



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV PROCESNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
INSTITUTE OF PROCESS ENGINEERING

TERMoeLEKTRICKÝ GENERÁTOR PRO ZPLYŇOVACÍ KOTEL  
THERMOELECTRIC GENERATOR GASIFICATION BOILER

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Bc. Samuel Kováč

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

Ing. David Jecha, Ph.D.

*BRNO 2024*

## Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav procesního inženýrství  
Student: **Bc. Samuel Kováč**  
Studijní program: Procesní inženýrství  
Studijní obor: bez specializace  
Vedoucí práce: **Ing. David Jecha,**  
**Ph.D.** Akademický rok: 2023/24

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:

### **Termoelektrický generátor pro splyňovací kotel**

#### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Téma reaguje na potřebu tepelného zdroje nezávislého na dodávce el. energie. Pokud dojde ke snížení el. příkonů kotlů může dojít k aplikaci termoelektrického generátoru (TEG) k pokrytí jejich spotřeby kotle. Prvním krokem řešení bude seznámení se s problematikou autonomního zdroje elektrické energie pro kotel na spalování biomasy pomocí termoelektrického modulu využívajícího odpadního tepla kotle. Pro návrh TEG bude nutný popis teplotního pole, kde bude využito matematických simulací spalovací části kotle pomocí CFD modelu (proudění, přestup tepla). Matematický model bude verifikován experimentálním měřením na zkušebně.

#### **Cíle diplomové práce:**

Popis principů termoelektrické přeměny.

Přehled používaných termoelektrických materiálů.

Popis zplyňovacího kotle včetně, spotřeby el. energie.

Experimentální stanovení teplotního pole.

Tvorba modelu CFD modelu pro analýzu přestupu tepla v spalovací části.

Provedení a vyhodnocení CFD simulací s ohledem na přestup tepla a upřesnění volby místa umístění TEG.

Provedení volby optimálního typu modulu, jeho teplotní úroveň, konstrukční řešení upevnění.

**Seznam doporučené literatury:**

JAZIRI, Nesrine, Ayda BOUGHAMOURA, Jens MÜLLER, Brahim MEZGHANI, Fares TOUNSI a Mohammed ISMAIL. A comprehensive review of Thermoelectric Generators: Technologies and common applications. Energy Reports [online]. 2019. DOI: 10.1016/j.egy.2019.12.011. ISSN 23524847.

ROWE, D.M., Materials, Preparation, and Characterization in Thermoelectrics: Thermoelectrics and Its Energy Harvesting (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b11891> (2012)

ROWE, D.M. (Ed.). Thermoelectrics Handbook: Macro to Nano (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420038903> (2006)

ROWE, D.M. (Ed.). CRC Handbook of Thermoelectrics (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420049718> (1995)

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2023/24

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Petr Stehlík, CSc., dr. h. c.

ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.

děkan fakulty

## Abstrakt

S rastúcimi požiadavkami na plnosť využitia tepla, ktoré je produkované rastie aj snaha o využitie odpadového tepla. Jednou z možností ako takéto teplo využiť je priama premena tepelnej energie na elektrickú. K tomuto účelu slúži zariadenie nazývané termoelektrický generátor (TEG). V dnešnej dobe sa nachádzajú v skôr stále rozvojovej časti ich existencie. Limitujúcim faktorom je účinnosť doposiaľ známych termoelektrických materiálov. Napriek tomu táto technológia nachádza svoje využitia v praxi. Táto práca sa zaoberá základnými princípmi termoelektrickej premeny, doposiaľ objavenými materiálmi, ich účinnosťou a v neposlednom rade aplikáciou TEG v splyňovacom kotli na kusové drevo. Hlavnou myšlienkou projektu prebiehajúcim v spolupráci VUT a Ecoscroll je vývoj spaľovacieho zariadenia, ktoré by mohlo fungovať bez trvalého pripojenia do elektrickej siete, popripade optimalizácia elektrického príkonu takéhoto zariadenia. Splyňovací kotol je vybraný s toho dôvodu že zo svojej podstaty vyžaduje nízky elektrický príkon.

**Kľúčové slová:** splyňovací kotol, termoelektrický generátor, CFD, TEG termoelektrické materiály

## Abstract

With growing demands for the full use of the heat that is produced, the effort to use waste heat is also growing. One of the ways to use such heat is the direct conversion of thermal energy into electrical energy. A device called a thermoelectric generator (TEG) is used for this purpose. Nowadays, they are in a rather still developing part of their existence. The limiting factor is the efficiency of the thermoelectric materials known so far. Nevertheless, this technology finds its uses in practice. This work deals with the basic principles of thermoelectric conversion, the materials discovered so far, their efficiency and, last but not least, the application of TEG in a gasification boiler for lump wood. The main idea of the project, carried out in cooperation between BUT and Ecoscroll, is the development of a combustion device that could function without a permanent connection to the electrical network, or the optimization of the electrical input of such a device. The gasification boiler is chosen for the reason that, by its very nature, it requires low electrical power.

**Key words:** gasification boiler, thermoelectric generator, CFD, TEG, Thermoelectric materials

KOVÁČ, Samuel. *Termoelektrický generátor pro splyňovací kotel* [online]. Brno, 2024 [cit. 2023-09-05]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/15412>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního inženýrství. Vedúcí práce: David Jecha.

## ČESTNÉ PREHLÁSENIE

Vyhlasujem, že táto práca je mojím pôvodným dielom, spracoval som ju samostatne pod vedením Ing. Davida Jechy, Ph.D a konzultantov Ing. Tomáša Juřeny, Ph.D, Ing. Mariána Brázdila, Ph.D. a s použitím literatúry uvedenej v zozname na konci práce.

V Brne, dňa

.....  
Samuel Kováč

## **POĎAKOVANIE**

Touto formou by som chcel poďakovať svojmu vedúcemu Ing. Davidovi Jechovi Ph.D, za prejavenu trpezlivosť pri tvorbe diplomovej práce.

Poďakovanie tiež patrí Ing. Tomášovi Juřenovi, Ph.D za jeho ústretovosť a cenné rady pri tvorbe simulácií.

V neposlednom rade by som chcel poďakovať svojej rodine za podporu při tvorbe tejto práce a štúdiu na vysokej škole.

