

# MODELOVANIE POHYBU PRÚDENIA V POTRUBNÝCH SYSTÉMOCH

Dušan Kudelas<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Oddelenie OZE, Ústav zemských zdrojov, FBERG, TU v Košiciach, Park Komenského 19, 04200 Košice, tel.: +421 55 602 2993, mail: dusan.kudelas@tuke.sk

**Abstrakt:** *Predložená práca sa zaoberá modelovaním prúdenia kvapaliny a prenosu tepla v rozdeľovači tepla, ktorý slúži na distribúciu tepla zo zdroja ku spotrebiteľom prostredníctvom tepelnej siete. Na základe modelovania pochopiť a spresniť ovplyvňovanie sa prúdenia teplotnosnej látky v jednotlivých vetvách, či už výstupných smerov do siete, alebo vratných smerom ku zdroju tepla. Porovnané sú namodelované teploty s teplotami reálne nameranými. Na základe rozvrstvenia prúdenia a teplôt, sú vyhodnotené tieto hodnoty a zhodnotená možná odchýlka, ktorá by mohla ovplyvňovať chybu merania vyrobeného tepla. Na základe výsledkov analýzy boli navrhnuté možné úpravy aj pre ďalšie aplikácie takýchto konštrukčných modelov rozdeľovačov tepla z čoho najlepším využitím distribúcie tepla, najpresnejším meraním tepla s dôrazom na čo najvyššiu úsporu primárnej energie.*

**Summary:** *The presented work deals with modeling of liquid flow and heat transfer in the heat distributor which serves to distribute heat from the source to the consumers through the thermal network. Based on modeling, understand and refine the influence of the flow of the heat transfer medium in individual branches, whether output directions to the grid or return to the heat source. Compared are the model temperatures with real measured temperatures. On the basis of flow and temperature stratification, these values and estimated potential deviations that could influence the measurement error of the heat produced are evaluated. Based on the results of the analysis, possible modifications were also proposed for further applications of such heat-distributing structural models using the best possible heat distribution using the most accurate heat measurement, with the emphasis on saving as much as possible of primary energy.*

**Key words:** *fluid flow modelling, heat transfer, computational fluid dynamics*

## 1 ÚVOD

Potrubný systém v ktorom budeme modelovať prúdenie pohyb prúdenia a s ním spojené šírenie tepla je vlastne spojitý rozdeľovač tepla, prostredníctvom ktorého je teplo vyrobené na zdroji tepla - kotol na spaľovanie biomasy s výkonom 4MW, prerozdelené a distribuované do jednotlivých vetiev tepelnej siete a dopravované ku konečným spotrebiteľom. Zdroj tepla je kotol na biomasu, ako centrálny zdroj, ktorý zásobuje teplom 52 objektov. Tieto objekty sú spojené so zdrojom tepelnou sieťou, dĺžkou 12 039 m, ktorá pozostáva z troch vetiev. Vetva Centrum, Vetva Sever a Vetva Hnedý park (priemyselná zóna).

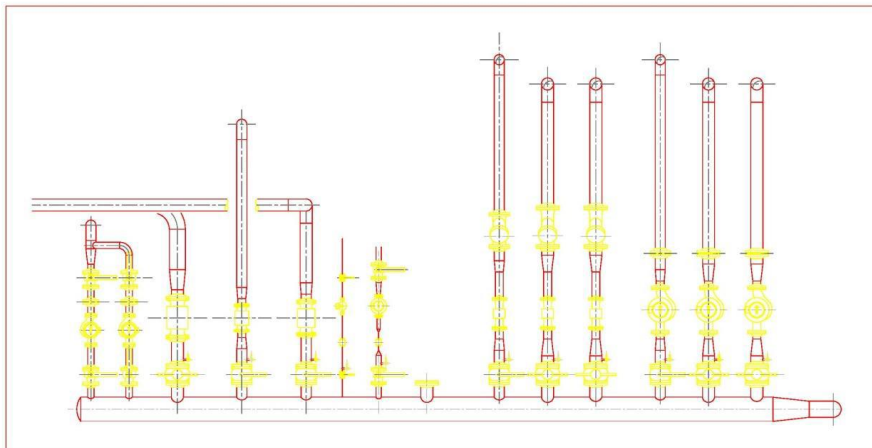
Na rozdeľovač tepla sú okrem kotla na biomasu napojené aj štyri plynové kotly na plyn, ktoré slúžia ako záložný zdroj tepla v prípade výpadku kotla na biomasu a doplňovací systém vody a expanzné zariadenie na vyrovnávanie tlaku. Telo samotného rozdeľovača je

