pomerLG; %kg/(m^2*s)
l_lg = 2256e3; %J/kg
%%%vypocet vystupujici teploty kondenzatu
L_out = L+G; %kg/(m^2*s)
T_lout = (G*l_lg+L*c_pl*T_lin)./(L_out*c_pl); %K
%%%graf
plot(pomerLG,T_lout,'r');
title('Závislost výstupní teploty kondenzátu na poměru L/G')
xlabel('Poměr L/G [-]')
ylabel('T_lout [K]')
ylim([312 373.15])
```

Výpočet vystupující teploty kondenzátu jsem volil v závislosti na poměru hustot hmotnostních toků vody a vodní páry. Když tento poměr roste, tedy když čím dál více převládá podíl chladné vody, tím logicky klesá teplota kondenzátu. Graficky je tato závislost zobrazena na obrázku 58.



Obrázek 58 Závislost výstupní teploty kondenzátu na poměru L/G

Součinitel přestupu tepla

Níže je uveden skript v programu Matlab pro výpočet součinitele přestupu tepla z rovnic 70 až 85. V potaz jsem uvažoval oba modely pro výpočet součinitele přestupu tepla, jak uvádím výše. Jeden jsem nazval *Li*, druhý *Cervera*, tedy podle autorů článků, kteří tyto modely použili. Skript taktéž zahrnuje teoreticky potřebnou výšku náplně kondenzátoru pro kontrolu mé návrhové výšky 450 mm. Rovnice pro její výpočet vychází z bilance tepla

$$G \frac{\pi D_i^2}{4} l_{lg} = \alpha e V \Delta T_{ln}, \quad (86)$$

kde střední logaritmický teplotní spád vypočítám

$$\Delta T_{ln} = \frac{(T_{g,in} - T_{l,out}) - (T_{g,out} - T_{l,in})}{\ln \frac{T_{g,in} - T_{l,out}}{T_{g,out} - T_{l,in}}} \quad (87)$$

a z objemu náplně vypočítám její výšku ze vztahu

$$V = h \frac{\pi D_i^2}{4}. \quad (88)$$

Hustotu hmotnostního průtoku plynu jsem volil 4x nižší než L . A to z důvodu, že jsem si zvolil požadovanou teplotu vystupujícího kondenzátu 342 K z obrázku 58.

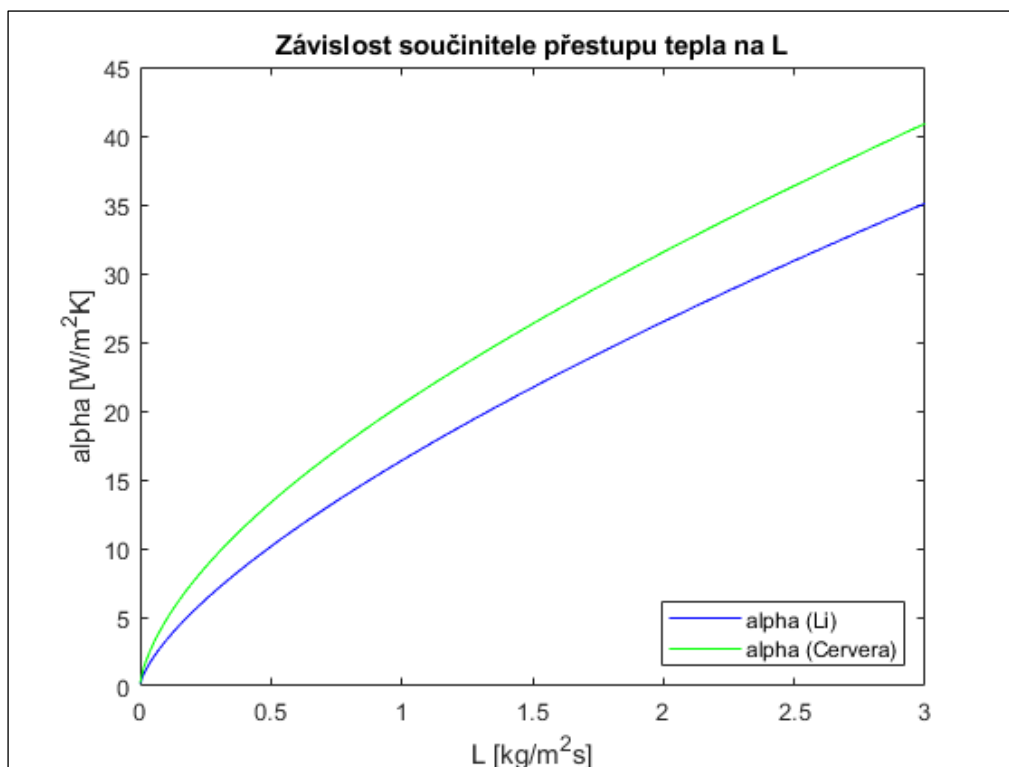
```
close all;
clear all;
%%%kapalina
T_lin = 293.15; %K
