VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
ENERGY INSTITUTE

TRUBKOVÝ VÝMĚNÍK PRO OHŘEV OBĚHOVÉ VODY

TUBE HEAT EXCHANGER FOR HEATING WATER

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE Bc. ROMAN NOVOTNÝ
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE Doc. Ing. ZDENĚK SKÁLA, CSc.
SUPERVISOR

BRNO 2009

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav
Akademický rok: 2008/09

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Novotný Roman, Bc.

který/která studuje v **magisterském studijním programu**

obor: **Energetické inženýrství (2301T035)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Trubkový výměník pro ohřev oběhové vody.

v anglickém jazyce:

Tube heat exchanger for heating water.

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Navrhnout trubkový výměník teplá voda -vzduch s prouděním vzduchu uvnitř trubek.
hmotnostní průtok vody 4,85kg/s
vstupní teplota vody 50 C
výstupní teplota vody 80 C
hmotnostní průtok vzduchu 5,772kg/s

Cíle diplomové práce:

Navrhout uspořádání výměníku a tepelný výpočet s ohledem na dovolený maximální průtok vody pláštěm výměníku.

Seznam odborné literatury:

Černý,V. akol.:Parní kotle,technický průvodce ,č32,SNTL Praha 1985
Budaj,F.:Podklady pro tepelný vápočet kotle,VUT v Brně,1993

Vedoucí diplomové práce:doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2008/09.

V Brně, dne 29.10.2008

L.S.

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ DĚKANÁT

doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.
Ředitel ústavu

doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Cieľom diplomovej práce je podľa zadaných a zvolených hodnôt navrhnúť výmenník tepla vzduch - voda s prúdením vzduchu vo vnútri trubiek a s vystriedaným usporiadaním trubiek. Ďalšou úlohou bolo vypočítať súprúdny a protiprúdny variant, tlakové straty na strane vzduchu a vody a geometrické rozmery vstupných a výstupných hrdiel.

Kľúčové slová: tepelný výmenník, teplo-zmenná plocha, tlaková strata, voda, vzduch, tepelný výkon

ABSTRACT

Target of the master´ thesis is a design of heat exchanger air-water with the air flowing inside the pipes and with staggered pipe configuration, based on the engaged and chosen values. Next target is to determine heat exchanger with cross parallel flow and cross countercurrent flow of mediums, pressure drop on both sides air and water and dimensions of intake and outgoing gate on both sides air and water.

Key words: heat exchanger, heat exchange surface, pressure drop, water, air, heat capacity

NOVOTNÝ, R. *Trubkový výměník pro ohřev oběhové vody.*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 57 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.

ČESTNÉ PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že som túto diplomovú prácu vypracoval samostatne bez cudzej pomoci. Vychádzal som pri tom zo svojich znalostí, odborných konzultácií a použitej literatúry, uvedenej v zozname.

V Brne dňa 26. Mája 2009 .....

Podpis

POĎAKOVANIE

Rád by som poďakoval konzultantovi Ing. Jaroslavovi Studničkovi z firmy ALSTOM Power, s.r.o., ALSTOM Group za cenné rady, pripomienky k danej problematike a trpezlivosť pri konzultáciách. Ďalej by som rád poďakoval vedúcemu diplomovej práce Doc. Ing. Zdeňkovi Skálovi, CSc., za všetky jeho rady a pomoc. Za objasnenie formálnych náležitostí obsahu diplomovej práce ďakujem doc. Ing. Jiřímu Pospíšilovi, Ph.D. V neposlednej rade ďakujem svojej rodine, všetkým priateľom a známym za podporu počas celého štúdia.

Obsah

1.ÚVOD 8
1.1 Definícia výmenníku tepla 8
2. ROZDELENIE VÝMENNÍKOV TEPLA 8
2.1 Podľa procesu predania tepelnej energie 8
2.2 Podľa vzájomného smeru a prúdenia pracovných médií 9
2.3 Podľa účelu a použitia 10
2.4 Podľa konštrukčného riešenia teplo-zmenných plôch 10
2.5 Podľa kombinácie pracovných médií 11
3. ZÁKLADNÉ POŽIADAVKY NA VÝMENNÍK TEPLA 11
4. VÝPOČET VÝMENNÍKU TEPLA 11
4.1 Tepelný výkon výmenníku 11
4.2 Súčiniteľ prestupu tepla na strane vzduchu 13
4.3 Rovnica závislosti mernej tepelnej kapacity vzduchu na teplote 14
4.4 Súčiniteľ prestupu tepla na strane vody 15
4.5 Rovnica závislosti mernej tepelnej kapacity vody na teplote 16
5. POSTUP VÝPOČTU PRI URČENÍ TEPLOTY VZDUCHU NA KONCI VÝMENNÍKU 18
5.1 Geometrický výpočet výmenníku 20
5.2 Výpočet súčiniteľu prestupu tepla 22
5.3 Výpočet vzdialenosti prepážiek 22
5.4 Výpočet ukončenia prepážiek 24
5.5 Výpočet teploty vzduchu na konci výmenníku pre súprúdny výmenník 26
5.6 Výpočet teploty vzduchu na konci výmenníku pre protiprúdny výmenník 36
6. TLAKOVÉ STRATY 44
6.1 Tlaková strata na strane vzduchu pre súprúdny variant 44
6.2 Tlaková strata na strane vody pre súprúdny variant 46
6.3 Tlaková strata na strane vzduchu pre protiprúdny variant 47
6.4 Tlaková strata na strane vody pre protiprúdny variant 48
7. VÝPOČET GEOMETRICKÝCH PARAMETROV HRDIEL 49
7.1 Výpočet vstupného hrdla na strane vody 49
7.2 Výpočet výstupného hrdla na strane vody 50

7.3 Výpočet vstupného hrdla na strane vzduchu 51
7.4 Výpočet výstupného hrdla na strane vzduchu 52
8. ZÁVER 54
Zoznam použitej literatúry 55
Zoznam použitých symbolov 56
Zoznam použitých indexov 57
Zoznam výkresovej dokumentácie 57

1.ÚVOD

1.1 Definícia výmenníku tepla

Vo veľkom množstve inžinierskych aplikácií sa objavuje kontinuálny alebo prerušovaný prenos tepelnej energie medzi dvomi teplonosnými médiami s rôznymi teplotami s oddelenými priestormi pevnou valcovou alebo rovinnou stenou. Zariadenie, v ktorom dochádza k takémuto prenosu tepelnej energie, sa nazýva výmenník tepla. Tepelné výmenníky patria k jedným z najdôležitejších zariadení v energetike. Technická úroveň a konštrukcia výmenníkov tepla má často veľký vplyv na účinnosť a ekonomickú rentabilitu energetického zariadenia.

2. ROZDELENIE VÝMENNÍKOV TEPLA

Podľa literatúry [4], [8] a [9].

Najčastejšie používanými pracovnými médiami pre výmenníky tepla v energetických zariadeniach sú:

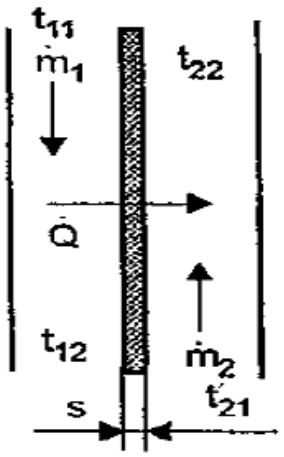
- Voda
- Vodná para
- Spaliny
- Vzduch

Výmenníky tepla rozdeľujeme podľa niekoľkých základných kritérií.

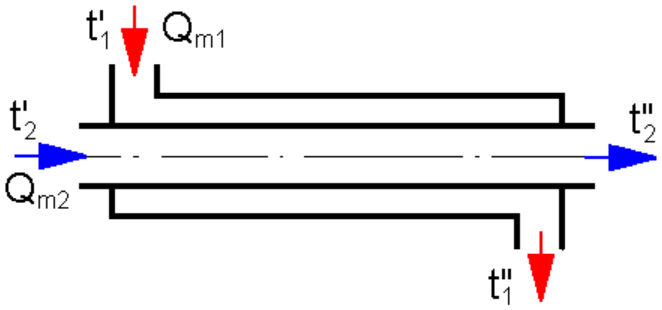
2.1 Podľa procesu predania tepelnej energie

Podľa literatúry [4], [8] a [9].

- Rekuperačné výmenníky – obe pracovné médiá, ohrievacie i ohrievané, sú trvale oddelené pevnou nepriepustnou stenou. Uplatňuje sa prenos tepelnej energie vedením.

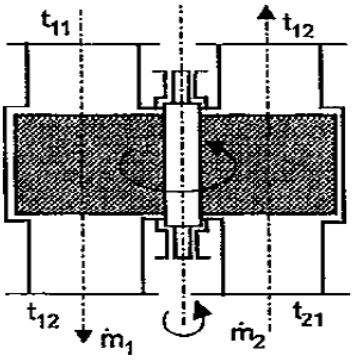


Obr.1: Typ rekuperačného výmenníku [4]

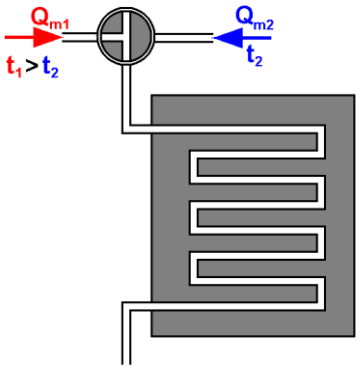


Obr. 2 Typ rekuperačného výmenníku [13]

- Regeneračné výmenníky – teplo-zmenný element je striedavo, s určitým časovým posunom omývaný oboma pracovnými médiami. Teplo-zmenný element prijíma teplo od ohrievacieho média a predáva ho ohrievanému médiu. Uplatňuje sa prenos tepelnej energie akumuláciou.

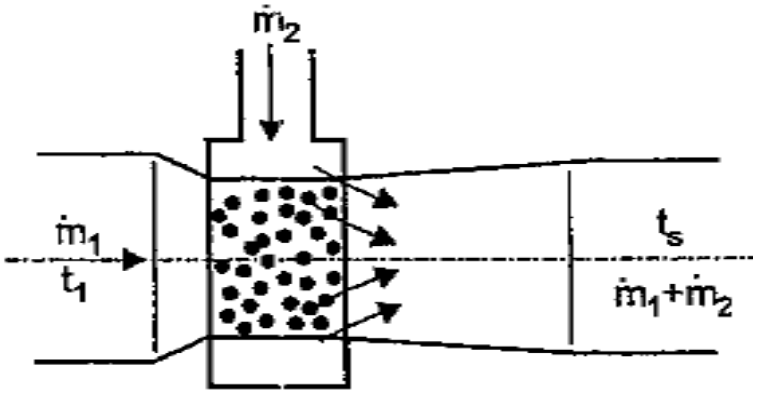


Obr.3: Typ regeneračného výmenníku [4]



Obr.4: Typ regeneračného výmenníku [13]

- Zmiešavacie výmenníky – výmena tepelnej energie pomocou zmiešania ohrievacieho a ohrievaného média bez teplo-zmenného elementu alebo plochy.



Obr.5: Zmiešavací výmenník [4]

2.2 Podľa vzájomného smeru a prúdenia pracovných médií

Podľa literatúry [4], [8] a [9].

- Súprúdné výmenníky – smery prúdenia ohrievacieho a ohrievaného pracovného média sú rovnobežné a v rovnako orientovanom zmysle.
- Protiprúdne výmenníky - smery prúdenia ohrievacieho a ohrievaného pracovného média sú rovnobežné, ale v opačne orientovanom zmysle.

- Krížové výmenníky – smery prúdenia ohrievacieho a ohrievaného média sú mimobežné a v kolmom priemete spolu zvierajú uhol 90°
- Krížové kombinované výmenníky – viacnásobná kombinácia súprúdneho, protiprúdneho a krížového prúdenia ohrievacieho a ohrievaného média

2.3 Podľa účelu a použitia

Podľa literatúry [4], [8] a [9].

- Ohrieváky – dochádza v nich k zvyšovaniu teploty ohrievaného média bez zmeny fáze média
- Chladiče – dochádza v nich k znižovaniu teploty média bez zmeny fáze
- Výparníky – ohrievané kvapalné médium sa mení na paru
- Kondenzátory – teplejšie médium v parnej fáze sa mení na kvapalnú fázu – kondenzuje
- Prehrieváky (medziprehrieváky) – privádza sa v nich teplo mokrej pare (izotermicko-izobarický dej), ktorá sa dostáva na medzu sýtosti a získame sýtu paru
- Sušiarne – dochádza k znižovaniu vlhkosti pevnej fáze prísunom tepla
- Vykurovacie telesá ústredného kúrenia – dochádza pri nich k ohrevu okolitého vzduchu. Prenos tepla sálaním.

2.4 Podľa konštrukčného riešenia teplo-zmenných plôch

Podľa literatúry [4], [8] a [9].

- Trubková výmenníky – pozostávajú z hladkých alebo rebrovaných trubiek. Trubky sú najčastejšie kruhového prierezu. Prevedenie trubiek vo zväzku, z trubkových hadov alebo ako trubka v trubke.

Prevedenie trubkového zväzku:

  - Priame trubky – vystriedané usporiadanie trubiek vo zväzku alebo usporiadanie trubiek za sebou (v zákryte)
  - U trubky
  - Trubky v tvare ohýbaných hadov
  - Trubky v tvare špirály
  - Trubky vinuté do skrutkovnice
- Doskové výmenníky – tvorené sústavou tenkých dosiek usporiadaných husto za sebou.

Teplo-zmenný povrch môže byť je tvorený:

  - profilovaná rovinná doska
  - špirálovo vinutá doska
  - rebrovaná doska
- Výmenníky bez teplo-zmenných plôch – zmiešavacie výmenníky

2.5 Podľa kombinácie pracovných médií

Podľa literatúry [4], [8] a [9].

Najčastejšie kombinácie pracovných médií vo výmenníkoch

- Voda- voda
- Para – voda
- Para – vzduch
- Para – olej
- Spaliny – para
- Spaliny – voda
- Spaliny – vzduch

3. ZÁKLADNÉ POŽIADAVKY NA VÝMENNÍK TEPLA

Podľa literatúry [4], [8] a [9].