vyrobené z oceľových materiálov. Teplonosnou látkou je voda a prúdenie kvapaliny je zabezpečené núteným obehom čerpadlami. Tento rozdeľovač tepla je vybavený regulačnými prvkami a armatúrami, ktoré sú inštalované v systéme. Jedná sa o hlavne o trojcestné zmiešavacie ventily, spätné klapky, merače tepla a uzatváracie armatúry. Ďalej sú tam snímače tlaku a teploty.

Pri modelovaní sa hlavne zameriame na prúdenie teplonosnej látky medzi prívodným potrubím zo zdroja tepla a vratným potrubím, ktoré sú konštrukčne blízko seba a výrazne sa ovplyvňujú, hlavne v letnom období, keď objemové množstvo vody odchádzajúce z rozdeľovača je podstatne menšie ako objem vody, ktorý je privádzaný do rozdeľovača zo zdroja tepla, ktorým je teplovodný kotol na biomasu. Toto množstvo je transportované obehovým čerpadlom, ktoré privádza ohriatu vodu o prietoku cca 220 m<sup>3</sup>/h do rozdeľovača a je po celý čas, s malými odchýlkami takmer konštantný. Táto skutočnosť je podmienená riadením kotla, ktoré je principiálne postavené práve na konštantnom prietoku. Prejavuje sa to hlavne počas letných mesiacov, keď je potrebné teplo len na prípravu ohriatej pitnej vody.

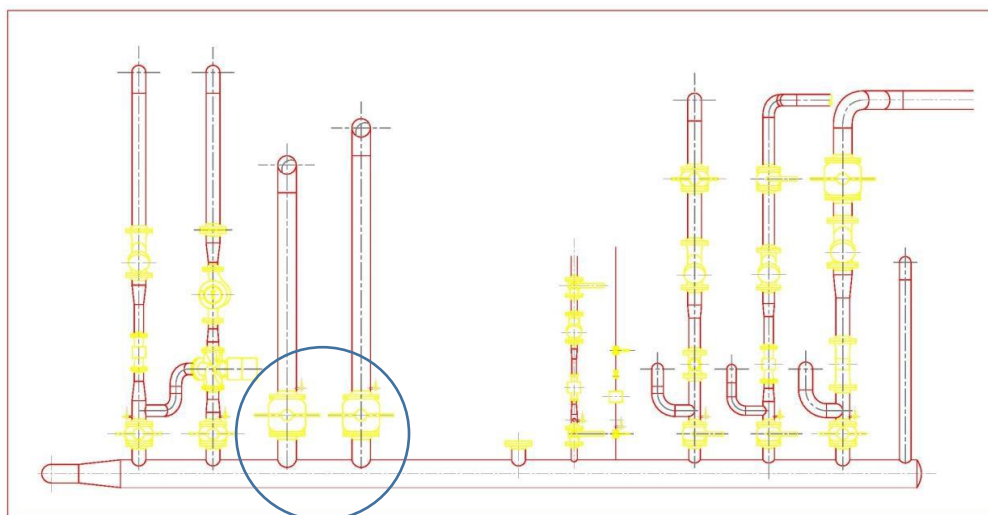
## 2 MODEL ROZDEĽOVAČA

Celý rozdeľovač tepla, zo všetkými jeho súčasťami je veľmi zložitý, preto nám pre vytvorenie 3D modelu ako predloha slúžila jeho zjednodušená schéma.