L = 0:0.001:3; %kg/(m^2*s)
mu_l = 1e-3; %Pa*s
rho_l = 998.2; %kg/m^3
sigma_l = 72.8e-3; %N/m
D_l = 2.02e-9; %m^2/s
c_pl = 4185; %J/(kg*K)
lambda_l = 0.6; %W/(m*K)
%%%plyn
T_gin = 373.15; %K
G = L/4; %kg/(m^2*s)
mu_g = 1.23e-5; %Pa*s
rho_g = 0.598; %kg/m^3
c_pg = 2078; %J/(kg*K)
lambda_g = 0.025; %W/(m*K)
D_g = 0.399e-4; %m^2/s
l_lg = 2256e3; %J/kg
%%%napln
sigma_c = 47e-3; %N/m
d_p = 10e-3; %m
e = 440; %m^2/m^3
D = 0.1; %m
S = pi*D^2/4; %m^2
g = 9.81; %m/s^2
```

```

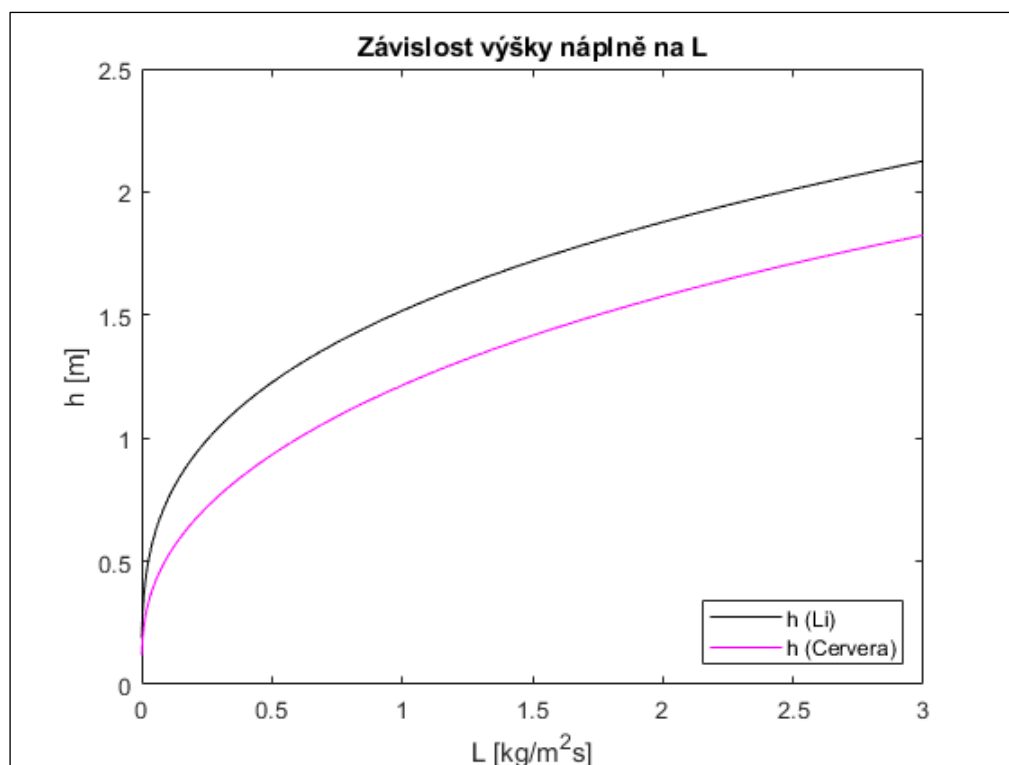
%%vypocet vystupujici teploty kondenzatu
L_out = L+G; %kg/(m^2*s)
Q = G*l_lg*S; %W
T_lout = (G*l_lg+L*c_pl*T_lin)./(L_out*c_pl); %K
%%vypocet soucinitele prestupu tepla pro kapalinu
Re_lA = L/(e*mu_l);
Fr_l = L.^2*e/((rho_l^2)*g);
We_l = L.^2/(rho_l*sigma_l*e);
e_w = e.*(1-exp(-
2*2*((sigma_c/sigma_l)^(3/4)).*(Re_lA.^(1/2)).*(Fr_l.^(-0.05))
.*(We_l.^(0.2)))); %m^2/m^3
Re_lW = L./(e_w*mu_l);
Sc_l = (mu_l/(rho_l*D_l));
beta_l = 0.0051*Re_lW.^(2/3)*Sc_l.^(1/2)*
(e*d_p)^(0.4)*(mu_l*g/rho_l)^(1/3); %m/s
alpha_l_Li = beta_l*((rho_l*c_pl*lambda_l/D_l)^(1/2)); %W/(m^2*K)
alpha_l_Cervera = beta_l*rho_l*c_pl; %W/(m^2*K)
%%vypocet soucinitele prestupu tepla pro plynu
Re_gA = G/(e*mu_g);
Sc_g = mu_g/(rho_g*D_g);
beta_g = 2*(Re_gA.^(0.7))*(Sc_g.^(1/3))*((e*d_p)^(-2))*e*D_g; %m/s
alpha_g_Li = beta_g*(rho_g*c_pg)^(1/3)*(lambda_g/D_g)^(2/3);
%W/(m^2*K)
alpha_g_Cervera = beta_g*rho_g*c_pg; %W/(m^2*K)
%%vypocet celkoveho soucinitele prestupu tepla
alpha_Li = (alpha_l_Li.*alpha_g_Li)./(alpha_l_Li+alpha_g_Li);
%W/(m^2*K)
alpha_Cervera =
(alpha_l_Cervera.*alpha_g_Cervera)./(alpha_l_Cervera+alpha_g_Cervera);
%W/(m^2*K)
%%vypocet vysky naplne
T_gout = T_gin; %K
deltaT = ((T_gin-T_lout)-(T_gout-T_lin))./(log((T_gin-
T_lout)./(T_gout-T_lin))); %K