# OBSAH

Úvod .....	1
1. Teoretická časť .....	2
1.1 Popis termoelektrickej premeny .....	2
1.1.2 Seebeckov jav .....	3
1.1.3 Peltierov jav .....	4
1.1.4 Thompsnov jav .....	4
1.2 Termoelektrické materiály a ich vlastnosti .....	4
1.2.1 Koeficienty termoelektrickej účinnosti $Z$ a $ZT$ .....	5
1.2.2 Polovodiče ako termoelektrický materiál .....	7
1.2.3 Prehľad termoelektrických materiálov .....	8
1.3 Termoelektrické generátory .....	10
1.4 Prehľad prípadových štúdií termoelektrických modulov v spaľovacích aplikáciách .....	11
1.4.1 Biomasový peletový kotol .....	11
1.4.2 Automatický kotol na biomasu Verner A251.1 .....	13
1.4.3 Kotol na zemný plyn .....	14
1.5 Popis funkcie splyňovacieho kotla .....	16
2. Splyňovací kotol Ekoscroll .....	17
2.1 Meranie parametrov kotla .....	18
2.2 Spotreba elektrickej energie splyňovacieho kotla .....	20
2.3 Experimentálne stanovenie teplotného poľa kotla .....	23
3. Výpočtová časť .....	26
3.1 Spaľovací vzduch .....	26
3.2 Užitočné teplo spalín .....	28
3.3 Entalpia spalín .....	29
3.4 Teplota nechladeného plameňa .....	31
3.5 Splyňovanie tuhého paliva .....	31
3.6 tepelná bilancia kotla .....	33
3.7 Stanovenie hodnôt koeficientov prestupu tepla stien kotla .....	33
3.8 CFD simulácie voľnej konvekcie vody .....	34
3.8.1 Geometria .....	34
3.8.2 Výpočtová sieť .....	35
3.8.3 Model turbolencie .....	36
3.8.4 Materiály .....	36
3.8.5 Okrajové podmienky .....	36
3.8.6 Výsledky .....	36



4.	CFD Model spaľovania v kotli .....	37
4.1	Geometria kotla .....	37
4.2	Výpočtová sieť .....	38
4.3	Výber a nastavenie fyzikálnych modelov.....	39
4.3.1	Materiály .....	39
4.3.2	Model Turbulencie .....	40
4.3.3	Model spaľovania .....	41
4.3.4	Model Transportu zložiek spaľovania .....	42
4.3.5	Model Radiácie .....	42
4.4	Okrajové podmienky .....	43
4.4.1	Okrajová podmienka Inlet .....	43
4.4.2	Okrajová podmienka Outlet.....	43
4.4.3	Objemová zóna, zdroj hmoty a energie .....	43
4.4.4	Okrajová podmienka vodou chladených stien .....	44
4.4.5	Okrajová podmienka steny spľovacej komory .....	44
4.4.6	Okrajová podmienka steny coupled .....	44
4.4.7	Ostatné steny.....	44
4.4.8	Súhrn Okrajových podmienok.....	45
4.5	Nastavenia monitoringu konvergencie .....	45
4.6	Nastavenia riešiča .....	46
5.	Výsledky simulácie.....	47
6.	Návrh TEG zostavy.....	52
6.1	Výber TEG modulu .....	52
6.2	Konštrukčné riešenie upevnenia .....	52
6.2.1	Chladenie.....	53
6.2.2	Výmenník tepla.....	53
	Záver.....	55
	Zoznam použitej literatúry.....	56
	Zoznam obrázkov .....	61
	Zoznam tabuliek.....	62

## Úvod

Technológia splyňovacích kotlov v posledných rokoch sa ukázala byť, ako najslubnejšia vo využití energie paliva vo forme biomasy pre lokálne výhrevné systémy. Je tomu tak vďaka ich vysokej účinnosti a nízkym emisiám. Technológia je tiež verzatilná, čo sa týka použitia paliva. V súčasnosti sa ako palivo do splyňovacích kotlov používajú hlavne drevo, drevné pelety, biomasa, poľnohospodárske zvyšky a uhlie. Pre funkciu splyňovacieho kotla je nutné do zariadenia dodávať energiu vo forme elektrického príkonu elektrických častí zariadenia, čerpadla, riadiacej jednotke, ventilátoru.

Pre zníženie závislosti zariadenia na pripojení do elektrickej siete je iniciatíva do kotla integrovať termoelektrické články typu TEG (termoelektrický generátor). Ide o zariadenia bez pohyblivých častí, schopné premieňať tepelnú energiu priamo na elektrickú. TEG sa skladajú z TE (termoelektrických) dvojíc zapojených do série. Tieto TE dvojice sú chránené pred mechanickým poškodením keramickým obalom. Limitujúcim faktorom technológie je jej nízka účinnosť konverzie energie. Tieto zariadenia si v poslednej dobe prešli zásadným vývojom a je snaha stále posúvať hodnoty účinnosti termoelektrickej premeny za pomoci skúmania nových kombinácií zlúčenín TE materiálov.[1]

Pre vyššie zmienený účel bolo vybrané zariadenie splyňovacieho kotla od firmy Ekoscroll. Bližšie oboznámenie sa s vlastnosťami prototypu kotla od firmy Ekoscroll o výkone 25 kW<sub>th</sub> prebehlo na pôde VUT. Jedná sa o splyňovací kotol na drevné palivo s ručným prikladaním, ktorý by mal spĺňať smernicu ekodesignu 2009/125/ES. Pod oboznámením sa s vlastnosťami kotla, sa myslí overenie výkonnostných parametrov kotla, ako aj meranie emisií kotla. O toto meranie sa opiera zostrojený CFD model, ktorého účelom je poskytnúť bližšie informácie ohľadne teplotného a rýchlostného pola kotla, čo poskytne viacej informácií pri návrhu TEG, ktorý bude integrovaný do kotla za účelom autonomizácie splyňovacieho kotla, bez ohľadu na možnosť pripojenia do elektrickej siete.

CFD (computational fluid dynamics) je simulačná technika používaná na numerickú analýzu a riešenie zložitých problémov s prúdením tekutín a prenosom tepla. CFD zahŕňa použitie počítačových algoritmov a matematických rovníc na modelovanie a simuláciu správania tekutín, keď interagujú s pevnými povrchmi a inými tekutinami.

Práca je rozdelená do piatich častí: 1. Teoretickej, kde sa čitateľ má možnosť oboznámiť s princípmi termoelektrickej premeny, termoelektrickými materiálmi používanými na generáciu elektrickej energie a tiež vo všeobecnosti popisuje funkciu splyňovacích kotlov. V 2. časti práce sa nachádzajú informácie o meraniach, spaľovacích skúškach prevedených na prototyp splyňovacieho kotla od firmy Ekoscroll. 3. časť práce sa zaoberá výpočtami nutnými pre prevedenie a nastavenie okrajových podmienok následných CFD simulácií, ktoré sú bližšie popísané v 4. časti. 5. časť sa venuje výsledkom simulácií. Posledná 6. časť je venovaná prevedeniu zostavy TEG je do splyňovacieho kotla integrovaná.

# 1. Teoretická časť

Teoretická časť je venovaná popisu termoelektrickej premeny, fyzikálnym javom na pozadí termoelektrickej premeny, termoelektrickým materiálom a ich všeobecným vlastnostiam. Ďalej obsahuje rešerš niektorých termoelektrických materiálov používaných v moduloch určených na generovanie elektrickej energie, popisom princípu funkcie splyňovacieho kotla a prehľad prípadových štúdií podobných aplikácií TEG v spaľovacích zariadeniach.