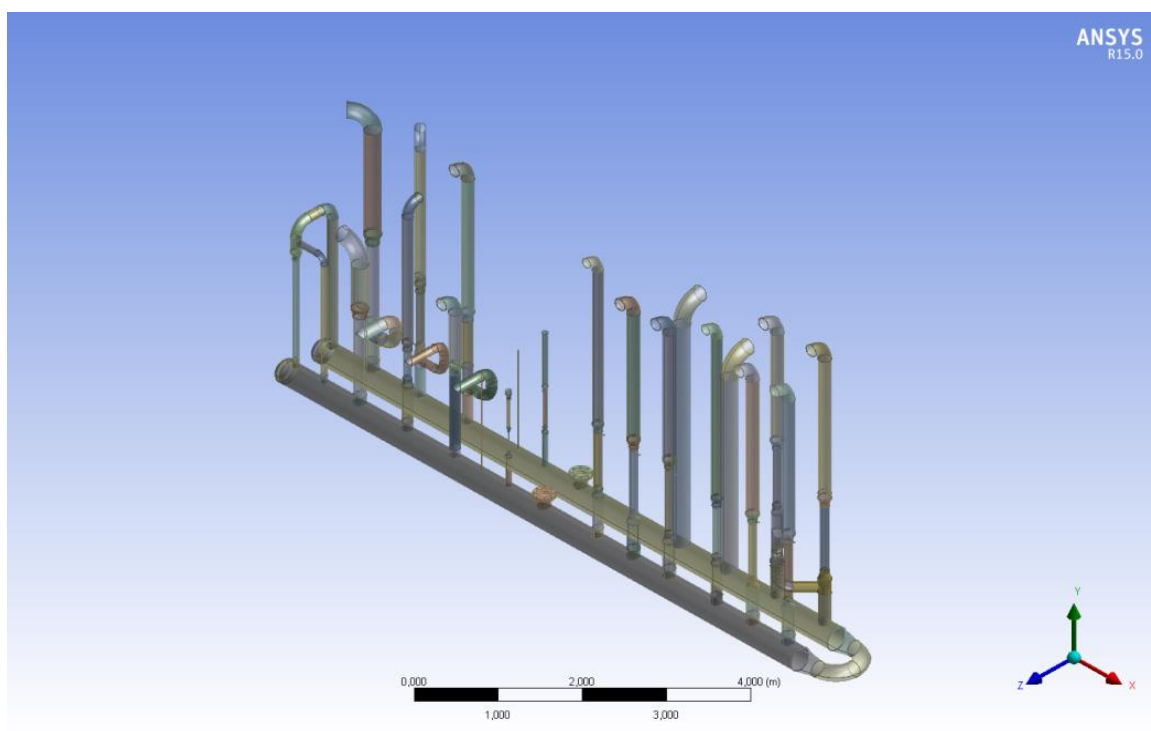
Obrázok 1. Schéma predlohy pre 3D model

Na nasledovnom obrázku je zvýraznená oblasť ktorá nás bude najviac zaujímať z pohľadu prúdenia kvapaliny a rozvrstvenia teplôt. Táto oblasť bude najdôležitejšia s pohľadu zmeny vstupujúcich parametrov, prípadnej zmeny konštrukcie samotného rozdeľovača.



Obrázok 2. Vyznačená zóna záujmu

Na základe tejto predlohy sme vytvorili vo formáte IGES, ktorý je kompatibilný s programom ANSYS Fluent 3D model rozdeľovača. V tomto modeli, už pre spomenuté zjednodušenie mohli ostať iba hladké potrubné časti rozdeľovača.