- Kompaktnosť – čo najmenšie rozmery, hmotnosť a z toho vyplývajúca čo najnižšia cena
- Minimalizácia tlakových strát
- Spoľahlivosť prevádzky – minimalizácia ekonomických strát
- Jednoduchosť údržby a vymeniteľnosť prvkov
- Splnenie obmedzení prepravitelnosti, montáže a možnosti výroby

4. VÝPOČET VÝMENNÍKU TEPLA

4.1 Tepelný výkon výmenníku

Zadané hodnoty:

Hmotnostný prietok vzduchu	M_{VZD} = 5,772 kg/s
Hmotnostný prietok vody	M_W = 4,850 kg/s
Teplota vzduchu na vstupe	t_{VZD_1} = 227 °C
Teplota vody na vstupe	t_{W_1} = 50 °C
Teplota vody na výstupe	t_{W_2} = 80 °C
Dovolený tlak na strane vzduchu	p_{VZD_DOV} = 0,4 Bar(g)
Dovolený tlak na strane vody	p_{W_DOV} = 6 Bar(g)

Dovolená teplota na strane vzduchu	t_{W_DOV} = 250 °C
Dovolená teplota na strane vzduchu	t_{VZD_DOV} = 100 °C
Rozmer teplo-zmenných trubiek	Ø25,4 x 1,5 mm
Materiál trubiek	St 45.8 (12 022.1)
Výkon výmenníku	
Prevádzkový tlak vzduchu(volím)	p_{VZD_PR} = 1,3 Bar(abs)
Prevádzkový tlak vody(volím)	p_{W_PR} = 5 Bar(abs)

Stredná hodnota teploty vody

$$t_{W_STR} = \frac{t_{W_1} + t_{W_2}}{2} = \frac{50+80}{2} = 65°C \tag{4-0}$$

Stredná hodnota tlaku vody

$$p_{W_STR} = \frac{p_{W_1} + p_{W_2}}{2} = \frac{5+4{,}95}{2} = 4{,}975bar \tag{4-1}$$

Hodnoty vody určené pre teplotu 65°C a tlak 4,975 Bar

- Merná tepelná kapacita vody c_{P_W} = 4,184294096 kJ/kgK

Hodnoty vody určené pre teplotu 227°C a tlak 1,3 Bar

- Merná tepelná kapacita vzduchu c_{P_VZD} = 1,03032 kJ/kgK

Výkon výmenníku

- Vypočítaný pomocou rovnice tepelnej bilancie

$$\dot{Q}_b = M_W.c_{P_W}.(t_{W_1} - t_{W_2}) = M_{VZD}.c_{P_VZD}.(t_{VZD_1} - t_{VZD_2}) \tag{4-2}$$

$$\dot{Q}_b = 608{,}815kW \tag{4-3}$$

$$t_{VZD_2} = t_{VZD_1} - \frac{\dot{Q}_b}{M_{VZD}.c_{P_VZD}} = 124{,}63°C \tag{4-4}$$

Stredná hodnota teploty vzduchu

$$t_{VZD_STR} = \frac{t_{VZD_1} + t_{VZD_2}}{2} = \frac{227 + 124{,}63}{2} = 175{,}813°C \tag{4-5}$$

Stredná hodnota tlaku vody

$$p_{VZD_STR} = \frac{p_{VZD_1} + p_{VZD_2}}{2} = \frac{1{,}3 + 1{,}29}{2} = 1{,}295bar \tag{4-6}$$

4.2 Súčiniteľ prestupu tepla na strane vzduchu

Hodnoty vzduchu určené pre teplotu 175,81 °C a tlak 1,295 Bar(abs)

Hustota vzduchu	ρ = 0,98523kg/m^3
Kinematická viskozita	ν = 3,398x10^{-5} m^2/s
Prandtlovo číslo	Pr = 0,68
Súčiniteľ tepelnej vodivosti	λ = 0,0372 W/mK

Rýchlosť vzduchu (volím) $w_{VZD} = 16m/s$

Reynoldsovo číslo

- Vyjadruje pomer trecích a zotrvačných síl

$$\mathrm{Re} = \frac{w_{VZD}.d}{\nu_{VZD}} = \frac{16.0{,}0224}{3{,}398.10^{-5}} = 10547{,}243 \tag{4-7}$$

Nusseltovo číslo

- Vyjadruje pomer charakteristického rozmeru telesa a hrúbky izolujúcej medznej vrstvy

$$Nu = 0{,}023.\mathrm{Re}^{0{,}8}.\mathrm{Pr}^{0{,}4} = 32{,}601[-] \tag{4-8}$$

Súčiniteľ prestupu tepla konvekciou

$$\alpha_{VZD} = \frac{Nu.\lambda_{VZD}}{d} = \frac{30{,}961.0{,}0372}{0{,}0224} = 54{,}13W/m^2K \tag{4-9}$$

4.3 Rovnica závislosti mernej tepelnej kapacity vzduchu na teplote

Pre určenie rovnice závislosti mernej tepelnej kapacity vzduchu na teplote som využil program MS Excel, čím sa výpočet zjednodušil.

Teplota vzduchu [°C]	Cp [kJ/kgK]
25	1,00751625
50	1,00836875
100	1,01222125
200	1,02614750
300	1,04607375
400	1,06907375
500	1,09307375

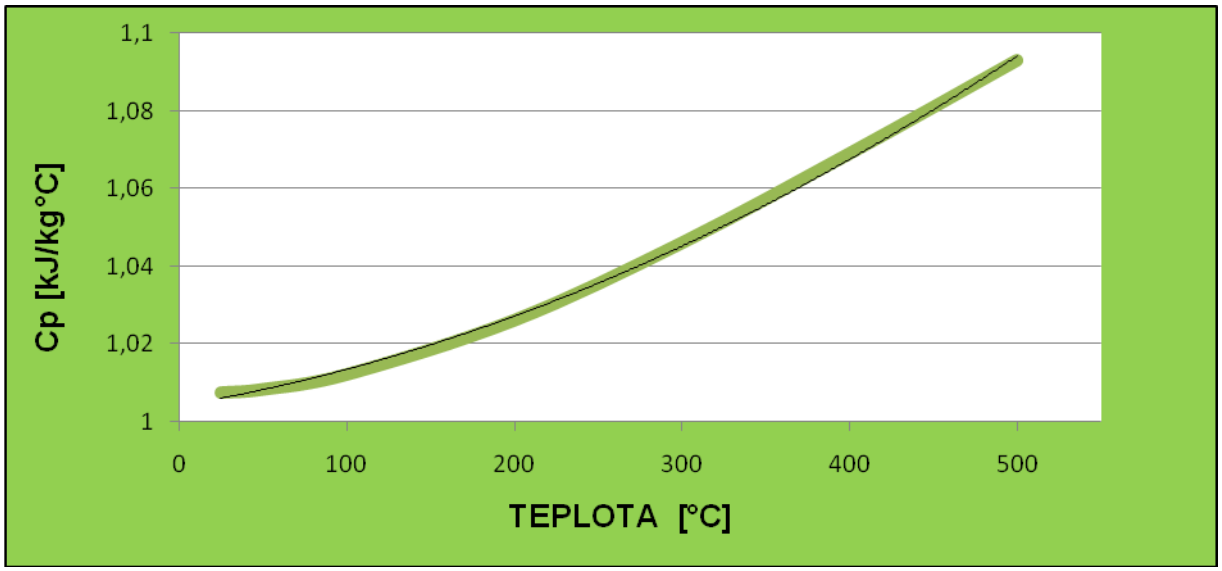
Tab. 1: Hodnoty mernej tepelnej kapacity vzduchu pre tlak 1,295 Bar (abs)

Pomocou týchto hodnôt som zostrojil graf . Výslednú krivku som preložil spojnicou trendov, ktorá mi pomohla určiť rovnicu závislosti.

Ako spojnicu trendov som zvolil polynomickú funkciu tretieho stupňa, ktorá najviac vyhovovala pri spätnej kontrole hodnôt mernej tepelnej kapacity k zadaným hodnotám.

Pre minimalizáciu výchyliek hodnôt mernej tepelnej kapacity vzduchu určených pomocou rovnice spojnice trendov k zadaným hodnotám mernej tepelnej kapacity vzduchu som rovnicu upravil.

Po úprave rovnicu závislosti použijem na výpočet výstupnej teploty vzduchu z výmenníku.



Obr.6:Graf závislosti mernej tepelnej kapacity vzduchu na teplote

Rovnica spojnice trendov

$$c_{P_VZD} = 2{,}156.10^{-6} t_{VZD}^2 + 7{,}18712.10^{-5} t_{VZD} + 1{,}0042915365 \qquad (4\text{-}10)$$

Rovnica spojnice trendov po úprave

$$c_{P_VZD} = 2{,}156.10^{-6} t_{VZD}^2 + 7{,}18712.10^{-5} t_{VZD} + 1{,}0117733 \qquad (4\text{-}11)$$

Kontrola odchyliek mernej tepelnej kapacity vzduchu vypočítanej pomocou upravenej rovnice spojnice trendov k zadaným hodnotám mernej tepelnej kapacity vzduchu

Teplota vzduchu [°C]	**Cp zadané [kJ/kgK]**	**Cp rovnice [kJ/kgK]**	**Odchylka**
25	1,00751625	1,01357008	$6{,}0.10^{-3}$
50	1,00836875	1,01536686	$6{,}9.10^{-3}$
100	1,01222125	1,01896042	$6{,}7.10^{-3}$
200	1,02614750	1,02614754	$4{,}0.10^{-8}$
300	1,04607375	1,03333466	$1{,}2.10^{-2}$
400	1,06907375	1,04052178	$2{,}8.10^{-2}$
500	1,09307375	1,04770890	$4{,}5.10^{-2}$

Tab.2: Kontrola odchyliek mernej tepelnej kapacity vzduchu

4.4 Súčiniteľ prestupu tepla na strane vody

Hodnoty vody určené pre teplotu 65°C a tlak 4,975 Bar (abs)

- Hustota vzduchu $\rho = 980{,}739$ kg/m^3
- Dynamická viskozita $\mu = 43{,}336 \times 10^{-5}$ P.s
- Kinematická viskozita $\nu = 44{,}19 \times 10^{-8}$ m^2/s
- Prandtlovo číslo Pr = 2,766
- Súčiniteľ tepelnej vodivosti $\lambda = 0{,}656$ W/mK

Rýchlosť vzduchu (volím) $w_W = 1 m/s$

Reynoldsovo číslo

- Vyjadruje pomer trecích a zotrvačných síl

$$\mathrm{Re} = \frac{w_W . d}{\nu_W} = \frac{1.0{,}0254}{44{,}19.10^{-8}} = 57482{,}517 \qquad (4\text{-}7)$$

Nusseltovo číslo

- Vyjadruje pomer charakteristického rozmeru telesa a hrúbky izolujúcej medznej vrstvy

$$Nu = 0{,}26.\mathrm{Re}^{0{,}6}.\mathrm{Pr}^{0{,}37} = 271{,}753 \qquad (4\text{-}8)$$

Súčiniteľ prestupu tepla konvekciou

$$\alpha_W = \frac{Nu.\lambda_W}{D} = \frac{271{,}753.0{,}656}{0{,}0254} = 7014{,}185 W/m^2K \qquad (4\text{-}9)$$

4.5 Rovnica závislosti mernej tepelnej kapacity vody na teplote

Pre určenie rovnice závislosti mernej tepelnej kapacity vody na teplote som využil program MS Excel, čím sa výpočet zjednodušil.

Teplota vody [°C]	**c_P [kJ/kgK]**
20	4,183562185
40	4,177576588
60	4,181881295
80	4,194646810
100	4,215732226
120	4,245606853

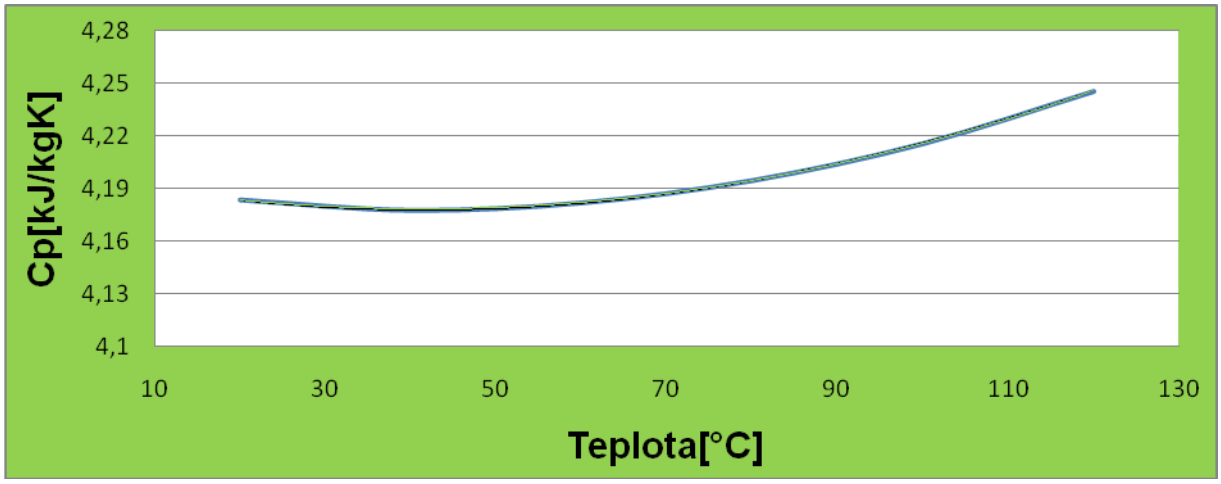
Tab.3: Hodnoty mernej tepelnej kapacity vody pre tlak 4,975 Bar (abs)[2]

Pomocou týchto hodnôt som zostrojil graf . Výslednú krivku som preložil spojnicou trendov, ktorá mi pomohla určiť rovnicu závislosti.

Ako spojnicu trendov som zvolil polynomickú funkciu tretieho stupňa, ktorá najviac vyhovovala pri spätnej kontrole hodnôt mernej tepelnej kapacity k zadaným hodnotám.

Pre minimalizáciu odchyliek hodnôt mernej tepelnej kapacity vody určených pomocou rovnice spojnice trendov k zadaným hodnotám mernej tepelnej kapacity vody by bolo vhodné rovnicu upraviť avšak v tomto prípade výsledná rovnica z hľadiska odchyliek vyhovuje.

Rovnicu závislosti použijem na výpočet výstupnej teploty vzduchu z výmenníku.