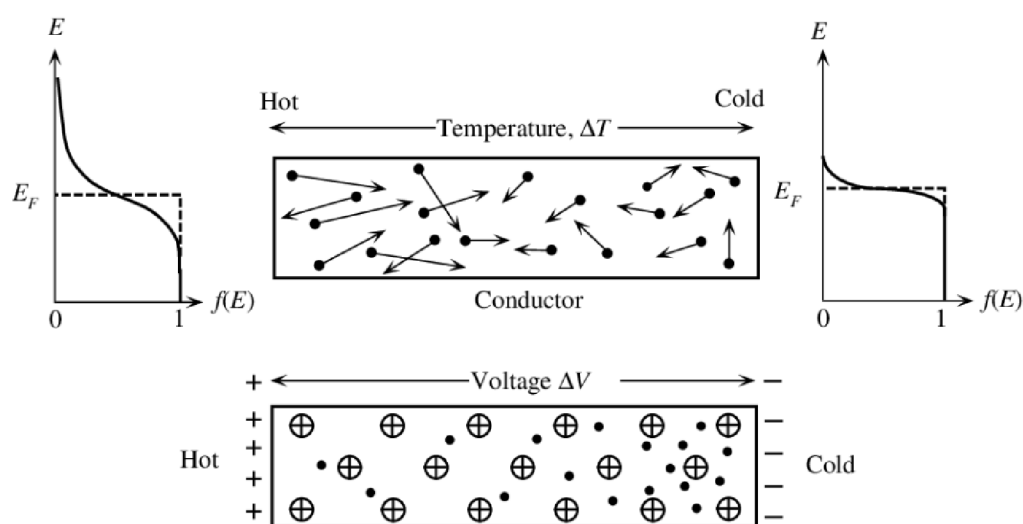
## 1.1 Popis termoelektrickej premeny

Termoelektrická transformácia vychádza zo základných termoelektrických javov. Základným fenoménom pre termoelektrickú transformáciu je Seebeckov jav, ktorý opisuje vznik termoelektrického napätia pri existencii teplotného rozdielu na koncoch vodiča. Jednoduché zariadenie z dvoch rôznych vodičov spojených na koncoch sa nazýva termoelektrický článok. Jeho efektívnosť závisí od charakteristických vlastností materiálov, z ktorých sú vodiče vyrobené, ako aj od teplotného rozdielu medzi teplým a studeným koncom takéhoto článku [2]. Ďalšie javy popisujúce TE premenu sú Peltierov a Thompsnov.

Termoelektrické generátory (TEG) predstavujú často skúmanú technológiu v spojení s využitím prebytočného tepla. Funkcia termoelektrických generátorov spočíva vo fyzikálnom fenoméne známom ako Seebeckov jav. TEG využívajú rozdiel teplôt na priamu transformáciu tepelnej energie na elektrickú energiu. Tento spôsob energie bol identifikovaný už na prelome 19. a 20. storočia, ale až v posledných rokoch získavajú TEG zvýšenú pozornosť s príchodom moderných kompozitných polovodičových materiálov, ktoré zdokonalili termoelektrickú účinnosť, čo je pre úspech technológie TEG kľúčové. [3],[4] Hlavným benefitom TEG je priama premena tepelnej energie na elektrickú formu bez nutnosti ďalšej energeticky náročnej transformácie. Zároveň ich údržba je jednoduchá, pretože neobsahujú žiadne pohyblivé mechanické časti. Ďalšou výhodou je možnosť využitia akéhokoľvek tepelného zdroja produkujúceho dostatočný tepelný tok. Tieto zdroje môžu zahŕňať napríklad ohrievače, horáky, pece alebo prístroje generujúce teplo ako vedľajší produkt. Tepelná energia je dostupná v mnohých situáciách, kde sa tradičné postupy výroby elektrickej energie nedajú uplatniť. TEG sú zároveň mimoriadne odolné, čo ich predurčuje na použitie v náročných prostrediach, ako sú vozidlá, spaľovne a vesmírne sondy. [4],[5]

## 1.1.2 Seebeckov jav

Prvý z termoelektrických javov bol objavený v roku 1821 T. J. Seebeckom. Hovorí, že ak vezmeme vodič, ktorého jeden koniec zahrievame a druhý chladíme, ako je ukázané na Obr. 1, elektróny na teplej strane budú mať väčšiu energiu a tým aj väčšiu rýchlosť. To spôsobí, že dôjde k preusporiadaniu elektrónov, ktoré sa nahromadia pri studenom konci. Kladne nabité ióny zostanú v pôvodnom rozložení. Tento systém dosiahne rovnováhu v momente, keď vzniknuté elektrické pole zabráni ďalšiemu presunu elektrónov. Medzi koncami tohoto vodiča, je možné galvanometrom merať rozdiel potenciálov, alebo voltmetrom napätie. Pretože toto napätie vzniklo rozdielom teplôt, nazýva sa ako termoelektrické napätie. Zmena potenciálu  $\Delta\phi$  na vodiči pri rozdiely teplôt  $\Delta T$  oboch koncov sa nazýva Seebeckov jav. Miera tohto javu, alebo aj zmena napätia  $U$  vzhľadom k rozdielu teplôt  $\Delta T$ , je nazývaná absolútny Seebeckov koeficient  $\alpha$ , ako je vyjadrené pomocou rovnice (1.1).



Obr. 1 Prerozdelenie nosičov náboja v kove pri rozdielnych teplotách koncov[6]

$$\alpha_A = \frac{U}{\Delta T} [V/K] \quad (1.1)$$

Ak by vodič pozostával zo spojenia dvoch rôznych materiálov nehovoríme o absolútnom, ale o relatívnom Seebeckovom koeficiente. Pre relatívny Seebeckov koeficient platí, že sa rovná rozdielu jednotlivých absolútnych koeficientov  $\alpha_A$  a  $\alpha_B$ .

$$\alpha_{AB} = \alpha_A - \alpha_B [V/K] \quad (1.2)$$

Relatívny Seebeckov koeficient je taktiež možné vyjadriť, ako okamžitú zmenu napätia nameranú voltmetrom medzi spojmi z dvoch rôznych materiálov a absolútnej zmeny teploty  $\Delta T$  nachádzajúcej sa medzi spojmi popisovaného obvodu. [5]

$$\alpha_{AB} = \frac{U}{\Delta T} [V/K] \quad (1.3)$$

Seebeckov efekt sa využíva vo všeobecnosti hlavne na meranie teploty, pričom ako snímač sa práve používa spojenie dvoch rôznych kovov, a následne sa meria vzniknuté napätie. Výhodou tejto metódy je veľkosť snímača, práve pretože rozdiel potenciálov nevzniká na spoji vodičov, ale pozdĺž ich dĺžky. Tiež napätie a tým aj prúd v obvode sú veľmi malé, takže nehrozí poškodenie vodičov prílišným preneseným výkonom. Na tomto jave je taktiež postavené získavanie elektrickej energie pomocou termoelektrických modulov, generátorov.