V_Li = (G.*S*l_lg)./(alpha_Li.*deltaT*e); %m^3
h_Li = V_Li/S; %m
V_Cervera = (G.*S*l_lg)./(alpha_Cervera.*deltaT*e); %m^3
h_Cervera = V_Cervera/S; %m
%%grafy 1 a 2
figure(1);
plot(L,alpha_Li,'b');
hold on
plot(L,alpha_Cervera,'g')
title('Závislost součinitele přestupu tepla na L')
xlabel('L [kg/m^2s]')
ylabel('alpha [W/m^2K]')
legend('alpha (Li)', 'alpha (Cervera)', 'Location', 'SouthEast');
hold off
figure(2);
plot(L,h_Li,'k');
hold on
plot(L,h_Cervera,'m');
title('Závislost výšky náplně na L')
xlabel('L [kg/m^2s]')
ylabel('h [m]')
legend('h (Li)', 'h (Cervera)', 'Location', 'SouthEast');
hold off

```

Výsledkem skriptu jsou dva grafy. Závislost součinitele přestupu tepla (obrázek 59) a výšky náplně (obrázek 60) na hustotě hmotnostního průtoku vody, která je volena pro názornost od 0 do $3 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$.



Obrázek 59 Závislost součinitele přestupu tepla na L



Obrázek 60 Závislost výšky náplně na L

Z výsledků je zřejmé, že model *Cervera* předpovídá pro náš případ vyšší hodnoty součinitele přestupu tepla, a tedy nižší hodnoty potřebné výšky náplně.

Pro můj navrhnutý kondenzátor o výšce náplně 450 mm však dle skriptu vychází nízká hodnota hustoty hmotnostního toku vody. Konkrétně pouze $0,019 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ dle modelu *Li* a $0,066 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ dle modelu *Cervera*. V případě vyšších hodnot se už zvyšuje potřebná výška náplně. To však platí za mých předpokladů. Ve skutečnosti očekávám nerovnoměrnou kondenzaci především ve spodní části náplně, podobně jako na obrázku 38 z rešeršní části práce, kde téměř veškeré množství uhlovodíků zkondenzovalo v první čtvrtině, jak uvádí Sun et al. (2014).