Obr.7: Graf závislosti mernej tepelnej kapacity vzduchu na teplote

Rovnica spojnice trendov

$$c_P = 1{,}1.10^{-5} t_W^2 - 9{,}1521.10^{-4} t_W + 4{,}19715941 \tag{4-12}$$

Kontrola odchyliek mernej tepelnej kapacity vzduchu vypočítanej pomocou upravenej rovnice spojnice trendov k zadaným hodnotám mernej tepelnej kapacity vzduchu

Teplota vody [°C]	C_P zadané [kJ/kgK]	Cp rovnice [kJ/kgK]	Odchylka
20	4,183562185	4,18325521	$-3{,}0.10^{-4}$
40	4,177576588	4,17815101	$5{,}7.10^{-4}$
60	4,181881295	4,18184681	$-3{,}4.10^{-5}$
80	4,194646810	4,19434261	$-3{,}0.10^{-4}$
100	4,215732226	4,21563841	$-9{,}4.10^{-5}$
120	4,245606853	4,24573421	$-1{,}2.10^{-4}$

Tab.4: Kontrola odchyliek mernej tepelnej kapacity vody

5. POSTUP VÝPOČTU PRI URČENÍ TEPLOTY VZDUCHU NA KONCI VÝMENNÍKU

Pri výpočte teploty vzduchu na konci výmenníku s trojuholníkovým usporiadaním trubiek som využil priebeh teplôt podľa teplo-zmennej plochy pomocou lit. [11]

Pre vyjadrenie priebehu teplôt vo výmenníku tepla platia súčasne rovnice:

1. Rovnica tepelnej bilancie

$$\Delta Q = M_A.c_A.\Lambda t_A = M_B.c_B.\Delta t_B \tag{5-1}$$

- M [kg/s] - hmotnostné prietoky médií
- c [kJ/kg.K] - merná tepelná kapacita médií

2. Rovnica prenosu tepla

$$\Delta Q = k.\Delta S.(t_A - t_B) \tag{5-2}$$

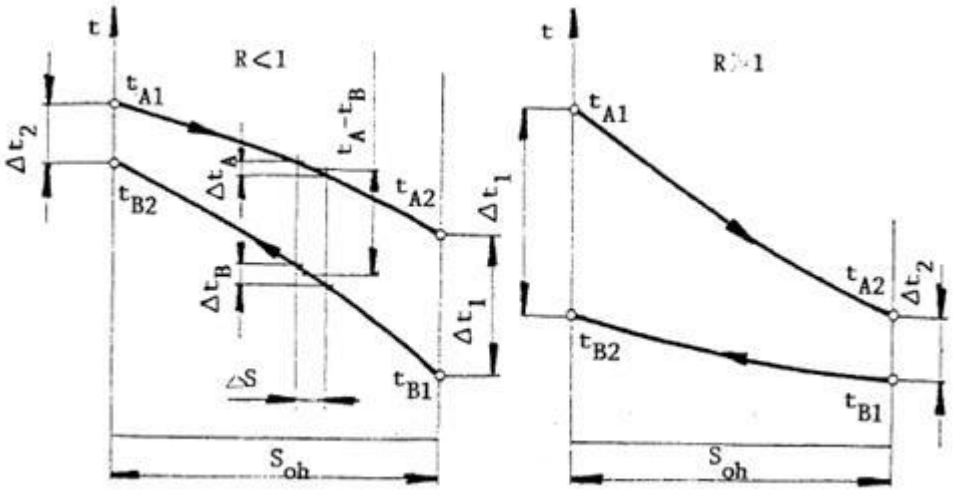
- ΔS [m^2] - zvolená malá časť teplo-zmennej plochy
- k [W/m^2.K] - súčiniteľ prestupu tepla

Získame rovnice:

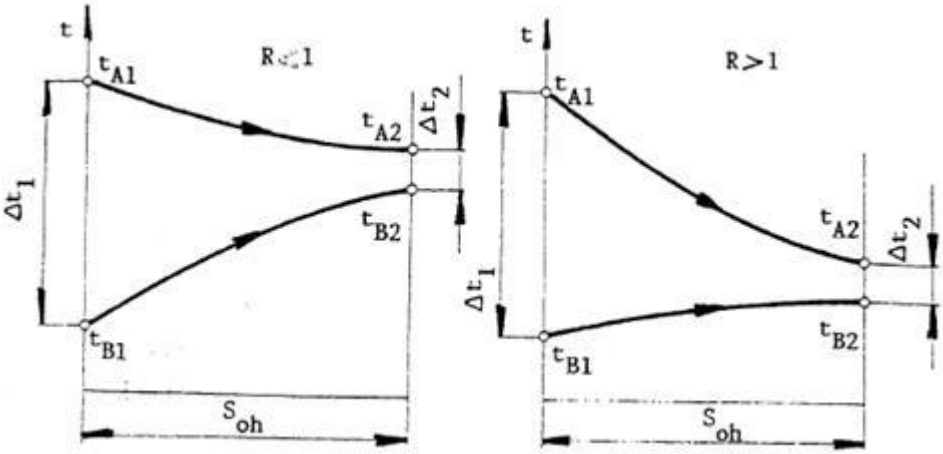
$$\Delta t_A = \frac{k.\Delta S}{M_A.c_A}\left(t_A - t_B\right) \tag{5-3}$$

$$\Delta t_B = \frac{k.\Delta S}{M_B.c_B}\left(t_A - t_B\right) \tag{5-4}$$

Ako malú časť uvažovanej teplo-zmennej plochy ΔS volím povrch trubiek o dĺžke ΔL medzi trubkovnicami.



Obr.8: Graf priebehu teplôt pri protiprúdnom výmenníku[11]



Obr.9: Graf priebehu teplôt pri protiprúdnom výmenníku[11]

Postup výpočtu v programe MS Excel:

Úsek ΔS	1
t_{VZD} *povôdná [°C]*	t_{VZD}
c_{P_VZD} *[J/kg.K]*	$2{,}156.10^{-6} t_{VZD}^2 + 7{,}18712.10^{-5} t_{VZD} + 1{,}0117733$
T_{VZD} *povôdná [°C]*	$t_{VZD} + 273{,}15$
ΔT_{VZD} *[K]*	$\frac{k.\Delta S/2}{M_{VZD}.c_{P_VZD}}.[(t_{VZD} + 273{,}15) - (t_W + 273{,}15)]$
T_{VZD} *vypočítaná[K]*	$(t_{VZD} + 273{,}15) - \Delta T_{VZD}$
t_{VZD} *vypočítaná[°C]*	$[(t_{VZD} + 273{,}15) - \Delta T_{VZD}] - 273{,}15$

Tab.5: Vstupné hodnoty iteračného výpočtu na strane vzduchu

Úsek ΔS	1
t_{VZD} *povôdná [°C]*	t_{VZD}
c_{P_VZD} *[J/kg.K]*	$2{,}156.10^{-6} t_{VZD}^2 + 7{,}18712.10^{-5} t_{VZD} + 1{,}0117733$
T_{VZD} *povôdná [°C]*	$t_{VZD} + 273{,}15$
ΔT_{VZD} *[K]*	$\frac{k.\Delta S/2}{M_{VZD}.c_{P_VZD}}.[(t_{VZD} + 273{,}15) - (t_W + 273{,}15)]$
T_{VZD} *vypočítaná[K]*	$(t_{VZD} + 273{,}15) - \Delta T_{VZD}$
t_{VZD} *vypočítaná[°C]*	$[(t_{VZD} + 273{,}15) - \Delta T_{VZD}] - 273{,}15$

Tab.6: Vstupné hodnoty iteračného výpočtu na strane vody

V každom ďalšom kroku budú t_{VZD} *vypočítaná[°C]* a t_{VZD} *vypočítaná[°C]* vstupnými hodnotami teplôt v nasledujúcom kroku výpočtu pre úsek *ΔS*.

Týmto postupom výpočtu budem pokračovať pokým sa nepriblížim hodnote teploty vody na vstupe do výmenníku.

5.1 Geometrický výpočet výmenníku

Prietočný prierez výmenníku

$$S_{VYM} = \frac{M}{\rho.v_{VZD}} = \frac{5{,}772}{0{,}985.16} = 0{,}366 m^2 \tag{5-5}$$

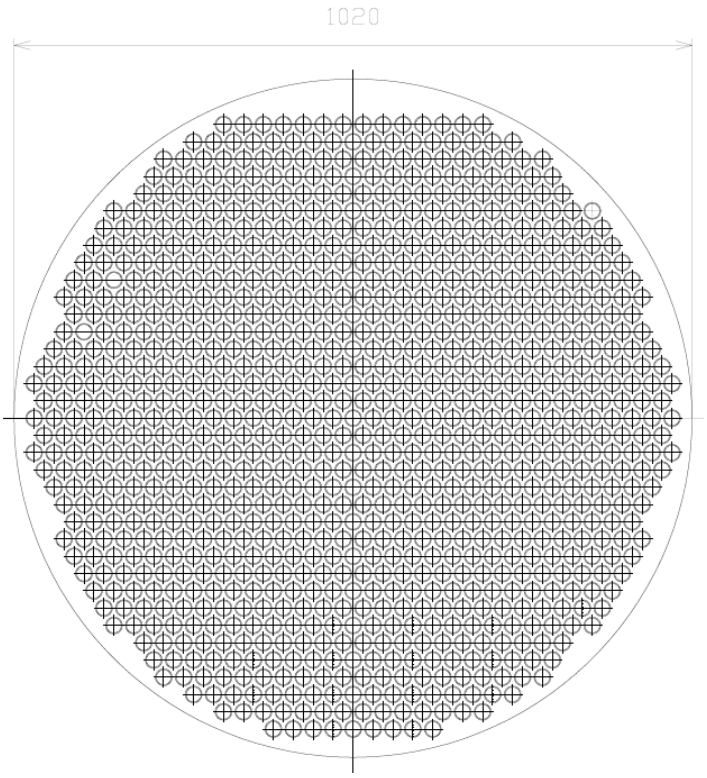
Prietočný prierez trubky

$$S_{TR} = \frac{\pi.d^2}{4} = \frac{\pi.0{,}0224^2}{4} = 0{,}394.10^{-3} m^2 \tag{5-6}$$

Výpočet potrebného počtu trubiek výmenníku tepla

$$n_{TR} = \frac{S_{VYM}}{S_{TR}} = \frac{0,366}{0,394.10^{-3}} = 930[-] \tag{5-7}$$

Z dôvodu symetrie rozmiestnenia trubiek v priestore výmenníku som zvolil počet trubiek $n_{TR} = 934[-]$.



Obr.10: Rozmiestnenie trubiek v trubkovom zväzku

Navýšenie počtu trubiek ovplyvní rýchlosť prúdenia vzduchu v trubkách

$$v_{VZD} = \frac{M}{\rho.S_{TR}.n_{TR}} = \frac{5,772}{0,985.0,394.10^{-3}.934} = 15,916 m/s \tag{5-8}$$

Zmena rýchlosti ovplyvní zmenu *Re ,Nu,* α_{VZD} *,R a k.*

$$\mathrm{Re} = \frac{w_{VZD}.d}{\nu_{VZD}} = \frac{15,916.0,0224}{3,398.10^{-5}} = 10492,039 \tag{5-9}$$

$$Nu = 0,023.\mathrm{Re}^{0,8}.\mathrm{Pr}^{0,4} = 32,465[-] \tag{5-10}$$

$$\alpha_{VZD} = \frac{Nu.\lambda_{VZD}}{d} = \frac{32,464.0,0372}{0,0224} = 53,907 W/m^2K \tag{5-11}$$

5.2 Výpočet súčiniteľu prestupu tepla

Odpor proti prestupu tepla

$$\begin{aligned} R &= \frac{1}{\alpha_{VZD}.d} + \frac{D}{2\lambda_{OC}}\ln\left(\frac{D}{d}\right) + \frac{1}{\alpha_W.D} = \\ &= \frac{1}{53,907.0,0224} + \frac{0,0254}{2.45}\ln\left(\frac{0,0254}{0,0224}\right) + \frac{1}{7014,185.0,0254} = \\ &= 0,835153287 m^2.K/W \end{aligned} \tag{5-12}$$

- Súčiniteľ tepelnej vodivosti steny trubky $\lambda_{OC} = 45 W/m^2.K$

Súčiniteľ prestupu tepla

$$k = \frac{1}{R} = \frac{1}{0,835153287} = 47,14114088 \text{ W/m}^2.K \tag{5-13}$$

Predbežný výpočet teploty vzduchu na výstupe z výmenníku

Pozri kapitolu 4.1, vzťahy 4-2 až 4-4.

5.3 Výpočet vzdialenosti prepážiek

Rozteč trubiek volím $s = 30[mm]$

Priemerná šírka celkovej medzery $L_{PRIEM} = 0,19264[mm]$

Prepočet hmotnostného toku

$$M' = \frac{M}{\rho_{W_STR}} = \frac{4,85}{988,220802} = 4,908.10^{-3} m^3/s \tag{5-14}$$

Vzdialenosť prepážiek

$$L_{PREP} = \frac{\frac{M'}{v_W}}{L_{PRIEM}} = \frac{\frac{4{,}908.10^{-3}}{1}}{0{,}19264} = 0{,}025m \tag{5-15}$$

Hrúbku plechu prepážiek volím $t = 8[mm]$

Šírka teplo-zmenného segmentu

$$\Delta L = L_{PREP} + t = 0{,}025 + 0{,}008 = 0{,}033m \tag{5-16}$$

Rady trubiek	Počet trubiek v rade	Počet medzier	Medzitrubková medzera	Plášť <-> Trubka	Celková medzera
vrchná 1.	14	13	0,0598	0,04769	0,15518
2.	17	16	0,0736	0,04310	0,15980
3.	20	19	0,0874	0,03157	0,15054
4.	21	20	0,0920	0,04507	0,18214
5.	22	21	0,0966	0,05469	0,20598
6.	23	22	0,1012	0,03115	0,16350
7.	24	23	0,1058	0,03494	0,17568
8.	27	26	0,1196	0,03639	0,19238
9.	28	27	0,1242	0,03576	0,19572
10.	29	28	0,1288	0,03324	0,19528
11.	30	29	0,1334	0,02898	0,19136
12.	29	28	0,1288	0,05309	0,23498
13.	30	29	0,1334	0,04568	0,22476
14.	31	30	0,1380	0,03680	0,21160
15.	32	31	0,1426	0,02650	0,19560
16.	33	32	0,1472	0,01484	0,17688
17.	32	31	0,1426	0,03183	0,20626
stredná 18.	33	32	0,1472	0,01749	0,18218
19.	32	31	0,1426	0,03183	0,20626
20.	33	32	0,1472	0,01484	0,17688
21.	32	31	0,1426	0,02650	0,19560
22.	31	30	0,1380	0,03680	0,21160
23.	30	29	0,1334	0,04568	0,22476
24.	29	28	0,1288	0,05309	0,23498
25.	30	29	0,1334	0,02898	0,19136
26.	29	28	0,1288	0,03324	0,19528
27.	28	27	0,1242	0,03576	0,19572
28.	27	26	0,1196	0,03639	0,19238
29.	26	25	0,1150	0,06494	0,24488
30.	25	24	0,1104	0,06115	0,23270
31.	22	21	0,0966	0,05469	0,20598

Pokračovanie na ďalšej strane

32.	21	20	0,0920	0,04507	0,18214
33.	20	19	0,0874	0,03157	0,15054
34.	17	16	0,0736	0,04310	0,15980
35.	14	13	0,0598	0,04769	0,15518
spodná 36.	9	8	0,0368	0,07125	0,17930

Tab.7: Geometrická parametre trubkového zväzku

5.4 Výpočet ukončenia prepážiek

Vstupné parametre

- Prierez trubky $S_{tr} = 5{,}06.10^{-4}\left[m^2\right]$
- Stredový uhol $\alpha = 47°$
- Polomer plášťa $r_{PL} = 0{,}51\left[m\right]$

Výpočet kruhovej úseče

V kruhovej úseči dochádza k prechodu prúdu vody do ďalšej prepážky. Prietočný prierez kruhovej úseče by mal byť približne rovnaký ako priemerný prietočný prierez medzi trubkami kvôli minimálnej zmene prietočnej rýchlosti vody.