### 1.1.3 Peltierov jav

Druhým termoelektrickým javom je Peltierov jav, ktorý bol objavený približne trinásť rokov po Seebeckovom jave. Tento jav je ťažké pozorovať na kovových vodičoch, pretože je vždy sprevádzaný tvorbou Jouleovho tepla, a tak vysvetlenie princípu fungovania je jednoduchšie pre termoelektrickú dvojicu zloženú z dvoch polovodičov. Tento jav je javom opačným k Seebeckovému javu. Peltierov jav je možné pozorovať ak termoelektrickou dvojicou prechádza elektrický prúd  $I$ . Týmto začne jeden zo spojov generovať tepelný tok  $q$  a druhý spoj zase tepelný tok  $-q$  (začne sa chlaďiť). O tom, ktorý spoj bude chlaďiť a ktorý zahrievať rozhoduje smer prúdu v obvode. Podobne ako pri Seebeckovom jave boli zavedené relatívne a absolútne koeficienty. Pre relatívny peltierov koeficient platí [7] (1.4).

$$\pi_{AB} = \frac{Q}{I} [V] \quad (1.4)$$

Vzťah medzi relatívnym a absolútnym peltierovým koeficientom pre termoelektrickú dvojicu je popísaný pomocou rovnice (1.5).

$$\pi_{AB} = \pi_A - \pi_B [V] \quad (1.5)$$

### 1.1.4 Thompsnov jav

Posledný z termoelektrických javov sa vzťahuje k jednému homogénemu vodiču, ktorým prechádza elektrický prúd. Pozdĺž tohoto vodiča bude vznikať teplotný rozdiel  $\Delta T$  zapríčinený vznikajúcim teplom  $Q$  popísaný nasledovne [7]

$$Q = \beta I \Delta T [W] \quad (1.6)$$

$\beta$  - thompsonov koeficient [V/K]

$\Delta T$  - teplotná diferenciacia [K]

$Q$  - vzniknuté teplo [W]

$I$  - elektrický prúd prechádzajúci vodičom [A]

## 1.2 Termoelektrické materiály a ich vlastnosti

Princíp priamej výroby elektrickej energie z tepelnej energie je známi od 19. storočia. TE Materiály tej doby neboli pre praktické využitie dostačujúce. Rozšírenie technológie TEG nastalo v druhej polovici 20. storočia vďaka rozvoju v oblasti polovodičových materiálov. Termoelektrické javy možno pozorovať u rady materiálov. Ich efektivita sa však bude značne líšiť. Účinnosť TE premeny závisí na materiálových vlastnostiach a teplote, pri ktorej prebieha. Preto boli zavedené koeficienty  $Z$  a  $ZT$ , kde sú zhrnuté podstatné materiálové charakteristiky pre TE premenu.

### 1.2.1 Koeficienty termoelektrickej účinnosti Z a ZT

Ako bolo už povedané, možnosť sledovať priamu premenu tepelnej energie na elektrickú je u mnohých materiálov a však len malé percento z nich je komerčne využívaných pre termoelektrické účely. Je to spôsobené malou účinnosťou termoelektrickej premeny ako takej, ktorá sa aj v dnešnej dobe pohybuje v rozmedzí jednotiek percent. Schopnosť jednotlivých materiálov priamo premieňať tepelnú energiu na elektrickú udáva koeficient Z, ktorý je popísaný v nasledujúcej rovnici (1.7).[7]

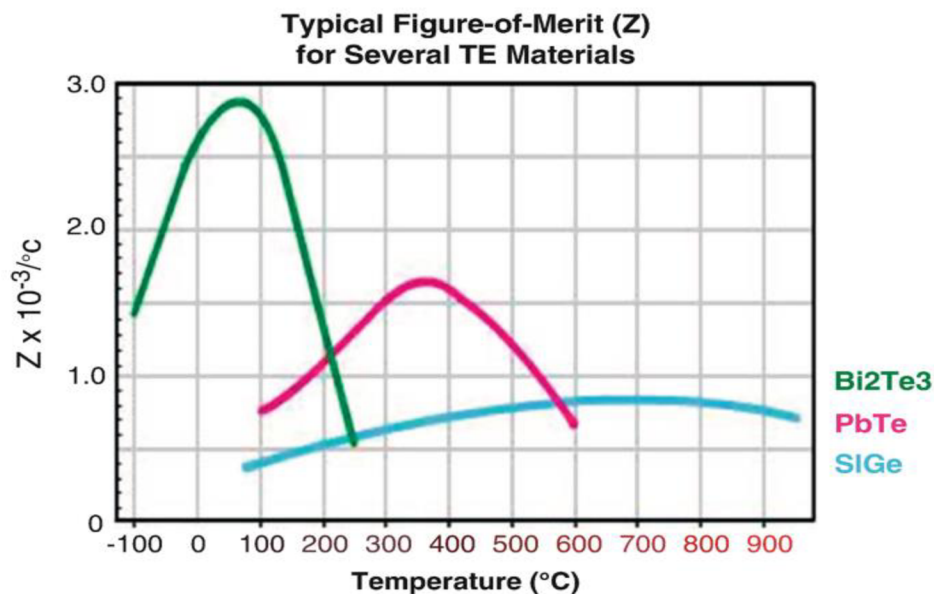
$$Z = \frac{\sigma \cdot \alpha^2}{\lambda} [K^{-1}] \quad (1.7)$$

$\sigma$  - elektrická vodivosť [ $S \cdot m^{-1}$ ]

$\lambda$  - tepelná vodivosť [ $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ]

$\alpha$  - seebeckov koeficient [ $V \cdot K^{-1}$ ]

Veľkosť koeficientu Z nie je závislá na teplote T, pri ktorej TE premena prebieha. Nezohľadňuje teda schopnosť materiálov efektívne pracovať len v určitom rozsahu teplôt. Pri prekročení predpísaných teplôt použitý TE materiál stráca na účinnosti a pri výraznom prekročení môže dôjsť k nevratnému poškodeniu TEG modulu, táto skutočnosť je ukázaná na Obr 2.



Obr. 2 Porovnanie koeficientov Z vybraných materiálov [8]

Na obrázku je znázornený príklad materiálov (Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>, PbTe, SiGe) ich koeficienty Z sú vykreslené v závislosti na teplote. Ako je vidieť materiály založené na báze Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> a PbTe vykazujú relatívne vysoký koeficient Z, ale pri istej teplote dochádza k poklesu ich účinnosti. Naopak materiály na báze SiGe vykazujú relatívne podobné hodnoty koeficientu Z na celom sledovanom rozsahu teplôt.