4 Srovnání směšovacího kondenzátoru s nesměšovacím

Poslední částí mé diplomové práce je srovnání směšovacího kondenzátoru s trubkovým kondenzátorem. Jako požadovaný výkon volím 1 MW a ohřátí chladicí vody z 20 °C na 51 °C pomocí kondenzující nasycené páry.

Směšovací kondenzátor

Pro výpočet směšovacího kondenzátoru vyjdu z rovnic a skriptů uvedených v předchozí části práce. Změny se týkají zvětšení Raschigových kroužků na 15 mm, tím pádem zmenšení jejich specifického povrchu na $340 \text{ m}^2 \text{ m}^{-3}$. Dále se změnilo povrchové napětí vztažené k náplni na $62 \cdot 10^{-3} \text{ N m}^{-1}$. Poslední změnou je náhrada konstanty 2 za konstantu 5,23 v rovnici 76, respektive 42. Výsledky výpočtu jsou zobrazeny v tabulce 4.

Tabulka 4 Výsledky výpočtu pro směšovací kondenzátor

	Model <i>Li</i>	Model <i>Cervera</i>
Výkon [MW]	1,05	
Vnitřní průměr kolony [m]	0,8	
Vnější průměr kolony [m]	0,82	
Výška náplně [m]	1,33	1,16
Součinitel přestupu tepla [$\text{W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$]	73,26	83,81
Objemový součinitel přestupu tepla [$\text{W m}^{-3} \text{ K}^{-1}$]	24 908,4	28 495,4

Nesměšovací kondenzátor

K výpočtu nesměšovacího kondenzátoru, konkrétně trubkového, použiji software *HTRI Xchanger Suite 8.2*. Výsledky jsou shrnuty v tabulce 5. Podrobnější informace o výpočtu jsou zobrazeny na obrázku 61.

Tabulka 5 Výsledky výpočtu pro směšovací kondenzátor

Výkon [MW]	1
Vnitřní průměr pláště [m]	0,6
Vnější průměr pláště [m]	0,619
Vnitřní průměr trubek [mm]	25
Vnější průměr trubek [mm]	30
Délka trubek [m]	1
Počet trubek [–]	104

Xist E 8.2 01.06.2021 22:16 SN: 01009-1269597385

SI Units

Shell 1

Rating - Horizontal Multipass Flow TEMA AES Shell With No Baffles

Process Conditions		Hot Shellside		Cold Tubeside	
Fluid name					
Flow rate	(kg/s)		0,4400		7,7200
Inlet/Outlet Y	(Wt. frac vap.)	1,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Inlet/Outlet T	(Deg C)	100,01	99,94	20,00	51,00
Inlet P/Avg	(kPa)	101,33	101,20	200,00	187,84
dP/Allow.	(kPa)	0,242	10,133	24,325	20,000
Fouling	(m2-K/W)		0,000000		0,000000

Exchanger Performance					
Shell h	(W/m2-K)	9067,2	Actual U	(W/m2-K)	2026,5
Tube h	(W/m2-K)	5688,2	Required U	(W/m2-K)	1755,6
Hot regime	(--)	Gravity	Duty	(MegaWatts)	1,0085
Cold regime	(--)	Sens. Liquid	Eff. area	(m2)	9,086
EMTD	(Deg C)	63,2	Overdesign	(%)	15,43

Shell Geometry			Baffle Geometry		
TEMA type	(--)	AES	Baffle type		None
Shell ID	(mm)	600,00	Baffle cut	(Pct Dia.)	