Koniec prepážky volím do osi poslednej rady trubiek.

Počet trubiek v poslednej rade $n_{tr} = 9\left[-\right]$.

Plocha kruhovej úseče s trubkami

$$S_{ÚStr} = \frac{1}{2} r^2 . \left(\frac{\pi.\alpha}{180} - \sin\alpha \right) = \frac{1}{2} .0{,}51^2 . \left(\frac{\pi.47}{180} - \sin 47°) \right) = \\ = 0{,}0115 m^2 \tag{5-17}$$

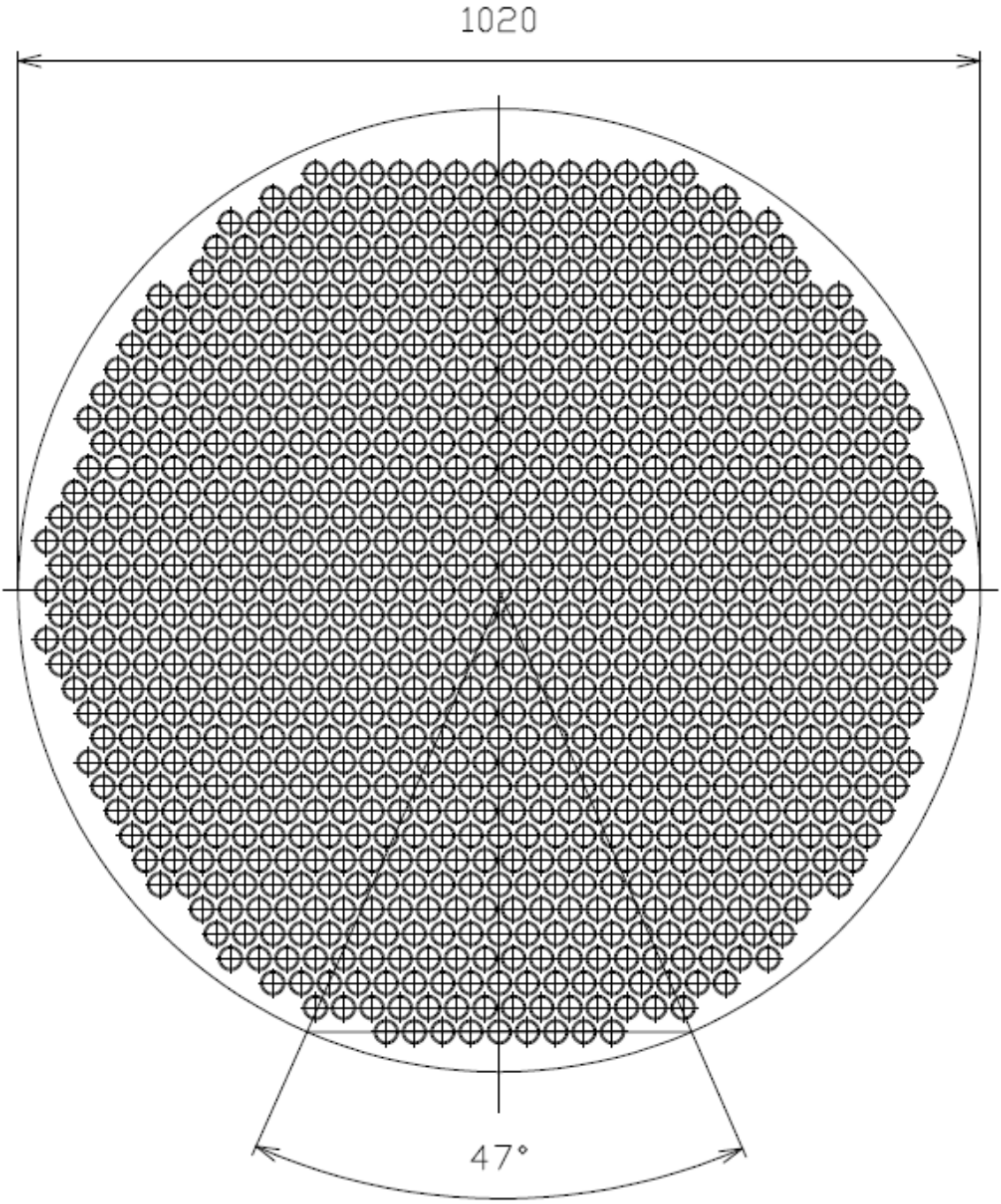
Plocha trubiek

$$S_{n.tr} = \frac{S_{tr}.n_{tr}}{2} = \frac{5{,}06.10^{-4}.9}{2} = 0{,}00228 m^2 \tag{5-18}$$

Plocha kruhovej úseče bez trubiek

$$S_{ÚS} = S_{ÚStr} - S_{n.tr} = 0{,}0115 - 0{,}00228 = 0{,}00928 m^2 \tag{5-19}$$

Priemerný prietočný prierez medzu trubkami $S_{PRIEM} = 0{,}0059\left[m^2\right]$



Obr.č.11: Stredový uhol kruhovej úseče

5.5 Výpočet teploty vzduchu na konci výmenníku pre súprúdny výmenník

Uvažovaná malá časť teplo-zmennej plochy

$$\Delta S = \Delta L.\pi.D.n_{TR} \tag{5-20}$$

- $\Delta L = 0{,}033[m]$
- $D = 0{,}0254[m]$
- $n_{TR} = 934\,[m]$

Tabuľky vypočítaných teplôt

Úsek ΔS	1	2	3	4
t_{VZD} *povôdná [°C]*	227	223,5272858	220,1415316	216,8405918
c_{P_VZD} *[J/kg.K]*	1028,088062	1027,838474	1027,595136	1027,357894
T_{VZD} *povôdná [°C]*	500,15	496,6772858	493,2915316	489,9905918
ΔT_{VZD} *[K]*	3,472714202	3,385754169	3,300939819	3,218219769
T_{VZD} *vypočítaná[K]*	496,6772858	493,2915316	489,9905918	486,772372
t_{VZD} *vypočítaná[°C]*	223,5272858	220,1415316	216,8405918	213,622372

Úsek ΔS	1	2	3	4
t_W *povôdná [°C]*	50	51,00142657	51,97732864	52,92835861
c_{P_W} *[J/kg.K]*	4242,91991	4243,836426	4244,729581	4245,599973
T_W *povôdná [°C]*	323,15	324,1514266	325,1273286	326,0783586
ΔT_W *[K]*	1,001426568	0,975902072	0,951029968	0,926793485
T_W *vypočítaná[K]*	324,1514266	325,1273286	326,0783586	327,0051521
t_W *vypočítaná[°C]*	51,00142657	51,97732864	52,92835861	53,85515209

Trubkový výměník pro ohřev oběhové vody

Úsek ⊿S	5	6	7	8
t_{VZD} *povôdná [°C]*	213,622372	210,4848282	207,4259654	204,4438367
c_{P_VZD} *[J/kg.K]*	1027,126596	1026,901097	1026,681253	1026,466924
T_{VZD} *povôdná [°C]*	486,772372	483,6348282	480,5759654	477,5938367
ΔT_{VZD} *[K]*	3,137543795	3,058862799	2,982128797	2,907294893
T_{VZD} *vypočítaná[K]*	483,6348282	480,5759654	477,5938367	474,6865418
t_{VZD} *vypočítaná[°C]*	210,4848282	207,4259654	204,4438367	201,5365418

Úsek ⊿S	5	6	7	8
t_W *povôdná [°C]*	53,85515209	54,75832838	55,63849084	56,49622734
c_{P_W} *[J/kg.K]*	4246,448184	4247,27478	4248,080313	4248,865322
T_W *povôdná [°C]*	327,0051521	327,9083284	328,7884908	329,6462273
ΔT_W *[K]*	0,903176286	0,880162458	0,857736504	0,835883329
T_W *vypočítaná[K]*	327,9083284	328,7884908	329,6462273	330,4821107
t_W *vypočítaná[°C]*	54,75832838	55,63849084	56,49622734	57,33211067

Úsek ⊿S	9	10	11	12
t_{VZD} *povôdná [°C]*	201,5365418	198,7022265	195,9390814	193,2453407
c_{P_VZD} *[J/kg.K]*	1026,257973	1026,054267	1025,855677	1025,662075
T_{VZD} *povôdná [°C]*	474,6865418	471,8522265	469,0890814	466,3953407
ΔT_{VZD} *[K]*	2,834315256	2,763145103	2,693740673	2,626059211
T_{VZD} *vypočítaná[K]*	471,8522265	469,0890814	466,3953407	463,7692815
t_{VZD} *vypočítaná[°C]*	198,7022265	195,9390814	193,2453407	190,6192815

Úsek ⊿S	9	10	11	12
t_W *povôdná [°C]*	57,33211067	58,1466989	58,94053578	59,71415111
c_{P_W} *[J/kg.K]*	4249,630331	4250,37585	4251,102378	4251,810398
T_W *povôdná [°C]*	330,4821107	331,2966989	332,0905358	332,8641511
ΔT_W *[K]*	0,814588228	0,79383688	0,773615334	0,753910003
T_W *vypočítaná[K]*	331,2966989	332,0905358	332,8641511	333,6180611
t_W *vypočítaná[°C]*	58,1466989	58,94053578	59,71415111	60,46806112

Trubkový výměník pro ohřev oběhové vody

Úsek ⊿S	13	14	15	16
t_{VZD} *povôdná [°C]*	190,6192815	188,0592226	185,5635235	183,1305838
c_{P_VZD} *[J/kg.K]*	1025,473337	1025,289342	1025,109973	1024,935115
T_{VZD} *povôdná [°C]*	463,7692815	461,2092226	458,7135235	456,2805838
ΔT_{VZD} *[K]*	2,560058946	2,49569907	2,432939717	2,371741948
T_{VZD} *vypočítaná[K]*	461,2092226	458,7135235	456,2805838	453,9088418
t_{VZD} *vypočítaná[°C]*	188,0592226	185,5635235	183,1305838	180,7588418

Úsek ⊿S	13	14	15	16
t_W *povôdná [°C]*	60,46806112	61,20276876	61,91876414	62,61652476
c_{P_W} *[J/kg.K]*	4252,500384	4253,172796	4253,828082	4254,46668
T_W *povôdná [°C]*	333,6180611	334,3527688	335,0687641	335,7665248
ΔT_W *[K]*	0,734707647	0,715995374	0,697760622	0,679991156
T_W *vypočítaná[K]*	334,3527688	335,0687641	335,7665248	336,4465159
t_W *vypočítaná[°C]*	61,20276876	61,91876414	62,61652476	63,29651592

Úsek ⊿S	17	18	19	20
t_{VZD} *povôdná [°C]*	180,7588418	178,5292592	176,273303	174,0741364
c_{P_VZD} *[J/kg.K]*	1024,764655	1024,604412	1024,442274	1024,284217
T_{VZD} *povôdná [°C]*	453,9088418	451,6792592	449,423303	447,2241364
ΔT_{VZD} *[K]*	2,229582675	2,255956132	2,199166674	2,143793166
T_{VZD} *vypočítaná[K]*	451,6792592	449,423303	447,2241364	445,0803432
t_{VZD} *vypočítaná[°C]*	178,5292592	176,273303	174,0741364	171,9303432

Úsek ⊿S	17	18	19	20
t_W *povôdná [°C]*	63,29651592	63,93554946	64,58195209	65,21189547
c_{P_W} *[J/kg.K]*	4255,089014	4255,673864	4256,265458	4256,841989
T_W *povôdná [°C]*	336,4465159	337,0855495	337,7319521	338,3618955
ΔT_W *[K]*	0,63903354	0,646402634	0,629943377	0,613903935
T_W *vypočítaná[K]*	337,0855495	337,7319521	338,3618955	338,9757994
t_W *vypočítaná[°C]*	63,93554946	64,58195209	65,21189547	65,8257994

Trubkový výměník pro ohřev oběhové vody

Úsek ⊿S	21	22	23	24
t_{VZD} *povôdná [°C]*	171,9303432	169,8405422	167,8033859	165,8175598
c_{P_VZD} *[J/kg.K]*	1024,13014	1023,979944	1023,833531	1023,690807
T_{VZD} *povôdná [°C]*	445,0803432	442,9905422	440,9533859	438,9675598
ΔT_{VZD} *[K]*	2,089800977	2,03715629	1,985826083	1,935778115
T_{VZD} *vypočítaná[K]*	442,9905422	440,9533859	438,9675598	437,0317817
t_{VZD} *vypočítaná[°C]*	169,8405422	167,8033859	165,8175598	163,8817817