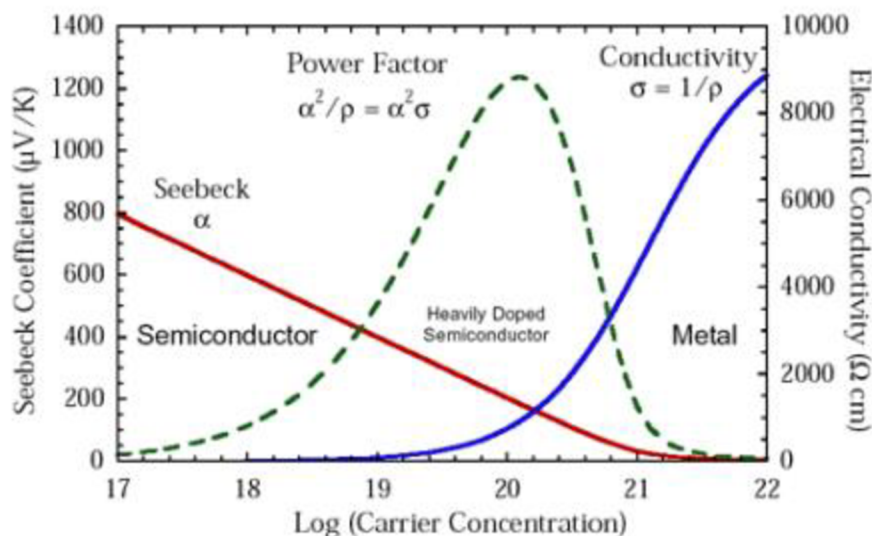
Aby sa pri porovnávaní materiálov za pomoci bezrozmerného kritéria odrazila aj teplota, pri ktorej je materiál schopný ešte pracovať, bol zavedený koeficient  $ZT$ , ktorý porovnávacie pole zjednocuje. Teda vo svete TE materiálov je zaužívaným kritériom pri porovnávaní TE materiálov. Koeficient  $ZT$  je popísaný nasledujúcou rovnicou (1.8).

$$ZT = Z \cdot T_s [-] \quad (1.8)$$

Kde  $T_s$  je stredná teplota medzi studeným koncom o teplote  $T_C$  a teplým koncom o teplote  $T_H$ , je daná aritmetickým súčtom teplôt studeného a teplého konca termoelektrického modulu.

$$T_s = \frac{T_H + T_C}{2} [K] \quad (1.9)$$

Z vyššie uvedených rovníc je možnosť odvodiť si ideálny materiál pre termoelektrickú premenu. Ideálny TE materiál by mal disponovať, čo najvyššou elektrickou vodivosťou  $\sigma$ , čo najväčším Seebeckovým koeficientom  $\alpha$ , čo najmenšou tepelnou vodivosťou  $\lambda$ . Takémuto profilu materiálových vlastností odpovedá práve skupina materiálov polovodičov. Ich veľkou výhodou je schopnosť znižovať pomer tepelnej vodivosti ku elektrickej, vďaka čomu dochádza k nárastu účinnosti TE premeny. Tohoto je dosahované pomocou legovania vhodných prímiesí, dotovania. Skutočnosť prečo sa ako termoelektrické materiály používajú silno dotované polovodiče je ukázaná na nasledujúcom obrázku Obr.3. Obrázok ukazuje závislosti materiálových vlastností, z ktorých vychádza koeficient  $Z$  a teda aj koeficient  $ZT$  v závislosti na koncentrácii nosičov náboja v danej skupine materiálov (vodič, silno dotovaný polovodič a polovodič). Silno dotované polovodiče disponujú dobrou elektrickou vodivosťou a vysokými hodnotami seebeckovho koeficientu, preto sú najčastejšie používanou skupinou materialov pre účeli TE premeny.



Obr. 3 Porovnanie termoelektrických vlastností vo vzťahu ku koncentrácii nosičov [9]

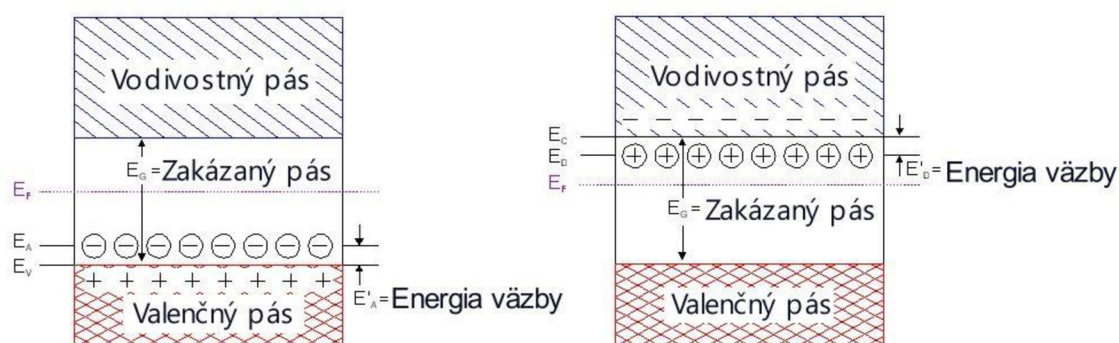
## 1.2.2 Polovodiče ako termoelektrický materiál

Termoelektrické moduly využívajú polovodiče ako významný materiál. Vlastnostiam polovodičov vzhľadom na TE premenu je venovaná podkapitola 1.2.2. Polovodiče možno definovať ako látky, ktoré umožňujú vedenie elektrického prúdu pomocou elektrónov alebo dier, čo sa označuje ako elektrónová bipolárna vodivosť. Ich elektrická vodivosť  $\sigma$  je teplotne závislá (s rastúcou teplotou stúpa elektrická vodivosť polovodiča) a môže byť ovplyvnená aj inými fyzikálnymi javmi, ako je napríklad osvetlenie, elektrické alebo magnetické pole, rádioaktívne žiarenie, alebo prídavok malého množstva danej prísady do čistej látky polovodiča, čo sa nazýva dotovanie. Polovodiče sa delia na vlastné a nevlastné, pričom vlastná vodivosť (intrinzická) sa nachádza u všetkých polovodičov, zatiaľ čo nevlastná vodivosť (extrinzická, dotovaná) existuje iba u polovodičov s prísadou iného atómu. Tieto polovodiče sa ďalej delia na polovodiče typu P a typu N. [10] Na popis elektrickej vodivosti materiálov sa využívajú pásové diagramy povolených energií elektrónov, ktoré sa niekedy nazývajú aj pásové teorie, alebo pásové modely zobrazené na Obr.4. Tieto modely sa skladajú zo štyroch pásiem: vnútorného, valenčného, vodivostného a zakázaného.

Vnútorné pásy – elektróny v tomto pásme sú pevne viazané na atómové jadrá a neprispievajú k vedeniu elektrického náboja.