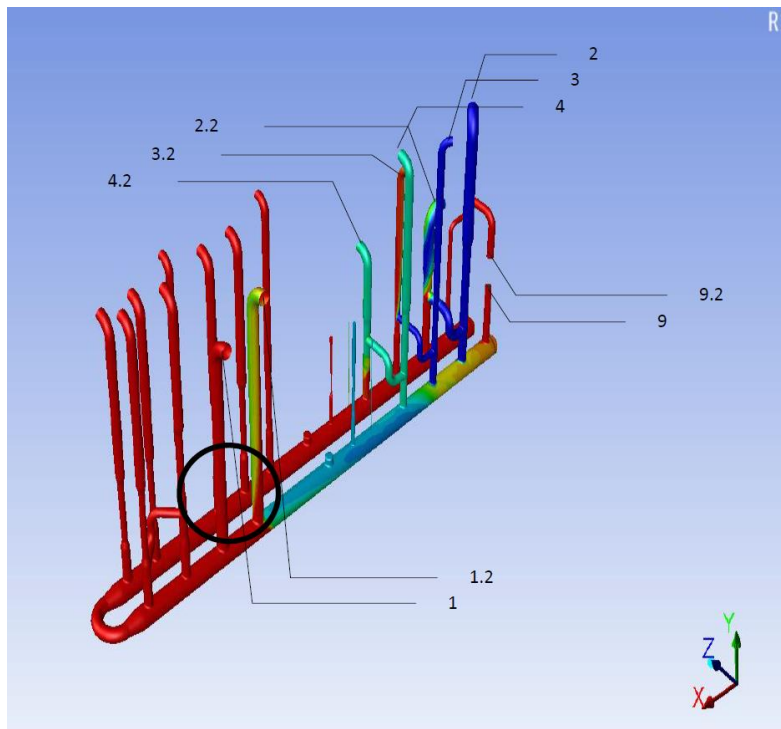


Obrázok 3. Výsledný 3D model

Pre diskreditáciu fyzikálneho priestoru sme zvolili neštruktúrovanú, tetrahedrálnu sieť - tetrahedral mesh. Bunky tejto siete majú tzv. tetrahedrálnu geometriu. Výpočtový model bol použitý k-omega, ktorý je takisto vhodný pre turbulentné prúdenia, ale je menej citlivý na veľké zakrivenia, víry a prúdy. Na vstupe aj výstupe boli použité podmienky velocity inlet. Na výstupe so záporným znamienkom.

### 3 MODELOVÁ SITUÁCIA ZIMNEJ PREVÁDZKY A VERIFIKÁCIA VÝSLEDKOV

Pri modelových situáciách musíme ešte brať do úvahy že, daný rozdeľovač, ktorý nám predstavuje časť potrubného systému, je vlastne súčasť uzavretého celku. To znamená aby prúdenie v ňom prebiehalo korektne a transport tepla spolu s prúdením mal žiadaný smer musíme zadať na základe rovnice kontinuity a Bernoulliho rovnice, ktoré nám predstavujú zákon zachovania energie v ustálenom toku kvapaliny, ako okrajové podmienky, aj tie isté hodnoty rýchlosti prúdenia na výstupoch z vetiev ako sú na vstupoch. Pre zjednodušenie výpočtu a zo skúseností z praxe, kedy sú počas prevádzky všetky vstupy a výstupy na rozdeľovači označené ako plynový kotol K1,K2,K3,K4 ( inlet 5,6,7,8 a outlet 5.2,6.2,7.2,8.2) zavreté, pretože predstavujú len záložný zdroj tepla, tieto vstupy a výstupy zavrieme aj my. Budeme sa viac venovať len vyznačenej oblasti medzi vstupným a výstupným potrubím, ktorým je pripojený na rozdeľovač kotol na biomasu, čiže inlet 1 a outlet 1.2 . Teploty na výstupoch 1.2,2.2 ,3.2 a 4.2, ktoré získame výpočtom a v tabuľke sú značené červenou farbou, budú slúžiť na porovnanie zo skutočným stavom, na kontrolu verifikácie riešenia.



Obrázok 4. Oblasti vstupu a výstupu. Pozn. Neoznačené potrubia boli uzavreté

Zadávané hodnoty budú rýchlosť prúdenia na vstupe a výstupe do jednotlivých otvorených vetiev a teplota na vstupe . Všetky tieto meniace sa hodnoty budú v tabuľkách pri jednotlivých simuláciách. Hodnoty podmienok pre nasledujúcu simuláciu sú v tabuľke zadané pri vonkajšej teplote 9,1 °C . Jedná sa o zimnú prevádzku.

	Inlet - vstup				Outlet- výstup		
	DN	Č.	m/s	K(°C)	Č.	m/s	K(°C)
kotol biom.	200	1	1,49	364,15(91)	1.2	1,49	353,95 (80,8)
vetva Cent.	200	2	0,3	316,15(43)	2.2	0,3	341,25(68,1)
Vetva Sever	125	3	0,88	315,15(42)	3.2	0,88	327,62(54,47)
Vetva HP	150	4	0,24	330,15(57)	4.2	0,24	340,55(67.4)