Úsek ⊿S	21	22	23	24
t_W *povôdná [°C]*	65,8257994	66,42407296	67,00711475	67,57531317
c_{P_W} *[J/kg.K]*	4257,40384	4257,951386	4258,484991	4259,005012
T_W *povôdná [°C]*	338,9757994	339,574073	340,1571148	340,7253132
ΔT_W *[K]*	0,598273562	0,583041791	0,568198421	0,553733517
T_W *vypočítaná[K]*	339,574073	340,1571148	340,7253132	341,2790467
t_W *vypočítaná[°C]*	66,42407296	67,00711475	67,57531317	68,12904669

Úsek ⊿S	25	26	27	28
t_{VZD} *povôdná [°C]*	163,8817817	161,9948008	160,1553971	158,3623805
c_{P_VZD} *[J/kg.K]*	1023,55168	1023,416061	1023,283861	1023,154994
T_{VZD} *povôdná [°C]*	437,0317817	435,1448008	433,3053971	431,5123805
ΔT_{VZD} *[K]*	1,886980905	1,839403719	1,793016554	1,747790117
T_{VZD} *vypočítaná[K]*	435,1448008	433,3053971	431,5123805	429,7645904
t_{VZD} *vypočítaná[°C]*	161,9948008	160,1553971	158,3623805	156,6145904

Úsek ⊿S	25	26	27	28
t_W *povôdná [°C]*	68,12904669	68,66868409	69,19458472	69,70709876
c_{P_W} *[J/kg.K]*	4259,511795	4260,005676	4260,486986	4260,956044
T_W *povôdná [°C]*	341,2790467	341,8186841	342,3445847	342,8570988
ΔT_W *[K]*	0,539637398	0,525900634	0,512514037	0,499468654
T_W *vypočítaná[K]*	341,8186841	342,3445847	342,8570988	343,3565674
t_W *vypočítaná[°C]*	68,66868409	69,19458472	69,70709876	70,20656741

Trubkový výměník pro ohřev oběhové vody

Úsek ⊿S	29	30	31	32
t_{VZD} *povôdná [°C]*	156,6145904	154,9108946	153,2501889	151,6313962
c_{P_VZD} *[J/kg.K]*	1023,029379	1022,906932	1022,787575	1022,67123
T_{VZD} *povôdná [°C]*	429,7645904	428,0608946	426,4001889	424,7813962
ΔT_{VZD} *[K]*	1,703695814	1,660705734	1,618792631	1,577929914
T_{VZD} *vypočítaná[K]*	428,0608946	426,4001889	424,7813962	423,2034663
t_{VZD} *vypočítaná[°C]*	154,9108946	153,2501889	151,6313962	150,0534663

Úsek ⊿S	29	30	31	32
t_W *povôdná [°C]*	70,20656741	70,69332318	71,16769005	71,62998374
c_{P_W} *[J/kg.K]*	4261,413163	4261,858646	4262,292792	4262,715887
T_W *povôdná [°C]*	343,3565674	343,8433232	344,31769	344,7799837
ΔT_W *[K]*	0,486755764	0,474366869	0,462293691	0,450528163
T_W *vypočítaná[K]*	343,8433232	344,31769	344,7799837	345,2305119
t_W *vypočítaná[°C]*	70,69332318	71,16769005	71,62998374	72,0805119

Úsek ⊿S	33	34	35	36
t_{VZD} *povôdná [°C]*	150,0534663	148,5153747	147,0161223	145,5547347
c_{P_VZD} *[J/kg.K]*	1022,557823	1022,447278	1022,339525	1022,234493
T_{VZD} *povôdná [°C]*	423,2034663	421,6653747	420,1661223	418,7047347
ΔT_{VZD} *[K]*	1,538091627	1,499252437	1,461387621	1,424473052
T_{VZD} *vypočítaná[K]*	421,6653747	420,1661223	418,7047347	417,2802616
t_{VZD} *vypočítaná[°C]*	148,5153747	147,0161223	145,5547347	144,1302616

Úsek ⊿S	33	34	35	36
t_W *povôdná [°C]*	72,0805119	72,51957433	72,94746315	73,36446304
c_{P_W} *[J/kg.K]*	4263,128215	4263,53005	4263,921658	4264,3033
T_W *povôdná [°C]*	345,2305119	345,6695743	346,0974631	346,514463
ΔT_W *[K]*	0,439062426	0,427888823	0,416999892	0,406388366
T_W *vypočítaná[K]*	345,6695743	346,0974631	346,514463	346,9208514
t_W *vypočítaná[°C]*	72,51957433	72,94746315	73,36446304	73,77085141

Trubkový výměník pro ohřev oběhové vody

Úsek ⊿S	37	38	39	40
t_{VZD} *povôdná [°C]*	144,1302616	142,7417764	141,3883754	140,0691772
c_{P_VZD} *[J/kg.K]*	1022,132115	1022,032323	1021,935052	1021,84024
T_{VZD} *povôdná [°C]*	417,2802616	415,8917764	414,5383754	413,2191772
ΔT_{VZD} *[K]*	1,388485183	1,353401037	1,319198191	1,285854768
T_{VZD} *vypočítaná[K]*	415,8917764	414,5383754	413,2191772	411,9333224
t_{VZD} *vypočítaná[°C]*	142,7417764	141,3883754	140,0691772	138,7833224

Úsek ⊿S	37	38	39	40
t_W *povôdná [°C]*	73,77085141	74,16689857	74,55286794	74,92901623
c_{P_W} *[J/kg.K]*	4264,675231	4265,037697	4265,39094	4265,735195
T_W *povôdná [°C]*	346,9208514	347,3168986	347,7028679	348,0790162
ΔT_W *[K]*	0,39604716	0,385969374	0,376148284	0,366577337
T_W *vypočítaná[K]*	347,3168986	347,7028679	348,0790162	348,4455936
t_W *vypočítaná[°C]*	74,16689857	74,55286794	74,92901623	75,29559356

Úsek ⊿S	41	42	43	44
t_{VZD} *povôdná [°C]*	138,7833224	137,529973	136,3083117	135,1175416
c_{P_VZD} *[J/kg.K]*	1021,747824	1021,657744	1021,569942	1021,48436
T_{VZD} *povôdná [°C]*	411,9333224	410,679973	409,4583117	408,2675416
ΔT_{VZD} *[K]*	1,253349416	1,221661307	1,190770114	1,160656009
T_{VZD} *vypočítaná[K]*	410,679973	409,4583117	408,2675416	407,1068856
t_{VZD} *vypočítaná[°C]*	137,529973	136,3083117	135,1175416	133,9568856

Úsek ⊿S	41	42	43	44
t_W *povôdná [°C]*	75,29559356	75,65284371	76,00100422	76,34030655
c_{P_W} *[J/kg.K]*	4266,07069	4266,397649	4266,716289	4267,026822
T_W *povôdná [°C]*	348,4455936	348,8028437	349,1510042	349,4903066
ΔT_W *[K]*	0,357250151	0,348160504	0,339302336	0,330669742
T_W *vypočítaná[K]*	348,8028437	349,1510042	349,4903066	349,8209763
t_W *vypočítaná[°C]*	75,65284371	76,00100422	76,34030655	76,6709763

Trubkový výměník pro ohřev oběhové vody

Úsek ⊿S	45	46	47	48
t_{VZD} *povôdná [°C]*	133,9568856	132,8255859	131,7229038	130,6481187
c_{P_VZD} *[J/kg.K]*	1021,400942	1021,319634	1021,240383	1021,163137
T_{VZD} *povôdná [°C]*	407,1068856	405,9755859	404,8729038	403,7981187
ΔT_{VZD} *[K]*	1,131299643	1,102682141	1,074785088	1,04759052
T_{VZD} *vypočítaná[K]*	405,9755859	404,8729038	403,7981187	402,7505282
t_{VZD} *vypočítaná[°C]*	132,8255859	131,7229038	130,6481187	129,6005282

Úsek ⊿S	45	46	47	48
t_W *povôdná [°C]*	76,6709763	76,99323326	77,30729167	77,61336025
c_{P_W} *[J/kg.K]*	4267,329454	4267,624387	4267,911816	4268,191933
T_W *povôdná [°C]*	349,8209763	350,1432333	350,4572917	350,7633603
ΔT_W *[K]*	0,322256966	0,314058403	0,306068587	0,298282196
T_W *vypočítaná[K]*	350,1432333	350,4572917	350,7633603	351,0616424
t_W *vypočítaná[°C]*	76,99323326	77,30729167	77,61336025	77,91164245

Úsek ⊿S	49	50	51	52
t_{VZD} *povôdná [°C]*	129,6005282	128,5794473	127,5842081	126,6141595
c_{P_VZD} *[J/kg.K]*	1021,087845	1021,014459	1020,94293	1020,873212
T_{VZD} *povôdná [°C]*	402,7505282	401,7294473	400,7342081	399,7641595
ΔT_{VZD} *[K]*	1,02108091	0,995239162	0,9700486	0,945492954
T_{VZD} *vypočítaná[K]*	401,7294473	400,7342081	399,7641595	398,8186666
t_{VZD} *vypočítaná[°C]*	128,5794473	127,5842081	126,6141595	125,6686666

Úsek ⊿S	49	50	51	52
t_W *povôdná [°C]*	77,91164245	78,20233649	78,48563556	78,76172791
c_{P_W} *[J/kg.K]*	4268,464924	4268,73097	4268,990249	4269,242931
T_W *povôdná [°C]*	351,0616424	351,3523365	351,6356356	351,9117279
ΔT_W *[K]*	0,290694042	0,28329907	0,276092354	0,269069096
T_W *vypočítaná[K]*	351,3523365	351,6356356	351,9117279	352,180797
t_W *vypočítaná[°C]*	78,20233649	78,48563556	78,76172791	79,03079701

Úsek ΔS	53	54	55	56
t_{VZD} *povôdná [°C]*	125,6686666	124,7471102	123,8488869	122,9734081
c_{P_VZD} *[J/kg.K]*	1020,805258	1020,739025	1020,674468	1020,611546
T_{VZD} *povôdná [°C]*	398,8186666	397,8971102	396,9988869	396,1234081
ΔT_{VZD} *[K]*	0,921556355	0,898223324	0,875478764	0,853307947
T_{VZD} *vypočítaná[K]*	397,8971102	396,9988869	396,1234081	395,2701002
t_{VZD} *vypočítaná[°C]*	124,7471102	123,8488869	122,9734081	122,1201002

Úsek ΔS	53	54	55	56
t_W *povôdná [°C]*	79,03079701	79,29302163	79,54857599	79,79762988
c_{P_W} *[J/kg.K]*	4269,489186	4269,729176	4269,963062	4270,190999
T_W *povôdná [°C]*	352,180797	352,4430216	352,698576	352,9476299
ΔT_W *[K]*	0,262224619	0,255554364	0,249053892	0,242718875
T_W *vypočítaná[K]*	352,4430216	352,698576	352,9476299	353,1903488
t_W *vypočítaná[°C]*	79,29302163	79,54857599	79,79762988	80,04034876

Vypočítaná teplota vzduchu na výstupe u výmenníku

t_{VZD} = 122,12 °C

Odpovedajúca teplota vody na výstupe z výmenníku

t_W = 80,04 °C

Počet segmentov $n_{SEG} = 56[-]$

Dĺžka teplo-zmennej plochy výmenníku

$$L = n_{SEG}.\Delta L = 56.0{,}033 = 1{,}848[m] \tag{5-21}$$

Celková plocha výmenníku

$$S = n_{SEG}.\Delta S = 56.2{,}459 = 137{,}704[m^2] \tag{5-22}$$

Teplotný rozdiel na vstupe

$$\Delta t_1 = t_{VZD1} - t_{W1} = 227 - 50 = 177[°C] \tag{5-23}$$

Teplotný rozdiel na výstupe

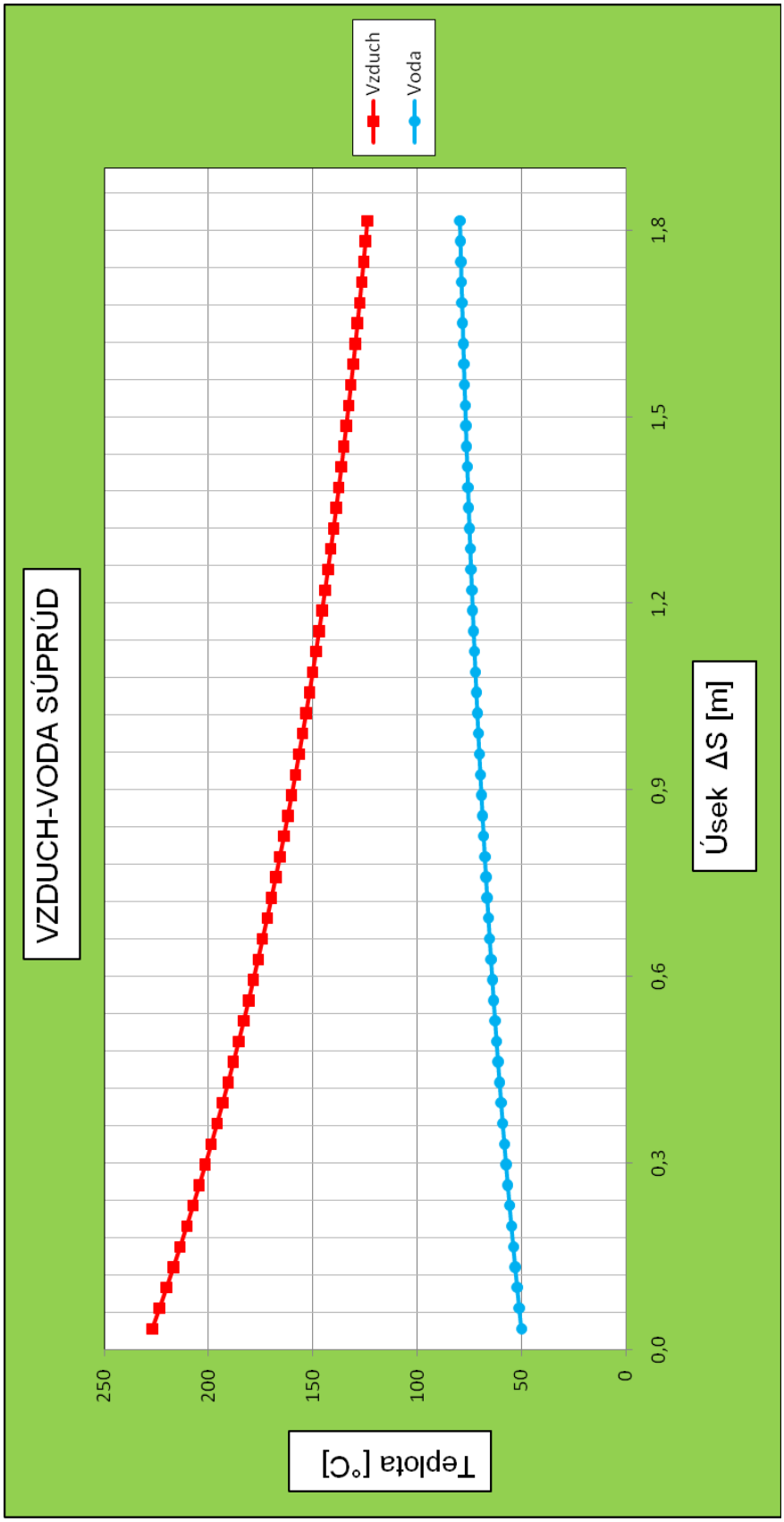
$$\Delta t_2 = t_{VZD2} - t_{W2} = 122{,}12 - 80{,}04 = 42{,}34[°C] \tag{5-24}$$