Valenčný pás – obsahuje hladiny elektrónov, ktoré vytvárajú chemické väzby s inými atómami. Vodivostný pás – označuje sa aj ako najväčší povolený energetický pás a obsahuje elektróny uvoľnené z chemických väzieb, pohybujúce sa v medzi atómovom priestore a zabezpečujúce tak elektrickú vodivosť. Sú najvýznamnejšie pre schopnosť vedenia elektrického náboja.

Zakázané pásy – oddeľujú pásy povolených energií, teda vodivostný a valenčný pás.



Obr. 4 pásové diagramy polovodičov typu P a N (sprava do ľava) [10]

Obr. 4 ukazuje energetické pásové diagramy polovodičov typu N a P. Pásové usporiadanie polovodičov sa takmer nelíši od diagramu izolantov, rozdiel spočíva iba v šírke zakázaného pásu, resp. veľkosti  $E_G$  (izolanty ho majú hrubší). Zakázaný pás oddeľuje valenčný pás od vodivostného. Pri teplote bližšie sa absolútnej nule je vodivostný pás polovodiča prázdny, takže nemá žiadne voľné elektróny na vedenie elektrického náboja. Je teda izolantom. Naopak s rastúcou teplotou môžu niektoré elektróny získať dostatočnú energiu na prechod do vodivostného pásma a zúčastniť sa vedenia elektrického prúdu. [10]

Polovodič typu N vzniká nahradením atómu v kryštálovej mriežke štvorvalentného prvku, prvkom päťvalentným. V tomto prípade sa štyri elektróny z valenčného pásma podieľajú na tvorbe chemických väzieb so susednými atómami, piaty z nich je viazaný veľmi slabou energiou. Tento elektrón sa po poskytnutí energie väčšej ako jeho aktivačná energia ( $E_A$ ) môže uvoľniť a stať sa nosičom elektrického náboja. Aktivačná energia niektorých polovodičov sa pohybuje okolo 0,05 eV, takže už pri izbovej teplote sa elektróny podieľajú na vedení



elektrického prúdu [11]. Polovodiče typu N, ktorých vodivosť ovplyvňuje prísada päťvalentného prvku (donora), sa nazývajú polovodiče s elektrónovou vodivosťou. Podobne ako u polovodičov typu N, aj u polovodičov typu P sa pridávaním trojvalentných prvkov tvorí diera, ktorá sa môže pohybovať v kryštálovej mriežke a umožniť tak vedenie prúdu, pretože nesie kladný elektrický náboj. Polovodiče, kde je koncentrácia dier väčšia ako koncentrácia elektrónov, sa nazývajú polovodiče typu P. [12]. Väčšinou TE materiály sú zo skupiny polovodičov. Polovodičové materiály používané v termoelektrických dvojiciach, moduloch disponujú vysokými seebeckovými koeficientami viac ako  $100 \text{ mVK}^{-1}$  [13]. V dnešnej dobe sa pri snahe vylepšiť účinnosť termoelektrickej premeny uplatňujú z materiálového hľadiska dva prístupy.

1. Maximalizovanie Seebeckovho koeficientu a elektrickej vodivosti materiálu takzvaného power factoru (zvyšovanie elektrickej vodivosti a seebeckovho koeficientu)
2. Minimalizovanie tepelnej vodivosti

Tieto parametre sú určené detailmi elektrónovej štruktúry a rozptylom nosičov náboja (elektrónov alebo dier), a preto nie sú nezávisle kontrolovateľné. Maximalizovanie power factoru zahŕňa objavovanie nových tried materiálov a optimalizáciu už používaných, za pomoci očkovania a skúmania nanoštruktúri materiálov, čo súvisí aj z ich tepelnou vodivosťou. [12]

### 1.2.3 Prehľad termoelektrických materiálov

Štúdia od autorov Wei, J., Yang, L., Ma, Z., et al. z roku 2023 [14] rozdeľuje termoelektrické materiály do troch skupín podľa ich operačných teplôt. Pre každú z týchto troch skupín je vybraná kombinácia prvkov a jej variácie, ktoré sú v danom teplotnom rozsahu najviac uplatňované v termoelektrických aplikáciách.

#### Nízkotepelný rozsah (do 450 K)

Tento rozsah je dominovaný materiálmi na báze bizmutu (Bi) v kombinácií s telúrom (Te) alebo antimónom (Sb). Tieto materiály sa predovšetkým používajú v termoelektrických moduloch pre chladenie. Ich koeficienty ZT sa pohybujú od 0,8 až 2,5. [14] Termoelektrické materiály o zložení spomínaných prvkov sú veľmi rozšírené, asi 70 % dostupných TE modulov na trhu používa bizmut a telúr ako funkčné materiály [15].

$\text{Bi}_2\text{Te}_3$  – Tento materiál je najviac používaný v komerčných termoelektrických moduloch. Je určený pre nízkotepelné aplikácie do 500 K v niektorých prípadoch vyššie. Má dobrú elektrickú vodivosť, Seebeckov koeficient a nízku tepelnú vodivosť. Avšak, keďže Bizmut a Telúr sú ľahko oxidovateľné a sublimujúce, tieto materiály nemôžu byť použité pre aplikácie pri vysokých teplotách na vzduchu [16].  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  môže byť dotovaný ako polovodič typu P aj N. Existuje mnoho rôznych variantov použitých štruktúr a ďalších prímiesí. Plazmou sintrovaný a z taveniny zvlákňovaný P-typ dosahuje  $ZT=1,5$  pri 390 K. [17]

### **Stredný teplotný rozsah (450–850 K)**

V strednom teplotnom rozsahu sa používajú hlavne zliatiny na báze telúru (Te) a olova (Pb). Ale najvyšších koeficientov ZT dosahujú zliatiny na báze cínu (Sn) a selénu (Se), tu sa hodnoty ZT pohybujú v rozmedzí 0,5 až 4 [14]. Takéto materiály sa používajú v termálnych senzoch.

PbTe – Tieto materiály sa vyznačujú nízkou tepelnou vodivosťou a vysokým Seebeckovým koeficientom už pri izbovej teplote. Ideálny rozsah prevádzkových teplôt pre PbTe je približne od 400 do 950 K. Podobne ako Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>, môže byť PbTe vytvorený ako N aj P polovodič prostredníctvom rôznych dotovaní. Nedotovaný PbTe dosahuje ZT=0,71 pri 973 K, plazmou sintrovaný PbTe dosahuje ZT=1,8 pri 900 K a dotovaný PbTe s (2 %) Tl dosahuje ZT=1,48 pri 740 K. [18] PbTe je dobrým termoelektrickým materiálom pre aplikácie vyžadujúce stredné teploty až do 900 K. PbTe má vysokú teplotu tavenia 1190 K a dobrú chemickú stabilitu.[19]

PbSe a Bi<sub>2</sub>S<sub>3</sub> – Tieto materiály vznikli ako výsledok snahy nahradiť Te v PbTe a Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>, čo vedie k výraznému zníženiu ceny. Pri dotovanom PbSe sa dosiahlo ZT=1,2 pri 800 K. Ďalšie možné zvýšenie ZT sa očakáva použitím plazmového sintrovania a ďalších metód používaných pri PbTe. [20]