Tabuľka 1. Vstupné a výstupné hodnoty – zimná prevádzka

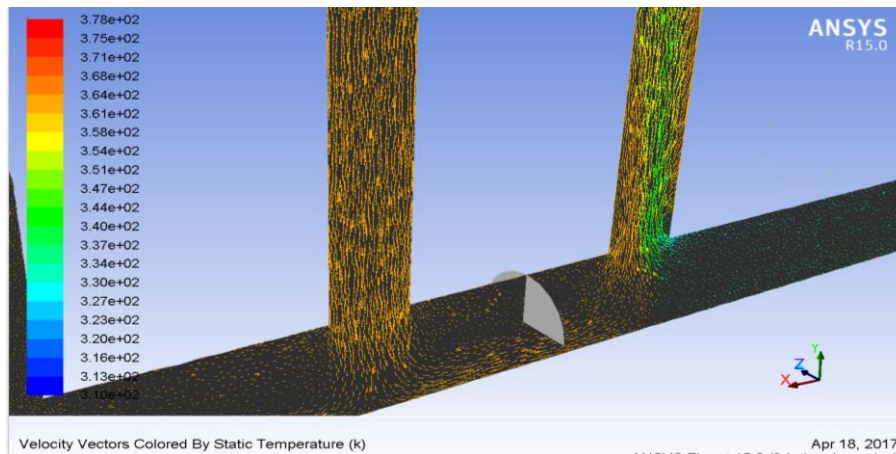
Na základe skúseností z praxe a vypočítaných teplôt na výstupoch, môžeme tento výsledok verifikovať ako korektný, nakoľko rozloženie vypočítaných teplôt na rozdeľovači zodpovedá reálne nameraným teplotám a odchýlka vypočítaných a nameraných teplôt je minimálna. Teploty na porovnanie sú uvedené na nasledovnom obrázku

Outlet-výstup	Vypočítané teploty °C	Namerané teploty °C
1.2	80,8	82,1
2.2	68,1	67,8
3.2	54,47	56,1
4.2	67,4	69,7

Tabuľka 2. Verifikácia výstupov zimnej prevádzky

Teplá voda, vstupujúca cez vstup 1., čiže prívod od zdroja tepla, ktorým je kotol na biomasu, je do značnej miery nasávaná späť do výstupu 1.2, miesto toho ,aby jej prúdenia bolo smerované ku výstupom 2.2,3.2,4.2 . Tento jav je nežiadúci, ale vo vykurovacom období sa nejaví ako problematický, lebo rozdiel teplôt vstupu aj výstupu na prívodnom a vratnom potrubí sa pohybuje v rozmedzí 10 až 15 °C.

Z dôvodu odstránenia tohto problému sme pristúpili k malej konštrukčnej zmene tela rozdeľovača a to tým, že vložíme do 3D modelu priehradku, ktorá nám bude simulovať škrtiaci element na ovplyvnenie a reguláciu prietoku v nami sledovanom mieste. Táto priehradka bude siahať až do polovice potrubia, ktoré tvorí telo rozdeľovača. Pre porovnanie sme pre nasledujúci výpočet nechali všetky zadané hodnoty a okrajové podmienky z predchádzajúcej simulácie prúdenia.



Obrázok 5. Umiestnenie priehradky a vizualizácia vektorového poľa

Rozdiel teplôt vstup a výstup od kotla na biomasu bol v simulácii bez priehradky  $10,2^{\circ}\text{C}$  a v prípade s priehradkou  $11,8^{\circ}\text{C}$ , čo je tak malý rozdiel, že tento zásah do tela rozdeľovača mal minimálny vplyv na smer prúdenia a prenos tepla. Po dôkladnejšej analýze, môžeme len konštatovať, že prúdenie v spodnej časti potrubia je zhustené, pred a za priehradkou sa tvorí turbulentné prúdenie, ale ani takáto prekážka nezmení pri zadaných parametroch rýchlosti v jednotlivých vetvách jeho smer a prúdenie v prívodnom potrubí naďalej výrazne ovplyvňuje prúdenie a teplotu vo vratnom potrubí na zdroji tepla. Na základe tohto poznatku sme prišli k druhej možnosti, ako tento nežiaduci jav eliminovať a to znížením rýchlosti prúdenia na vstupe 1 a výstupe 1.2 tak, aby znížená rýchlosť zodpovedala dostatočnému hmotnostnému prietoku v  $\text{m}^3$  za hodinu, ktorý by pokryl potreby prenášaného výkonu pri nezmenených rýchlostiach prúdenia na vstupe a výstupe ostatných vetiev.

Túto rýchlosť sme stanovili na  $0,88 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Ostatné vstupné a výstupné parametre zostali rovnaké.

Vypočítaná teplota na výstupe 1.2 je  $70,79^{\circ}\text{C}$ , čo je oproti teplote na vstupe 1, ktorá je  $91^{\circ}\text{C}$ , nižšia o  $20,21^{\circ}\text{C}$ , čo je podstatne výraznejší rozdiel ako pri simulácii s priehradkou. Z toho môžeme dedukovať, že zníženie rýchlosti na vstupe 1 a výstupe 1.2 môže mať výraznejší vplyv na prúdenie v inkriminovanom mieste rozdeľovača.