Stredný logaritmický spád

$$\Delta t_{LN} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} = \frac{147 - 72{,}641}{\ln \frac{72{,}641}{147}} = 105{,}488 \tag{5-25}$$

Tepelný výkon

$$Q = k.S_{CELK}.\Delta t_{LN} = 47{,}141.122{,}95.105{,}488 = 611{,}534kW \tag{5-26}$$



Obr.12: Graf priebehu teplôt

5.6 Výpočet teploty vzduchu na konci výmenníku pre protiprúdny výmenník

Postup výpočtu rovnaký ako v kap. 5.4

Tabuľky vypočítaných teplôt

Úsek ⊿S	1	2	3	4
t_{VZD} *povôdná [°C]*	227	224,12786	221,29520	218,50147
c_{P_VZD} *[J/kg.K]*	1028,08806	1027,88164	1027,67805	1027,47726
T_{VZD} *povôdná [°C]*	500,15000	497,27786	494,44520	491,65147
ΔT_{VZD} *[K]*	2,87214	2,83267	2,79372	2,75530
T_{VZD} *vypočítaná[K]*	497,27786	494,44520	491,65147	488,89617
t_{VZD} *vypočítaná[°C]*	224,12786	221,29520	218,50147	215,74617

Úsek ⊿S	1	2	3	4
t_W *povôdná [°C]*	80,00000	79,17709	78,36550	77,56509
c_{P_W} *[J/kg.K]*	4270,37621	4269,62307	4268,88030	4268,14776
T_W *povôdná [°C]*	353,15000	352,32709	351,51550	350,71509
ΔT_W *[K]*	0,82291	0,81158	0,80041	0,78938
T_W *vypočítaná[K]*	352,32709	351,51550	350,71509	349,92571
t_W *vypočítaná[°C]*	79,17709	78,36550	77,56509	76,77571

Úsek ⊿S	5	6	7	8
t_{VZD} *povôdná [°C]*	215,74617	213,02878	210,34879	207,70571
c_{P_VZD} *[J/kg.K]*	1027,27924	1027,08393	1026,89132	1026,70136
T_{VZD} *povôdná [°C]*	488,89617	486,17878	483,49879	480,85571
ΔT_{VZD} *[K]*	2,71739	2,67999	2,64309	2,60668
T_{VZD} *vypočítaná[K]*	486,17878	483,49879	480,85571	478,24903
t_{VZD} *vypočítaná[°C]*	213,02878	210,34879	207,70571	205,09903

Úsek ⊿S	5	6	7	8
t_W *povôdná [°C]*	76,77571	75,99721	75,22945	74,47227
c_{P_W} *[J/kg.K]*	4267,42531	4266,71282	4266,01015	4265,31717
T_W *povôdná [°C]*	349,92571	349,14721	348,37945	347,62227
ΔT_W *[K]*	0,77850	0,76777	0,75718	0,74673
T_W *vypočítaná[K]*	349,14721	348,37945	347,62227	346,87553
t_W *vypočítaná[°C]*	75,99721	75,22945	74,47227	73,72553

Úsek ⊿S	9	10	11	12
t_{VZD} *povôdná [°C]*	205,09903	202,52827	199,99295	197,49260
c_{P_VZD} *[J/kg.K]*	1026,51401	1026,32925	1026,14703	1025,96733
T_{VZD} *povôdná [°C]*	478,24903	475,67827	473,14295	470,64260
ΔT_{VZD} *[K]*	2,57076	2,53532	2,50036	2,46586
T_{VZD} *vypočítaná[K]*	475,67827	473,14295	470,64260	468,17673
t_{VZD} *vypočítaná[°C]*	202,52827	199,99295	197,49260	195,02673

Úsek ⊿S	9	10	11	12
t_W *povôdná [°C]*	73,72553	72,98911	72,26285	71,54662
c_{P_W} *[J/kg.K]*	4264,63376	4263,95977	4263,29509	4262,63960
T_W *povôdná [°C]*	346,87553	346,13911	345,41285	344,69662
ΔT_W *[K]*	0,73643	0,72626	0,71623	0,70633
T_W *vypočítaná[K]*	346,13911	345,41285	344,69662	343,99029
t_W *vypočítaná[°C]*	72,98911	72,26285	71,54662	70,84029

Úsek ⊿S	13	14	15	16
t_{VZD} *povôdná [°C]*	195,02673	192,59490	190,19664	187,83150
c_{P_VZD} *[J/kg.K]*	1025,79011	1025,61533	1025,44296	1025,27297
T_{VZD} *povôdná [°C]*	468,17673	465,74490	463,34664	460,98150
ΔT_{VZD} *[K]*	2,43183	2,39826	2,36514	2,33247
T_{VZD} *vypočítaná[K]*	465,74490	463,34664	460,98150	458,64903
t_{VZD} *vypočítaná[°C]*	192,59490	190,19664	187,83150	185,49903

Úsek ⊿S	13	14	15	16
t_W *povôdná [°C]*	70,84029	70,14372	69,45679	68,77935
c_{P_W} *[J/kg.K]*	4261,99315	4261,35565	4260,72695	4260,10696
T_W *povôdná [°C]*	343,99029	343,29372	342,60679	341,92935
ΔT_W *[K]*	0,69657	0,68694	0,67744	0,66807
T_W *vypočítaná[K]*	343,29372	342,60679	341,92935	341,26128
t_W *vypočítaná[°C]*	70,14372	69,45679	68,77935	68,11128

Úsek ⊿S	17	18	19	20
t_{VZD} *povôdná [°C]*	185,49903	183,19879	180,93035	178,69328
c_{P_VZD} *[J/kg.K]*	1025,10534	1024,94002	1024,77698	1024,61620
T_{VZD} *povôdná [°C]*	458,64903	456,34879	454,08035	451,84328
ΔT_{VZD} *[K]*	2,30024	2,26844	2,23707	2,20612
T_{VZD} *vypočítaná[K]*	456,34879	454,08035	451,84328	449,63716
t_{VZD} *vypočítaná[°C]*	183,19879	180,93035	178,69328	176,48716

Úsek ⊿S	17	18	19	20
t_W *povôdná [°C]*	68,11128	67,45246	66,80276	66,16206
c_{P_W} *[J/kg.K]*	4259,49554	4258,89258	4258,29796	4257,71159
T_W *povôdná [°C]*	341,26128	340,60246	339,95276	339,31206
ΔT_W *[K]*	0,65882	0,64970	0,64070	0,63183
T_W *vypočítaná[K]*	340,60246	339,95276	339,31206	338,68023
t_W *vypočítaná[°C]*	67,45246	66,80276	66,16206	65,53023

Úsek ⊿S	21	22	23	24
t_{VZD} *povôdná [°C]*	176,48716	174,31156	172,16608	170,05030
c_{P_VZD} *[J/kg.K]*	1024,45764	1024,30128	1024,14708	1023,99502
T_{VZD} *povôdná [°C]*	449,63716	447,46156	445,31608	443,20030
ΔT_{VZD} *[K]*	2,17560	2,14548	2,11578	2,08647
T_{VZD} *vypočítaná[K]*	447,46156	445,31608	443,20030	441,11382
t_{VZD} *vypočítaná[°C]*	174,31156	172,16608	170,05030	167,96382

Úsek ⊿S	21	22	23	24
t_W *povôdná [°C]*	65,53023	64,90715	64,29271	63,68679
c_{P_W} *[J/kg.K]*	4257,13333	4256,56308	4256,00074	4255,44620
T_W *povôdná [°C]*	338,68023	338,05715	337,44271	336,83679
ΔT_W *[K]*	0,62307	0,61444	0,60592	0,59752
T_W *vypočítaná[K]*	338,05715	337,44271	336,83679	336,23928
t_W *vypočítaná[°C]*	64,90715	64,29271	63,68679	63,08928

Úsek ⊿S	25	26	27	28
t_{VZD} *povôdná [°C]*	167,96382	165,90626	163,87720	161,87628
c_{P_VZD} *[J/kg.K]*	1023,84506	1023,69718	1023,55135	1023,40754
T_{VZD} *povôdná [°C]*	441,11382	439,05626	437,02720	435,02628
ΔT_{VZD} *[K]*	2,05757	2,02905	2,00092	1,97318
T_{VZD} *vypočítaná[K]*	439,05626	437,02720	435,02628	433,05310
t_{VZD} *vypočítaná[°C]*	165,90626	163,87720	161,87628	159,90310

Úsek ⊿S	25	26	27	28
t_W *povôdná [°C]*	63,08928	62,50005	61,91900	61,34601
c_{P_W} *[J/kg.K]*	4254,89935	4254,36008	4253,82829	4253,30389
T_W *povôdná [°C]*	336,23928	335,65005	335,06900	334,49601
ΔT_W *[K]*	0,58923	0,58105	0,57299	0,56503
T_W *vypočítaná[K]*	335,65005	335,06900	334,49601	333,93098
t_W *vypočítaná[°C]*	62,50005	61,91900	61,34601	60,78098

Úsek ⊿S	29	30	31	32
t_{VZD} *povôdná [°C]*	159,90310	157,95729	156,03848	154,14630
c_{P_VZD} *[J/kg.K]*	1023,26573	1023,12588	1022,98797	1022,85198
T_{VZD} *povôdná [°C]*	433,05310	431,10729	429,18848	427,29630
ΔT_{VZD} *[K]*	1,94581	1,91881	1,89218	1,86592
T_{VZD} *vypočítaná[K]*	431,10729	429,18848	427,29630	425,43038
t_{VZD} *vypočítaná[°C]*	157,95729	156,03848	154,14630	152,28038

Úsek ⊿S	29	30	31	32
t_W *povôdná [°C]*	60,78098	60,22379	59,67435	59,13253
c_{P_W} *[J/kg.K]*	4252,78677	4252,27683	4251,77397	4251,27810
T_W *povôdná [°C]*	333,93098	333,37379	332,82435	332,28253
ΔT_W *[K]*	0,55719	0,54945	0,54181	0,53428
T_W *vypočítaná[K]*	333,37379	332,82435	332,28253	331,74825
t_W *vypočítaná[°C]*	60,22379	59,67435	59,13253	58,59825

Úsek ⊿S	33	34	35	36
t_{VZD} *povôdná [°C]*	152,28038	150,44038	148,62593	146,83669
c_{P_VZD} *[J/kg.K]*	1022,71787	1022,58563	1022,45522	1022,32663
T_{VZD} *povôdná [°C]*	425,43038	423,59038	421,77593	419,98669
ΔT_{VZD} *[K]*	1,84001	1,81445	1,78924	1,76437
T_{VZD} *vypočítaná[K]*	423,59038	421,77593	419,98669	418,22231
t_{VZD} *vypočítaná[°C]*	150,44038	148,62593	146,83669	145,07231

Úsek ⊿S	33	34	35	36
t_W *povôdná [°C]*	58,59825	58,07140	57,55187	57,03957
c_{P_W} *[J/kg.K]*	4250,78912	4250,30694	4249,83146	4249,36260
T_W *povôdná [°C]*	331,74825	331,22140	330,70187	330,18957
ΔT_W *[K]*	0,52685	0,51953	0,51230	0,50517
T_W *vypočítaná[K]*	331,22140	330,70187	330,18957	329,68440
t_W *vypočítaná[°C]*	58,07140	57,55187	57,03957	56,53440

Úsek ⊿S	37	38	39	40
t_{VZD} *povôdná [°C]*	145,07231	143,33246	141,61680	139,92501
c_{P_VZD} *[J/kg.K]*	1022,19982	1022,07478	1021,95147	1021,82988
T_{VZD} *povôdná [°C]*	418,22231	416,48246	414,76680	413,07501
ΔT_{VZD} *[K]*	1,73985	1,71566	1,69180	1,66826
T_{VZD} *vypočítaná[K]*	416,48246	414,76680	413,07501	411,40674
t_{VZD} *vypočítaná[°C]*	143,33246	141,61680	139,92501	138,25674

Úsek ⊿S	37	38	39	40
t_W *povôdná [°C]*	56,53440	56,03625	55,54504	55,06067
c_{P_W} *[J/kg.K]*	4248,90025	4248,44435	4247,99479	4247,55148
T_W *povôdná [°C]*	329,68440	329,18625	328,69504	328,21067
ΔT_W *[K]*	0,49814	0,49121	0,48437	0,47763
T_W *vypočítaná[K]*	329,18625	328,69504	328,21067	327,73304
t_W *vypočítaná[°C]*	56,03625	55,54504	55,06067	54,58304

Úsek ⊿S	41	42	43	44	45
t_{VZD} *povôdná [°C]*	138,25674	136,61169	134,98953	133,38996	131,81266
c_{P_VZD} *[J/kg.K]*	1021,70998	1021,59175	1021,47516	1021,36020	1021,24683
T_{VZD} *povôdná [°C]*	411,40674	409,76169	408,13953	406,53996	404,96266
ΔT_{VZD} *[K]*	1,64505	1,62216	1,59957	1,57730	1,55533
T_{VZD} *vypočítaná[K]*	409,76169	408,13953	406,53996	404,96266	403,40732
t_{VZD} *vypočítaná[°C]*	136,61169	134,98953	133,38996	131,81266	130,25732