Series	(--)	1	Baffle orientation	(--)	
Parallel	(--)	1	Central spacing	(mm)	926,98
Orientation	(deg)	0,00	Crosspasses	(--)	1

Tube Geometry			Nozzles		
Tube type	(--)	Plain	Shell inlet	(mm)	205,00
Tube OD	(mm)	30,000	Shell outlet	(mm)	205,00
Length	(m)	1,000	Inlet height	(mm)	53,243
Pitch ratio	(--)	1,5000	Outlet height	(mm)	37,365
Layout	(deg)	30	Tube inlet	(mm)	102,26
Tube count	(--)	104	Tube outlet	(mm)	102,26
Tube Pass	(--)	8			

Thermal Resistance; %		Velocities; m/s			Flow Fractions	
Shell	22,35		Min	Max	A	
Tube	42,89	Tubeside	1,00	1,77	B	0,792
Fouling	0,00	Crossflow	--	--	C	0,208
Metal	34,76	Longitudinal	7,88e-2	3,60	E	
					F	

Obrázek 61 Výpočet trubkového kondenzátoru v HTRI

Porovnání výsledků

Pro navrhnutý kondenzátor o výkonu 1 MW vyšly obě varianty rozměrově podobně. Avšak více vypovídající hodnota bude jejich hmotnost. Jako materiál obou zařízení budu uvažovat nerezovou ocel AISI304 o hustotě 7850 kg m^{-3} . Do výpočtu zahrnu pouze válcovou část kolem náplně u směšovacího kondenzátoru a válcovou část kolem trubek + trubky u nesměšovacího kondenzátoru. Víka, přepážky, rošt, trubkovnice, hrdla ani dalších prvky uvažovat nebudu. Jde pouze o orientační porovnání hmotností. U směšovacího kondenzátoru volím výšku náplně dle modelu *Cervera*.

$$m_{SK} = \frac{\pi}{4} (D_{SKo}^2 - D_{SKi}^2) L_{SK} \rho_{304} = 232 \text{ kg} \quad (89)$$

$$m_{NK} = \frac{\pi}{4} (D_{NKo}^2 - D_{NKi}^2) L_{NK} \rho_{304} + n \frac{\pi}{4} (D_{TRo}^2 - D_{TRi}^2) L_{NK} \rho_{304} = 319 \text{ kg} \quad (90)$$

Vypočítaná hmotnost oceli směšovacího kondenzátoru vyšla o více než jednu čtvrtinu nižší než hmotnost oceli trubkového kondenzátoru, což se tím pádem projeví zejména v nižších investičních nákladech. I samotná výroba nesměšovacího kondenzátoru je jistě nákladnější. Zejména kvůli usazení trubek do trubkovnice. Na druhou stranu ale náplňový kondenzátor potřebuje oproti nesměšovacímu kondenzátoru náplň, která ale zpravidla nebývá významnou nákladovou položkou.

Toto porovnání koresponduje s tvrzením autorů z rešeršní části, že jednou z největších výhod směšovacích kondenzátorů je zejména jejich jednoduchost a nízká pořizovací cena.

Závěr

Úvodní část této práce se zabývá samotným procesem kondenzace a jejím uplatněním v průmyslových aplikacích. Dále jsou v úvodní části popsány kondenzátory a kondenzace přes teplosměnnou plochu, tedy kondenzace nepřímá, ta se v průmyslu vyskytuje nejčastěji.

Rešeršní část se zabývá studiem čtyř hlavních typů přímé neboli směšovací kondenzace. Tento méně známý druh kondenzace je v literatuře hůře dostupný, avšak v řadě případů může být mnohem vhodnější volbou než kondenzace nepřímá. Výhody přímého kontaktu spočívají právě v absenci teplosměnné plochy, která představuje tepelný odpor. Díky tomu jsou pak směšovací kondenzátory konstrukčně velice jednoduché, levnější a snadnější na údržbu. S těmito kondenzátory se můžeme setkat například v demineralizujících systémech, cukrovarech, chemických podnicích nebo v elektrárnách. Právě ale proto, že nalezneme o přímé kondenzaci pouze omezené množství literatury, je stále mnoho prostoru pro výzkum všech možných prvků, které by samotný proces mohly ovlivňovat. Nicméně reálné směšovací kondenzátory se dosud často staví na základě empirie.

Ve třetí části práce je navrhnout model náplňového laboratorního kondenzátoru včetně jeho vizualizace ve 3D a 2D. Dále jsou součástí této části práce modelové výpočty, například výpočet součinitele přestupu tepla na navrhnutém kondenzátoru.