#### 4 MODELOVÁ SITUÁCIA LETNEJ PREVÁDZKY A VERIFIKÁCIA VÝSLEDKOV

Na základe týchto poznatkov sme pristúpili k modelovaniu prúdenia v rozdeľovači tepla v letnom období, kde rozdiel teplôt v prívodnom a vratnom potrubí sa blíži k hraničnému rozdielu  $3^{\circ}\text{C}$ , ktoré merač tepla akceptuje pre správny výpočet energie. Zadané vstupné a výstupné parametre sú teploty a rýchlosti prúdenia v rozdeľovači charakteristické pre letnú prevádzku. Znova môžeme skontrolovať výsledok výpočtu porovnaním vypočítaných teplôt a teplôt nameraných pri prevádzkovom stave.

Nové zadávané hodnoty zadávaných fyzikálnych veličín sú v nasledovnej tabuľke.

	Inlet - vstup				Outlet- výstup		
	DN	Č.	m/s	K(°C)	Č.	m/s	K(°C)
Zdroj tepla	200	1	1,33	364,15(91)	1.2	1,33	359,26(86,11)
Vetva Centru	200	2	0,16	318,85(45,7)	2.2	0,16	335,85(62,7)
Vetva Sever	125	3	0,18	319,65(46,5)	3.2	0,18	333,45(60,3)
Vetva HP	150	4	0,08	328,15(55)	4.2	0,08	329,95(56,8)

Tabuľka 3. Vstupné a výstupné hodnoty – letná prevádzka

Vypočítané teploty vystupujúce zo simulácie sú rozdielnejšie so skutočnými hodnotami ako v prípade simulácie zimnej prevádzky, ale ešte stále je tento rozdiel považovaný prijateľný, aby sme aj tento výsledok mohli považovať za správny.

Outlet-výstup	Vypočítané teploty °C	Namerané teploty °C
1.2	86,11	87,9
2.2	62,7	57,6
3.2	60,3	55,9
4.2	56,8	60,3

Tabuľka 4. Verifikácia výstupov letnej prevádzky

Množstvo teplej vody prichádzajúcej do rozdeľovača tepla cez vstupné potrubie je tak výrazné, že veľká časť tohto prúdenia je znova nasávaná do výstupného potrubia a ovplyvňuje teplotu vratnej vody do kotla na biomasu. Po predchádzajúcich výsledkoch, kde pri zmene prúdenia kvapaliny v simulovaní zimnej prevádzky sme výraznejší úspech nedosiahli použitím priehradky v ležatom potrubí rozdeľovača, sme tento krok preskočili a hneď prešli k ďalšiemu výpočtu so zníženou rýchlosťou na vstupe a výstupe do rozdeľovača zo strany zdroja tepla. Tak ako v predchádzajúcich prípadoch ostatné veličiny ostali zachované. Rýchlosť prúdenia bola znížená na  $0,44 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

Rozdiel teplôt medzi nameranou hodnotou na výstupe 1.2 a vypočítanou hodnotou po znížení rýchlosti na  $0,44 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  je  $11,68 \text{ °C}$ . Z uvedených skutočností a výsledkov modelovania môžeme konštatovať, že je počas letnej prevádzky je účinné zníženie rýchlosti prúdenia vstupujúceho do rozdeľovača od zdroja tepla, ktorým je teplovodný kotol na spaľovanie biomasy.

## ZÁVER

Na základe modelovania prúdenia v potrubnom systéme, ktorý predstavoval rozdeľovač tepla, môžeme pre tento konkrétny prípad vyvodit' nasledovné uzávery. Takmer všetky modelové situácie dospeli ku korektným výsledkom, ktoré sme vyhodnotili