Úsek ⊿S	41	42	43	44	45
t_W *povôdná [°C]*	54,58304	54,11207	53,64765	53,18971	52,73815
c_{P_W} *[J/kg.K]*	4247,11435	4246,68331	4246,25828	4245,83916	4245,42589
T_W *povôdná [°C]*	327,73304	327,26207	326,79765	326,33971	325,88815
ΔT_W *[K]*	0,47097	0,46441	0,45794	0,45156	0,44526
T_W *vypočítaná[K]*	327,26207	326,79765	326,33971	325,88815	325,44289
t_W *vypočítaná[°C]*	54,11207	53,64765	53,18971	52,73815	52,29289

Úsek ⊿S	46	47	48	49	50
t_{VZD} *povôdná [°C]*	130,25732	128,72365	127,21135	125,72013	124,24969
c_{P_VZD} *[J/kg.K]*	1021,13505	1021,02482	1020,91613	1020,80896	1020,70327
T_{VZD} *povôdná [°C]*	403,40732	401,87365	400,36135	398,87013	397,39969
ΔT_{VZD} *[K]*	1,53367	1,51230	1,49122	1,47044	1,44993
T_{VZD} *vypočítaná[K]*	401,87365	400,36135	398,87013	397,39969	395,94976
t_{VZD} *vypočítaná[°C]*	128,72365	127,21135	125,72013	124,24969	122,79976

Úsek ⊿S	46	47	48	49	50
t_W *povôdná [°C]*	52,29289	51,85383	51,42090	50,99400	50,57307
c_{P_W} *[J/kg.K]*	4245,01838	4244,61655	4244,22033	4243,82963	4243,44439
T_W *povôdná [°C]*	325,44289	325,00383	324,57090	324,14400	323,72307
ΔT_W *[K]*	0,43906	0,43293	0,42689	0,42094	0,41506
T_W *vypočítaná[K]*	325,00383	324,57090	324,14400	323,72307	323,30800
t_W *vypočítaná[°C]*	51,85383	51,42090	50,99400	50,57307	50,15800

Vypočítaná teplota vzduchu na výstupe z výmenníku

t_{VZD} = 122,799 °C

Odpovedajúca teplota vody na vstupe do výmenníku

t_W = 50,158 °C

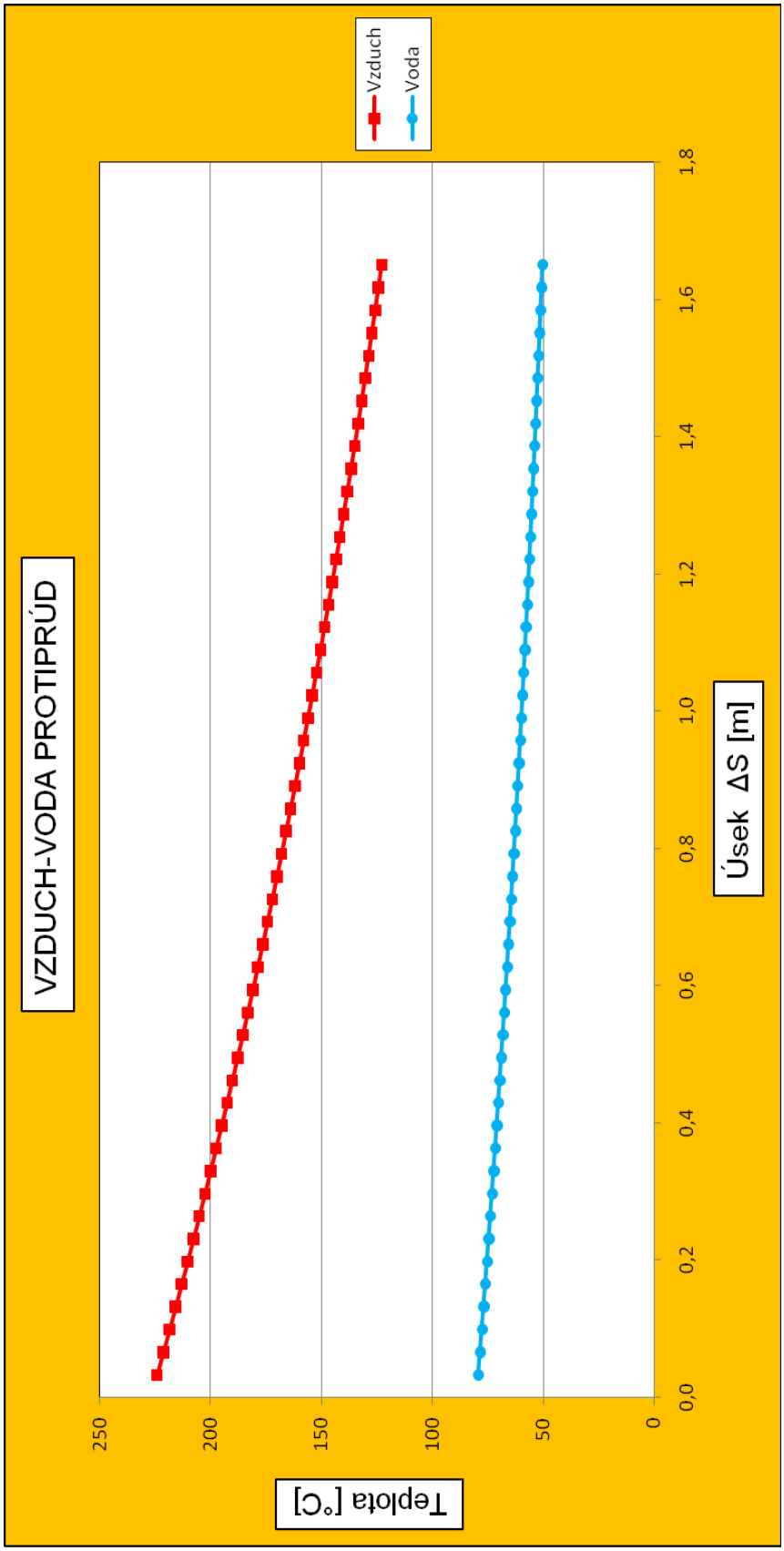
Počet segmentov $n_{SEG} = 50[-]$

Dĺžka teplo-zmennej plochy výmenníku

$$L = n_{SEG}.\Delta L = 50.0{,}033 = 1{,}650[m] \tag{5-22}$$

Celková plocha výmenníku

$$S_{CELK} = n_{SEG}.\Delta S = 50.2{,}459 = 122{,}950[m^2] \tag{5-23}$$



Obr.13: Graf priebehu teplôt

Teplotný rozdiel na vstupe

$$\Delta t_1 = t_{VZD1} - t_{W2} = 227 - 80 = 147[°C] \tag{5-24}$$

Teplotný rozdiel na výstupe

$$\Delta t_2 = t_{VZD2} - t_{W1} = 122{,}799 - 50{,}158 = 72{,}641[°C] \tag{5-25}$$

Stredný logaritmický spád

$$\Delta t_{LN} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} = \frac{147 - 72{,}641}{\ln \frac{72{,}641}{147}} = 105{,}488 \tag{5-26}$$

Tepelný výkon

$$Q = k.S_{CELK}.\Delta t_{LN} = 47{,}141.122{,}95.105{,}488 = 611{,}534kW \tag{5-27}$$

6. TLAKOVÉ STRATY

Tlakové straty výmenníku tepla som počítal podľa lit. [10]

6.1 Tlaková strata na strane vzduchu pre súprúdny variant

Hodnoty vzduchu podľa lit. [1]

Teplota vzduchu [°C]	$\rho[kg/m^3]$
227,00	0,83358165
174,66	1,043204724
122,32	1,003965021

Tab.8: Hustota vzduchu pre dané teploty

Vplyvom nutnosti odčítania určitých hodnôt z grafu nie je výpočet tlakovej straty úplne presný.

Rýchlosť vzduchu $w_{VZD} = 15{,}91 m/s$

Absolútna drsnosť vnútornej steny trubky

$k = 3.10^{-5}$

Pomerná drsnosť trubiek

$$\varepsilon = \frac{k}{d} = \frac{3.10^{-5}}{0{,}0224} = 1{,}339.10^{-3}$$

Reynoldsove číslo

$$\mathrm{Re} = \frac{v_{VZD}.d}{\nu} = \frac{15{,}91.0{,}0224}{3{,}383.10^{-5}} = 10536{,}67$$

Pomocné výpočtové vzťahy hodnôt A,B potrebné pre určenie súčiniteľu trenia

$$A = \left\{ 2{,}457.\ln\left[\frac{1}{\left(\frac{7}{\mathrm{Re}}\right)^{0{,}9} + 0{,}27.\varepsilon} \right] \right\}^{16} =$$

$$= \left\{ 2{,}457.\ln\left[\frac{1}{\left(\frac{7}{10536{,}67}\right)^{0{,}9} + 0{,}27.1{,}339.10^{-3}} \right] \right\}^{16} = 15{,}607 \qquad (6\text{-}1)$$

$$B = \left(\frac{37530}{\mathrm{Re}}\right)^{16} = \left(\frac{37530}{10536{,}67}\right)^{16} = 671127110{,}9 \qquad (6\text{-}2)$$

Súčiniteľ trenia

$$\lambda = 8.\left[\left(\frac{8}{\mathrm{Re}}\right)^{12} + \frac{1}{(A+B)^{1{,}5}} \right]^{\frac{1}{12}} =$$

$$= 8.\left[\left(\frac{8}{10536{,}67}\right)^{12} + \frac{1}{(15{,}607 + 671127110{,}9)^{1{,}5}} \right]^{\frac{1}{12}} = 0{,}630 \qquad (6\text{-}3)$$

Miestne stratové súčinitele

Vstup vzduchu do trubky $\xi_1 = 0{,}5$

Výstup z trubky v priamom smere $\xi_2 = 1$

Tlaková strata

$$\Delta p = \frac{w_{VZD}^2}{2}.\rho_{VZD,STR}.\left[\xi_1.\frac{\rho_{VZD,STR}}{\rho_1} + \left(\lambda.\frac{L_{CELK}}{d} + \sum \xi_m\right) + \xi_2.\frac{\rho_{VZD,STR}}{\rho_2}\right] =$$
$$= \frac{15{,}916^2}{2}.1{,}043.\left[0{,}5.\frac{1{,}043}{0{,}833} + \left(0{,}630.\frac{1{,}884}{0{,}0224} + 0\right) + 1.\frac{1{,}043}{1{,}004}\right] = \tag{6-4}$$
$$= 7242{,}00\ \text{Pa}$$

6.2 Tlaková strata na strane vody pre súprúdny variant

Postup výpočtu tlakovej straty výmenníku na strane vody podľa lit. [4]

Hodnoty vody pre strednú teplotu $t_{W.STR} = 64{,}99°C$

Hustota vody $\rho_W = 980{,}743\ \text{kg/m}^3$

Vplyvom nutnosti odčítania určitých hodnôt z grafu, obdobne ako pri výpočte tlakovej straty výmenníku na strane vzduchu, nie je výpočet tlakovej straty úplne presný.

Pre výpočet tlakovej straty je nutné určiť hodnotu stratového súčiniteľu , ktorý sa určuje pomocou zovšeobecnených charakteristík.

Najprv za pomoci danej pomernej pozdĺžnej rozteče a Reynoldsovho čísla určíme veličinu

$$\rightarrow \frac{\xi}{u} = 0{,}49$$

Potom určíme pomocou pomeru pomernej priečnej rozteče a pomernej pozdĺžnej rozteče a Reynoldsovho čísla hodnotu veličiny $u = 0{,}375$

Stratový súčiniteľ

$$\xi = \left(\frac{\xi}{u}\right) = 0{,}49.0{,}375 = 0{,}18375$$

Tlaková strata

$$\Delta p = \xi.\frac{v_w^2}{2}.\rho_W.Z = 0{,}18375.\frac{1{,}289^2}{2}.980{,}743.36 = 5393{,}323\text{Pa} \tag{6-5}$$

6.3 Tlaková strata na strane vzduchu pre protiprúdny variant

Hodnoty vzduchu podľa lit. [1]

Teplota vzduchu [°C]	$\rho[kg/m^3]$
227,00	0,88930515
175,81	0,98526400
122,79	1,00668000

Tab.9: Hustota vzduchu pre dané teploty

Vplyvom nutnosti odčítania určitých hodnôt z grafu nie je výpočet tlakovej straty úplne presný.

Rýchlosť vzduchu $w_{VZD} = 15{,}91 m/s$

Absolútna drsnosť vnútornej steny trubky

$k = 3.10^{-5}$

Pomerná drsnosť trubiek

$$\varepsilon = \frac{k}{d} = \frac{3.10^{-5}}{0{,}0224} = 1{,}339.10^{-3}$$

Reynoldsove číslo

$$\mathrm{Re} = \frac{v_{VZD}.d}{\nu} = \frac{15{,}91.0{,}0224}{3{,}386.10^{-5}} = 10527{,}37$$

Pomocné výpočtové vzťahy hodnôt A,B potrebné pre určenie súčiniteľu trenia

$$A = \left\{ 2{,}457.\ln\left[\frac{1}{\left(\frac{7}{\mathrm{Re}}\right)^{0{,}9} + 0{,}27.\varepsilon} \right] \right\}^{16} =$$

$$= \left\{ 2{,}457.\ln\left[\frac{1}{\left(\frac{7}{10527{,}37}\right)^{0{,}9} + 0{,}27.1{,}339.10^{-3}} \right] \right\}^{16} = 15{,}606 \qquad (6\text{-}6)$$

$$B = \left(\frac{37530}{\mathrm{Re}}\right)^{16} = \left(\frac{37530}{10527{,}37}\right)^{16} = 680671850{,}580 \tag{6-7}$$

Súčiniteľ trenia

$$\lambda = 8.\left[\left(\frac{8}{\mathrm{Re}}\right)^{12} + \frac{1}{(A+B)^{1,5}}\right]^{\frac{1}{12}} = \\ = 8.\left[\left(\frac{8}{10527{,}37}\right)^{12} + \frac{1}{(15{,}606+680671850{,}580)^{1,5}}\right]^{\frac{1}{12}} = 0{,}629 \tag{6-8}$$

Miestne stratové súčinitele

Vstup vzduchu do trubky $\xi_1 = 0{,}5$

Výstup z trubky v priamom smere $\xi_2 = 1$

Tlaková strata

$$\Delta p = \frac{w_{VZD}^2}{2}.\rho_{VZD,STR}.\left[\xi_1.\frac{\rho_{VZD,STR}}{\rho_1} + \left(\lambda.\frac{L_{CELK}}{d} + \sum \xi_m\right) + \xi_2.\frac{\rho_{VZD,STR}}{\rho_2}\right] = \\ = \frac{15{,}916^2}{2}.0{,}985.\left[0{,}5.\frac{0{,}985}{0{,}889} + \left(0{,}629.\frac{1{,}650}{0{,}0224} + 0\right) + 1.\frac{0{,}985}{1{,}006}\right] = \\ = 5977{,}73\,\mathrm{Pa} \tag{6-9}$$

6.4 Tlaková strata na strane vody pre protiprúdny variant

Postup výpočtu tlakovej straty výmenníku na strane vody podľa lit. [4]

Hodnoty vody pre strednú teplotu $t_{W.STR} = 65{,}079°C$

Hustota vody $\rho_W = 980{,}696\,\mathrm{kg/m^3}$

Vplyvom nutnosti odčítania určitých hodnôt z grafu, obdobne ako pri výpočte tlakovej straty výmenníku na strane vzduchu, nie je výpočet tlakovej straty úplne presný.