### **Výsokoteplotný rozsah (do 1300 K)**

V tejto skupine sa nachádzajú zlúčeniny kremíku (Si) a germánia (Ge), medi (Cu) a selén (Se) a tiež takzvané polo heuslerovské zliatiny, sú to feromagnetické zliatiny na báze Al, Si, Ga, Ge, ktoré sú používané hlavne na generovanie elektrickej energie za vysokých teplôt. [14]

SiGe – Zliatiny SiGe majú dobré mechanické vlastnosti. Vďaka vysokému bodu tavenia (1200 K) sú vhodné pre použitie v aplikáciách s vysokou teplotou. Pri izbovej teplote majú vysokú tepelnú vodivosť. Pri vyšších teplotách rastúci Seebeckov koeficient a relatívne dobrá elektrická vodivosť spôsobia, že výsledný koeficient ZT je pri 1100 K 0,94. Preto je snaha znížiť tepelnú vodivosť napríklad nanoštruktúrovaním, čo sa podarilo z 4,2 W/mK na 2,5 W·m<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup> a zvýšiť ZT na 1,3 pri teplote 1100 K. [21]

Polo Heuslerove zliatiny – Polo Heuslerove zliatiny získali veľkú pozornosť vďaka svojim atraktívnym elektrickým transportným vlastnostiam, relatívne vysokým Seebeckovým koeficientom a bohatej kombinácii prvkov [22]. Okrem toho sa môžu pochváliť robustnou mechanickou pevnosťou, dobrou tepelnou stabilitou pri vysokých teplotách a rôznymi fyzikálnymi vlastnosťami [23] tzv. HH zliatiny majú rovnakú kryštálovú mriežku ako MgAgAs. Často obsahujú Ni a Sn. Sú vhodné pre použitie pri vysokých teplotách, pretože sú stabilné až do teplôt okolo 1300 K. Majú vysoký Seebeckov koeficient a elektrickú vodivosť, avšak nevýhodou je vysoká tepelná vodivosť. Preto sa usiluje o narušenie kryštalickej mriežky s cieľom znížiť tepelnú vodivosť. [24]

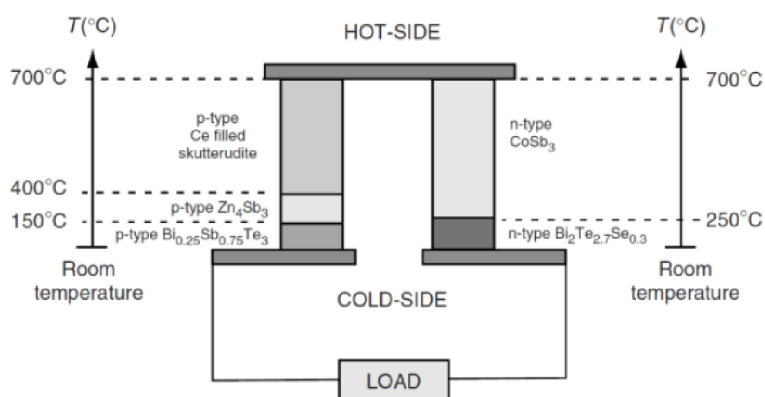
Zhrnutie zástupcov opisovaných skupín TE materiálov je v tabuľke Tab.1.

Tab.1 Zhrnutie vlastnosti TE materiálov

Zdroj	Materiál	T	ZT	$\sigma$	$\lambda$	$\alpha$	Typ	Rozsah teplôt
	Jednotka	[K]	[-]	[ $10^3$ S/cm]	[W/mK]	[ $\mu$ V/K]	[-]	[K]
[25]	$\text{Bi}_2\text{Te}_3$	448	1,01	0,78	0,79	151	N, P	200-500
[26]	$\text{Bi}_2\text{Te}_3$ -nanoštrukturovaný	340	1,09	1,88	0,84	120	N, P	200-500
[27]	PbTe	740	1,48	0,35	1,3	265	N, P	400-950
[28]	PbSe	800	1,2	0,43	1,16	190	P	650-900
[21]	SiGe	1100	0,94	0,42	4,12	230	N, P	900-1300
[22]	$\text{Hf}_{0,3}\text{Zr}_{0,7}\text{CoSn}_{0,3}\text{Sb}_{0,7}$	1100	1,5	0,66	2,96	326	N, P	900-1300

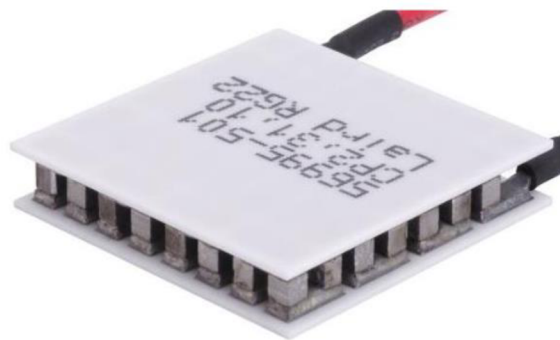
### 1.3 Termoelektrické generátory

Základným konštrukčným prvkom termoelektrických modulov sú termoelektrické dvojice. Materiál dvojíc je volený s ohľadom na predpokladané pracovné podmienky TEM (Termoelektrických modulov). Pre dosiahnutie optimálnych parametrov je možné vyrobiť stĺpik z viacerých materiálov, tak aby v každej jeho časti boli dosahované maximálne výkonové parametre. Toto riešenie je možné vidieť na Obr.5.



Obr. 5 Termoelektrická dvojica zostavená z viacerých materiálov [7]

Polovodičové stĺpiky sú spojené vodivými páskami. Takto je spojených mnoho dvojíc do sériového zapojenia. Najčastejšie sú tieto dvojice usporiadané do obdĺžnikového, alebo štvorcového tvaru. Pre dodanie mechanickej pevnosti je značná časť zariadenia konštruovaná, ako sendvičová konštrukcia, kedy sú polovodičové stĺpiky s vodivými plieškami vložené medzi keramické dosky vid' Obr. 6.