porovnaním modelovej situácie so skutočnosťou. V kritickom mieste rozdeľovača sa nám pomocou modelovania podarilo objasniť, do akej miery sa prúdenia, pri rôznych rýchlostiach v jednotlivých potrubíach ovplyvňujú a aký to má vplyv na teplotu v prírodnom a vratnom potrubí s pohľadu presnosti merania kalorimetrickým meradlom pri distribúcii tepla. Prvým návrhom na odstránenie tohto javu, bolo vložiť prúdeniu kvapaliny do cesty prekážku tak, aby sa zamedzilo tomuto miešaniu prúdení a stúpanie teploty vody vo vratnom potrubí. Následné počítačové modelovanie danej situácie nám odhalilo, že aj prekážka siahajúca do polovice ležateho potrubia rozdeľovača je málo účinná, aby sa pri daných prietokoch tomuto javu zabránilo. Nakoľko sme ale zistili aj inú skutočnosť a táto nám ukazuje, že táto prekážka neprekáča ani prúdeniu teplotnej kvapaliny, ani distribúcii tepla v iných častiach rozdeľovača, stojí za uváženie, že návrh s priehradkou celkom nezavrhneme. Dokonca by sme na základe tohto výsledku mohli uvažovať s vložením regulačného prvku do tohto miesta rozdeľovača, ktorý by mohol mať aj uzatváraciu funkciu a v prípade, že ako zdroj tepla slúži len kotol na biomasu a ostatné kotly sú len v záložnom režime, by sme tým regulačným, uzatváracím prvkom mohli telo rozdeľovača celkom uzavrieť. Jeho spojitá funkcia by bola prerušená, vznikol by normálny rozdeľovač tepla, kde prírodné potrubia by boli oddelené od výstupných. Mohli by sme to zabezpečiť vložením medzi prírubovej uzatváracej klapky, ktorá by slúžila tak ako na reguláciu prietoku, tak aj na prípadné uzavretie celého potrubia v danom mieste. Toto riešenie s celkovým uzavretím potrubia by bolo vhodné ešte pred tým namodelovať. Nevýhoda tohto riešenia, by bola aj investícia do armatúry, odstávka dodávky tepla z dôvodu konštrukčného zásahu do tela rozdeľovača a neistý výsledok, vzhľadom na výsledky našich modelových simulácií s priehradkou. Druhým riešením, ktoré nám aj výpočty potvrdili, že je účinnejšie obmedzenie prietoku, zo strany zdroja tepla, ktorý je hlavne v letnom období prebytočný.

## LITERATÚRA

- [1] Yuri BAZILEVS, Kenji TAKIZAWA, Advances in Computational Fluid-Structure Interaction and Flow Simulation: New Methods and Challenging Computations (Modeling and Simulation in Science, Engineering and Technology), Birkhäuser, 2016, ISBN: 978-3319408255
- [2] Marian BOJKO, 3D Proudění – ANSYS Fluent, 2012, Vysoká škola báňská- Technická univerzita Ostrava, Ediční středisko VŠB – TUO, str.309, ISBN 978-80-248-2607-3
- [3] Tomáš BRESTOVIČ, Natália JASMINSKÁ, Numerické metódy a modelovanie v energetike, 2015, Technická univerzita v Košiciach, Strojnícka fakulta, ISBN 978-80-553-0223-2
- [4] Robert BRIDSON, Fluid Simulation for Computer Graphics, Second Edition 2nd, A K Peters/CRC Press, 2011, ISBN: 978-1482232837
- [5] Abram S. DORFMAN, Applications of Mathematical Heat Transfer and Fluid Flow Models in Engineering and Medicine, University of Michigan, 2017, ISBN: 978-1-119-32056-2
- [6] Tarek ECHEKKI, Turbulent Combustion Modeling: Advances, New Trends and Perspectives (Fluid Mechanics and Its Applications), Springer, 2013, ISBN: 978-9400734777
- [7] Salim Newaz KAZI, Heat Transfer Studies and Applications, CC.BY 3.0 license, 2015, ISBN 978-953-51-2146-6
- [8] Milada KOZUBKOVÁ, Modelování proudění tekutin FLUENT, CFX, Ostrava 2008, Vysoká škola báňská – Technická Univerzita Ostrava
- [9] Milada KOZUBKOVÁ, Tomáš BLEJCHAŘ, Marian BOJKO, Modelování přenosu tepla, hmoty a hybnosti, Ostrava, VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2011, ISBN - 978-80-248-2491-8



- [10] Michael LESCHZINER, Statistical Turbulence Modelling For Fluid Dynamics - Demystified: An Introductory Text For Graduate Engineering Students, Icp, 2015, ISBN: 978-1783266616
- [11] Christophe MOREL, Mathematical Modeling of Disperse Two-Phase Flows (Fluid Mechanics and Its Applications), Springer, 2016, ISBN: 978-3319369129