Pre výpočet tlakovej straty je nutné určiť hodnotu stratového súčiniteľu , ktorý sa určuje pomocou zovšeobecnených charakteristík.

Najprv za pomoci danej pomernej pozdĺžnej rozteče a Reynoldsovho čísla určíme veličinu

$\rightarrow \frac{\xi}{u} = 0{,}49$

Potom určíme pomocou pomeru pomernej priečnej rozteče a pomernej pozdĺžnej rozteče a Reynoldsovho čísla hodnotu veličiny $u = 0{,}375$

Stratový súčiniteľ

$$\xi = \left(\frac{\xi}{u}\right) = 0{,}49.0{,}375 = 0{,}18375$$

Tlaková strata

$$\Delta p = \xi.\frac{v_w^2}{2}.\rho_W.Z = 0{,}18375.\frac{1{,}289^2}{2}.980{,}696.36 = 5393{,}584\text{Pa} \tag{6-10}$$

7. VÝPOČET GEOMETRICKÝCH PARAMETROV HRDIEL

7.1 Výpočet vstupného hrdla na strane vody

Vstupné parametre

- Teplota vody $t_{W1} = 50[°C]$
- Tlak vody $p_{W1} = 5[Bar]$
- Hustota vody $\rho_{W1} = 988{,}220802[kg/m^3]$
- Objemový prietok $M'_{W1} = 4{,}907.10^{-3}[kg/m^3]$
- Vstupná rýchlosť $v_{W1} = 1{,}8[m/s]$

Prierez vstupného hrdla vody

$$S_{W1} = \frac{M'_{W1}}{v_{W1}} = \frac{4{,}907.10^{-3}}{1{,}8} = 2{,}726.10^{-3}[m^2] \tag{7-1}$$

Priemer vstupného hrdla vody

$$D_{HR,W1} = \sqrt{\frac{4S_{W1}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4.2{,}726.10^{-3}}{\pi} = 0{,}0589}[m] \tag{7-2}$$

Na základe vypočítaného priemeru vstupného hrdla vody volím najbližšiu vyššiu normalizovanú prírubu hrdla DN 65. Vnútorný priemer normalizovanej príruby DN 65 je $D_{HR1,VNUT} = 0{,}0703m$. Väčší priemer hrdla spôsobí zmenu vstupnej rýchlosti, ktorá klesne.

Zmena prierezu vstupného hrdla vody

$$S_{W1,NOVY} = \frac{\pi.D_{HR1,VNUT}^2}{4} = \frac{\pi.0{,}0703^2}{4} = 0{,}00388\left[m^2\right] \tag{7-3}$$

Zmena vstupnej rýchlosti vody

$$v_{W1,NOVA} = \frac{M'_{W1}}{S_{W1,NOVY}} = \frac{4{,}907.10^{-3}}{0{,}00388} = 1{,}264\left[m/s\right] \tag{7-4}$$

7.2 Výpočet výstupného hrdla na strane vody

Výstupné parametre

- Teplota vody $t_{W2} = 80\left[°C\right]$
- Tlak vody $p_{W2} = 4{,}95\left[Bar\right]$
- Hustota vody $\rho_{W2} = 971{,}978835\left[kg/m^3\right]$
- Objemový prietok $M'_{W2} = 4{,}304.10^{-3}\left[kg/m^3\right]$
- Vstupná rýchlosť $v_{W2} = 1{,}8\left[m/s\right]$

Prierez výstupného hrdla vody

$$S_{W2} = \frac{M'_{W2}}{v_{W2}} = \frac{4{,}304.10^{-3}}{1{,}8} = 2{,}391.10^{-3}\left[m^2\right] \tag{7-5}$$

Priemer výstupného hrdla vody

$$D_{HR,W2} = \sqrt{\frac{4S_{W2}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4.2{,}391.10^{-3}}{\pi} = 0{,}0552}\left[m\right] \tag{7-6}$$

Na základe vypočítaného priemeru výstupného hrdla vody volím najbližšiu vyššiu normalizovanú prírubu hrdla DN 65. Vnútorný priemer normalizovanej príruby DN 65 je $D_{HR2,VNUT} = 0{,}0703m$. Väčší priemer hrdla spôsobí zmenu výstupnej rýchlosti, ktorá klesne.

Zmena prierezu výstupného hrdla vody

$$S_{W2,NOVY} = \frac{\pi.D_{HR2,VNUT}^2}{4} = \frac{\pi.0{,}0703^2}{4} = 0{,}00388\left[m^2\right] \tag{7-7}$$

Zmena výstupnej rýchlosti vody

$$v_{W2,NOVA} = \frac{M'_{W2}}{S_{W2,NOVY}} = \frac{4{,}304.10^{-3}}{0{,}00388} = 1{,}109\left[m/s\right] \tag{7-8}$$

7.3 Výpočet vstupného hrdla na strane vzduchu

Vstupné parametre

- Teplota vzduchu $t_{VZD} = 227\left[°C\right]$
- Tlak vzduchu $p_{VZD1} = 1{,}3\left[Bar\right]$
- Hustota vzduchu $\rho_{VZD1} = 0{,}889\left[kg/m^3\right]$
- Objemový prietok $M'_{VZD1} = 6{,}490\left[m^3/s\right]$
- Vstupná rýchlosť $v_{VZD1} = 30\left[m/s\right]$

Prierez vstupného hrdla vzduchu

$$S_{VZD1} = \frac{M'_{VZD1}}{v_{VZD1}} = \frac{6{,}490}{30} = 0{,}216\left[m^2\right] \tag{7-9}$$

Priemer vstupného hrdla vzduchu

$$D_{HR,VZD1} = \sqrt{\frac{4S_{VZD1}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4.0{,}216}{\pi}} = 0{,}525\left[m\right] \tag{7-10}$$

Na základe vypočítaného priemeru vstupného hrdla vody volím najbližšiu vyššiu normalizovanú prírubu hrdla DN 600. Vnútorný priemer normalizovanej príruby DN 600 je $D_{HR1,VNUT} = 0{,}5958m$. Väčší priemer hrdla spôsobí zmenu vstupnej rýchlosti, ktorá klesne.

Zmena prierezu vstupného hrdla vzduchu

$$S_{VZD1,NOVY} = \frac{\pi.D_{HR1,VNUT}^2}{4} = \frac{\pi.0,5985^2}{4} = 0,279\left[m^2\right] \tag{7-11}$$

Zmena vstupnej rýchlosti vzduchu

$$v_{VZD1,NOVA} = \frac{M'_{VZD1}}{S_{VZD1,NOVY}} = \frac{6,490}{0,279} = 23,280\left[m/s\right] \tag{7-12}$$

7.4 Výpočet výstupného hrdla na strane vzduchu

Výstupné parametre

- Teplota vzduchu $t_{VZD2} = 122,79\left[°C\right]$
- Tlak vzduchu $p_{VZD2} = 1,295\left[Bar\right]$
- Hustota vzduchu $\rho_{VZD2} = 1,149\left[kg/m^3\right]$
- Objemový prietok $M'_{VZD2} = 5,020\left[m^3/s\right]$
- Výstupná rýchlosť $v_{VZD2} = 23,28\left[m/s\right]$

Prierez výstupného hrdla vzduchu

$$S_{VZD2} = \frac{M'_{VZD2}}{v_{VZD2}} = \frac{5,020}{23,28} = 0,215\left[m^2\right] \tag{7-13}$$

Priemer výstupného hrdla vzduchu

$$D_{HR,VZD2} = \sqrt{\frac{4S_{VZD2}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4.0,215}{\pi} = 0,524}\left[m\right] \tag{7-14}$$

Na základe vypočítaného priemeru výstupného hrdla vody volím najbližšiu vyššiu normalizovanú prírubu hrdla DN 600. Vnútorný priemer normalizovanej príruby DN 600 je $D_{HR2,VNUT} = 0,5958m$. Väčší priemer hrdla spôsobí zmenu vstupnej rýchlosti, ktorá klesne.

Zmena prierezu výstupného hrdla vzduchu

$$S_{VZD2,NOVY} = \frac{\pi.D_{HR2,VNUT}^2}{4} = \frac{\pi.0,5958^2}{4} = 0,278\left[m^2\right] \tag{7-15}$$

Zmena výstupnej rýchlosti vzduchu

$$v_{VZD2,NOVA} = \frac{M'_{VZD2}}{S_{VZD2,NOVY}} = \frac{5{,}020}{0{,}278} = 18{,}007\left[m/s\right] \tag{7-16}$$

8. ZÁVER

Cieľom diplomovej práce bolo navrhnúť a vypočítať trubkový výmenník vzduch – voda podľa zadaných a zvolených hodnôt. Jedná sa o netypický, zriedkavý variant trubkového výmenníku s prúdením vzduchu vo vnútri trubiek. Realizoval som tepelný výpočet dvoch variantov výmenníkov tepla z hľadiska vzájomného smeru prúdenia teplonosných médií a to pre krížový súprúd a protiprúd. Priebehy zmien teplôt oboch variantov sú na základe tabuliek spracované do prehľadných grafov. Oba varianty sú kruhového prierezu s vystriedaným usporiadaním trubiek a prúdením vody medzi trubkami a prepážkami. Ako výhodnejší variant podľa predpokladu lepšieho využitia teplotného spádu vychádza výmenník tepla s krížovým protiprúdom, ktorý je kratší, čo z hľadiska úspory materiálu ovplyvňuje ekonomickú náročnosť a návratnosť konštrukcie výmenníku. Takisto som pre obidva varianty vypočítal tlakové straty na strane vzduchu a vody a vypočítal a navrhol rozmery vstupných a výstupných hrdiel takisto na strane vzduchu a vody s ohľadom na normalizované prvky.

Zoznam použitej literatúry

[1] Firemné materiály ALSTOM Power, s.r.o., ALSTOM Group

[2] MAREŠ R., ŠIFNER O., KADRNOŽKA J.: *Tabulky vlastností vody a páry podle průmyslové formulace IAPWS - IF97,* VUTIUM Brno, 1999

[3] DLOUHÝ T.: *Výpočty kotlů a spalinových výměníků*, ČVUT, 2002

[4] KADRNOŽKA J. - OCHRANA L.: *Teplárenství*, ISBN 80-7204-222-X, Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. Brno, 2001

[5] BUDAJ F.: *Parní kotle – Podklady pro tepelný výpočet*, 4.vyd. Vysoké učení technické v Brně, 1992

[6] PAVELEK M.: *Termomechanika*, skripta VUT, 3.vyd. Vysoké učení technické v Brně 2003, 284 s., ISBN 80-214-2409-5

[7] ČERNÝ V.: *Technický průvodce 32 : Parní kotle*, 1. vyd. SNTL 1983, 864 s., L12-E1-IV-41/22601

[8] STEHLÍK P., KOHOUTEK J., NĚMČANSKÝ J. : *Tepelné pochody – výpočet výměníku tepla*, skripta VUT, Vysoké učení technické v Brně 1991, ISBN 80-214-0363-2

[9] JÍCHA M.: *Přenos tepla a látky*, Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. Brno, 2001, ISBN 80-214-2029-4

[10] KRBEK J. – POLESNÝ B. – FIEDLER J.: *Strojní zařízení tepelných centrál – návrh a výpočet*, PC – DIR, 1999

[11] KRBEK J. – OCHRANA L. - POLESNÝ B.: *Průmyslová energetika,* PC – DIR, 1996

[12] BARTSCH H.-J., *Matematické vzorce*, SNTL Praha, 1987

[13] http://www.spsko.cz/documents/MEC_kratochvil/TERMOMECHANIKA_INTERNET_DOC/18_Vymeniky_tepla.pdf

Zoznam použitých symbolov

Značka	Názov	Jednotka
c_p	Merná tepelná kapacita	[J/kg.K]
D	Vonkajší priemer	[m]
d	Vnútorný priemer	[m]
k	Súčiniteľ prestupu tepla	[W/m^2.K]
k	Absolútna drsnosť vnútornej steny trubky	[m]
L	Dĺžka	[m]
M	Hmotnostný prietok	[kg/s]
M´	Objemový prietok	[m^3/s]
n	Počet trubiek	[-]
Nu	Nusseltovo číslo	[-]
p	Tlak	[Pa]
Pr	Prandlovo číslo	[-]
Q	Tepelný výkon	[W]
R	Odpor proti prestupu tepla	[m^2.K/W]
Re	Reynoldsovo číslo	[-]
S	Plocha	[m^2]
S	Prierez	[m^2]
s	Rozteč trubiek	[m]
T	Teplota	[K]
t	Teplota	[°C]
t	Hrúbka plechu	[m]
w	Rýchlosť	[m/s]
α	Súčiniteľ prestupu tepla	[W/m^2.K]
Ø	Priemer	[m]
ε	Pomerná drsnosť trubiek	[-]
λ	Súčiniteľ tepelnej vodivosti	[W/m.K]
λ	Súčiniteľ trenia	[-]
μ	Dynamická viskozita	[kg/m.s]
ν	Kinematická viskozita	[m^2/s]
ξ	Stratový súčiniteľ	[-]
π	Ludolfovo cislo	[-]
ρ	Hustota	[kg/m^3]

Zoznam použitých indexov

1	Vstup
2	Výstup
W	Voda
VZD	Vzduch
OC	Oceľ
TR	Trubky
STR	Stredný
PR	Prevádzkový
SEG	Segmenty
LN	Logaritmický
HR	Hrdlo
VNUT	Vnútorný
NOVY	Nový
PL	Plášť
ÚS	Úseč
PRIEM	Priemerný

Zoznam výkresovej dokumentácie

PROJEKČNÝ NÁVRH 2-5O/1-01