V poslední části práce je zjednodušené porovnání směšovacího a nesměšovacího kondenzátoru o daném výkonu. Směšovací kondenzátor vyšel z matematického modelu třetí části práce, zatímco nesměšovací kondenzátor byl navrhnout pomocí software HTRI. Výsledky tohoto zjednodušeného porovnání potvrzují slova předchozích autorů, že směšovací kondenzátor má nižší investiční náklady.

Jako autor této práce doporučuji potenciálním zájemcům směšovací kondenzátory, protože ačkoliv se o nich moc nemluví a neví, jsou případy, kdy je jejich použití zdaleka nejvýhodnější a určitě by se zasloužily dostat do širšího povědomí inženýrů.

Reference

- Ahlers, M., Buck-Emden, A., Bart, H.-J., Is dropwise condensation feasible? a review on surface modifications for continuous dropwise condensation and a profitability analysis. *Journal of advanced research* 16, 2019, s. 1–13
- Alnaimat, F., Klausner, J. F., Mei, R., Transient analysis of direct contact evaporation and condensation within packed beds, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2011, roč. 54, č. 15–16, s. 3381-3393
- Butterworth, D., Condensers and their Design. *Two-Phase Flow Heat Exchangers*, 1988, s. 779- 828
- Celata, G. P., Cumo, M., Farello, G. E., and Focardi, G., A Comprehensive Analysis of Direct Contact Condensation of Saturated Steam on Subcooled Liquid Jets, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1989, roč. 32, č. 4, s. 639–654
- Cervera, J. L. S., Daniel, A., Hoffmann, K., Optimization of a Cooling-Condensation Tower, *Chemical Engineering Transactions*, 2018, roč. 69, s. 865-870
- Clark, J. A., Brandt, R. W., Direct, Continuous Condensation of Steam in Flowing Water, *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 2005, roč. 19, č. 4, s. 455-459
- Clerx, N., van der Geld, C. W. M., Experimental and Analytical Study of Intermittency in Direct Contact Condensation of Steam in a Cross-Flow of Water, *ECI International Conference on Boiling Heat Transfer*, 2009, s. 1-8
- de With, A. P., Calay, R. K., de With, G., Three-dimensional condensation regime diagram for direct contact condensation of steam injected into water, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2007, roč. 50, č. 9-10, s. 1762–1770
- Engineering ToolBox, Surface Tension, [online], 2005, dostupné na: https://www.engineeringtoolbox.com/surface-tension-d_962.html
- Ford, J. D., Lekic, A., Direct contact condensation of vapour on a spray of subcooled liquid droplets, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1980, roč. 23, č. 11, s. 1531-1537
- Ford, J. D., Lekic, A., Rate of growth of drops during condensation, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1973, roč. 16, s. 61–64
- Genić, S. B., Jaćimović, B. M., Vladić, L. A., Heat transfer rate of direct-contact condensation on baffle trays, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2008, roč. 51, č. 25–26, s. 5772-5776
- Hasson, D., Luss, D., Peck, R., Theoretical Analyses of Vapor Condensation on laminar Liquid Jets, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1964, roč. 7, č.9, s. 969–981
- Hewitt, G. F., Shires, G. L., Bott, T. R., *Process Heat Transfer*, Begell House. inc, New York, 2000, s. 725-727
- Hu, Y., Wang, Y., Huang, Q., Cui, Y., Transient analysis of the steam-water direct contact condensation in the packed column, *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 2018, roč. 96, s. 404-413
- Huang, C.-C., Fair, J. R., Direct-Contact Gas-Liquid Heat Transfer in a Packed Column, *Heat Transfer Engineering*, 1989, roč. 10, č. 2, s. 19-28

- Chernobilskij, I. I., Bondar, A. G., Gaevskij, B. A., Gorodinskaja, S. A., Ladiev, R. J., Tananajko J. M., Mirgorodskij, V. T., *Mašiny i aparáty chimichjeskich proizvodstv Mašinstrojenije*, Moskva, 1975, s. 229-231
- Kar, S., Chen, X. D., Nelson, M. I., Direct-Contact Heat Transfer Coefficient for Condensing Vapour Bubble in Stagnant Liquid Pool, *Chemical Engineering Research and Design*, 2007, roč. 85, č. 3, s. 320-328
- Kloppers, J., Kröger, D., The Lewis factor and its influence on the performance prediction of wet-cooling towers, *International Journal of Thermal Sciences*, 2005, roč. 44, s. 879-884
- Kreith, F., Boehm, R. F., *Direct Contact Heat Transfer*, New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1988
- Lee, S. Y., Tankin R. S., Study of liquid spray (water) in a condensable environment (steam), *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1984, roč. 27, č. 3, s. 363-374
- Li, X., Liu, S., Cui, X., and Li, H., Experimental study of direct contact steam condensation in structured packing, *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, 2013, vol. 5, č.8, s. 657–664
- Li, Y., Klausner, J. F., Mei, R., Knight, J., Direct contact condensation in packed beds, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2006, roč. 49, č.25-26, s. 4751–4761
- Mecholic, Types of Air Cooled Condenser – Application and Advantages, [online], 2018, dostupné na: <https://www.mecholic.com/2018/08/types-of-air-cooled-condenser.html>
- Narayanan, J. K., Roy, A., Ghosh, P., CFD Analysis of Direct Contact Condensation (DCC) of Subsonic Steam Jets in a Cross-Flow of Water Using a Two-Fluid Model, *Proceedings of the ASME 2018 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, 2018, roč. 8A
- Narayanan, J. K., Roy, A., Ghosh, P., Numerical studies on unstable oscillatory direct contact condensation (DCC) of oxygen vapor jets in subcooled flowing liquid oxygen, *Cryogenics*, 2020, roč. 111
- Onda, K., Takechi, H., Okumoto, Y., Mass transfer coefficients between gas and liquid phases in packed columns, *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 1968, roč. 1, č. 1, s. 56-62
- Sazima, M., *Sdílení tepla*, 1. vyd. Praha: Nakladatelství techn. lit, 1993
- Shatat, M., Riffat, S. B., Water desalination technologies utilizing conventional and renewable energy sources. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 2014, roč. 9, č. 1, s. 1-19
- Simpson, M. E., Chan, C. K., Hydrodynamics of a Subsonic Vapor Jet in Subcooled Liquid, *ASME Journal of Heat Transfer*, 1982, roč. 104, č. 2, s. 271-278
- Sun, Y., Yan, K., Zhang, L., Xiao, X., Direct-contact Condensation of Hydrocarbon Mixtures in a Structured Packing Bed, *Petroleum Science and Technology*, 2014, roč. 32, č. 23, s. 2795-2802
- Šesták, J., Rieger, F., *Přenos hybnosti, tepla a hmoty*, 1. vyd. Praha: ČVUT, 1993
- Šesták, J., Žitný, R., *Tepelné pochody II: výměníky tepla, odpařování, sušení, průmyslové pece a elektrický ohřev*, 1. vyd. Praha: ČVUT, 1997

- Takahashi, M., Nayak, A. K., Hiroyuki Murakoso, S.-i. K., Heat Transfer in Direct Contact Condensation of Steam to Subcooled Water Spray, *Journal of Heat Transfer*, 2001, roč. 123, s. 703–710
- Terasaka, K., Sun, W. Y., Prakoso, T., Tsuge, H., Measurement of heat transfer coefficient for direct contact condensation during bubble growth in liquid, *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 1999, roč. 32, č. 5, s. 594–599
- Thonon, B., Design method for plate evaporators and condensers. *1st International Conference on Process Intensification for the Chemical Industry*, 1995, roč. 18, s. 37-47
- Weinberg S., Heat Transfer to Low Pressure Sprays of Water in a Steam Atmosphere, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 1952, roč. 1B, s. 240-258
- Whalley, P. B., *Boiling, Condensation, and Gas-Liquid Flow*, Oxford, 1990
- Xu, Q., Guo, L., Zou, S., Chen, J., Zhang, X., Experimental study on direct contact condensation of stable steam jet in water flow in a vertical pipe, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2013, roč. 66, s. 808-817

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

Lukáš Pavel, v. r.,

3. června 2021

Kuba, J.: Metodický pokyn č. 1/2009 O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací, ČVUT v Praze, 1. července 2009, <https://www.cvut.cz/sites/default/files/content/d1dc93cd-5894-4521-b799-c7e715d3c59e/cs/20210308-metodicky-pokyn-c-12009-o-dodrzovani-etickyh-principu-pri-priprave-vysokoskolskych.pdf> [3. června 2021]