Obr. 6 Příklad TE modulu určeného pro generování el. energie [29]

Pretože tieto dosky znižujú tepelnú vodivosť zostavy je vhodné, aby bola ich tepelná vodivosť čo najvyššia. Často používaným materiálom je  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Sendvičová konštrukcia nie je pravidlom. Tieto moduly musia byť umiestňované na nevodivý povrch, alebo musí byť vložená nevodivá fólia medzi ohrievač a modul. Ďalšou častou úpravou modulov je uzavretie priestoru medzi stĺpkami pružným izolačným materiálom. Toto riešenie zabraňuje problémom v dôsledku nepriaznivých vplyvov okolitého prostredia, napríklad je schopné zabrániť kondenzácii pár na stĺpcoch. Nevýhodou je zníženie tepelnej vodivosti. Toto riešenie teda nie je príliš používané pri vysokoteplotných TEM. Za účelom zníženia prechodového odporu môžu byť kontaktné plochy opatrené grafitovou a teplovodnou pastou alebo fóliou rovnakého typu.[30]

## 1.4 Prehľad prípadových štúdií termoelektrických modulov v spaľovacích aplikáciách

V predchádzajúcej podkapitole 1.2.3 sa venovala jednotlivým používaným termoelektrickým materiálom. Termoelektrické generátory sa skladajú vždy s kombinácie materiálov typu P a typu N. Tieto materiáli spolu tvoria termoelektrické dvojice, ktoré sú zapojené do série pomocou pájania a obalené väčšinou ochranným keramickým obalom. A teda výsledná termoelektrická účinnosť, ako aj tepelný rozsah v ktorom bude TEG použitý je kumuláciou viacerých premenných. Pre bližšie preskúmanie týchto premenných bol zhotovený prehľad prípadových štúdií TEG v spaľovacích zariadeniach podobnému tomu v tejto práci.

### 1.4.1 Biomasový peletový kotol

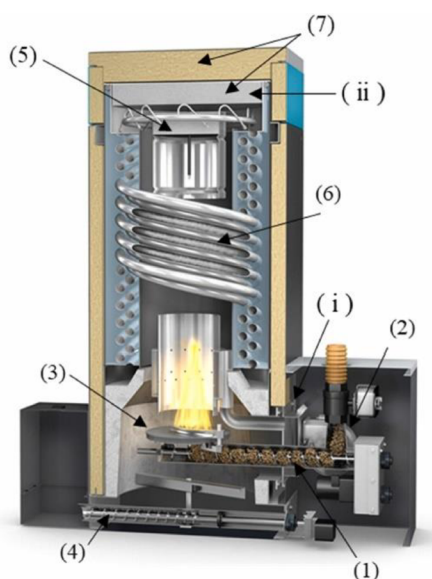
Prvá prípadová štúdia sa zaoberala integráciou TEG v peletovom kotly na biomasu o výkone  $25 \text{ kW}_{\text{th}}$ . Celkovo bolo integrovaných 6 modulov produkujúcich  $60 \text{ W}$  elektrickej energie. Použité moduly boli 3 typu TEG1-PB-12611-6.0 (TEG 1-3) a 3 typu TEG1-24111-6.0 (TEG 4-6) od výrobcu TECTEG MFR. Išlo o hybridné moduly na báze  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  a  $\text{PbTe}$  [29] v rozmeroch  $56 \times 56 \text{ mm}$ . Ich hlavné charakteristiky sú zhrnuté v tabuľkách Tab.2, Tab.3, Schéma kotla v ktorom boli TEG integrované sa nachádza na Obr.7. [31]

Tab.2 Parametre TEG1-24111-6.0 [29]

Parameter	Označenie	Jednotka	Hodnota
Teplota na teplej strane	$T_h$	$^{\circ}\text{C}$	300
Teplota na studenej strane	$T_c$	$^{\circ}\text{C}$	30
Napätie v otvorenom obvode	U	V	17,7
Odpor zhodnej záťaži	R	$\Omega$	4,4
El. prúd pri zhodnej záťaži	I	A	2
Elektrický výkon modulu	P	W	17,6
Teplený tok cez modul	Q	$W_{th}$	301

Tab.3 Parametre TEG1-12611-6.0 [29]

Parameter	Označenie	Jednotka	Hodnota
Teplota na teplej strane	$T_h$	$^{\circ}\text{C}$	300
Teplota na studenej strane	$T_c$	$^{\circ}\text{C}$	30
Napätie v otvorenom obvode	U	V	8,4
Odpor zhodnej záťaži	R	$\Omega$	1,2
El. prúd pri zhodnej záťaži	I	A	3,1
Elektrický výkon modulu	P	W	14,6
Teplený tok cez modul	Q	$W_{th}$	365

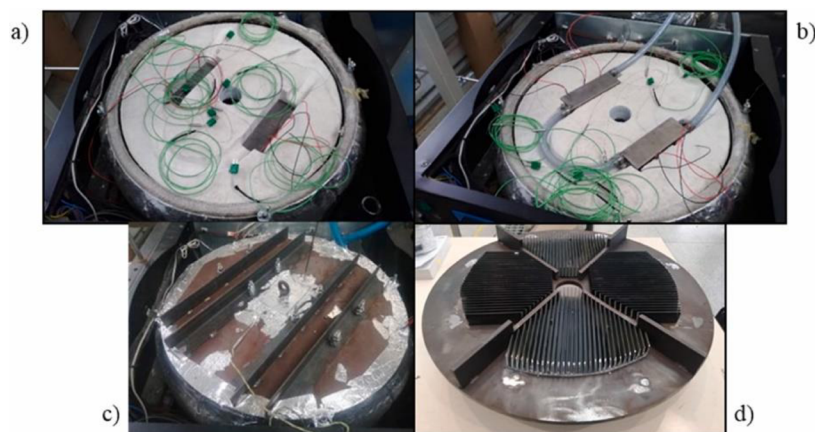


Obr. 7 prierez kotlom od výrobcu BioCurve kde boli moduly integrované [31]

1. slimákový dopravník paliva; 2. prístup vzduchu, ventilátor; 3. spaľovacia doska; 4. šnekový dopravník pre popol; 5. Odráž plameňa; 6. špirálovité potrubie; 7. Horný kryt, II miesto integrácie prototypu TEG.

Celkový výkon TEG modulov dosahoval priemernej hodnoty za ustálenej funkcie kotla 56,91 W, ak ako chladiace médium bola použitá kotlová voda a 68.10 W, ak boli chladené vodou z kohútiku. Aj napriek papierovo vyššiemu výkonu typu TEG1-24111-6.0 dosahovali moduly typu TEG1-PB-12611-6.0 vyšších výkonov, čo ako autor uvádza bolo spôsobené asymetriou kotla. Ani jeden z použitých modulov nedosahoval hodnoty stanovené výrobcom, čo bolo

spôsobené nemožnosťou nastaviť podmienky špecifikované vo vyššie uvedených tabuľkách Tab.2,3. Jednalo sa hlavne o teplotu na teplom konci TEG. To to sa nepodarilo vyriešiť ani po doplnení aparatury o rebrovaný výmenník tepla na strane spalín. Finálna aparatura bola schopná zaistiť teplotu o čosi nižšiu ako 300 °C na teplom konci TEG Obr.8. Štúdia sa ďalej zaoberá tvorbou popola pri použití dvoch rôznych biopalív a skúma dopad usadzovania popola na výkon a funkčnosť zostavy TEG.[31]



Obr. 8 Montáž a modifikácie zostavy TEG do vrchného krytu kotla [31]

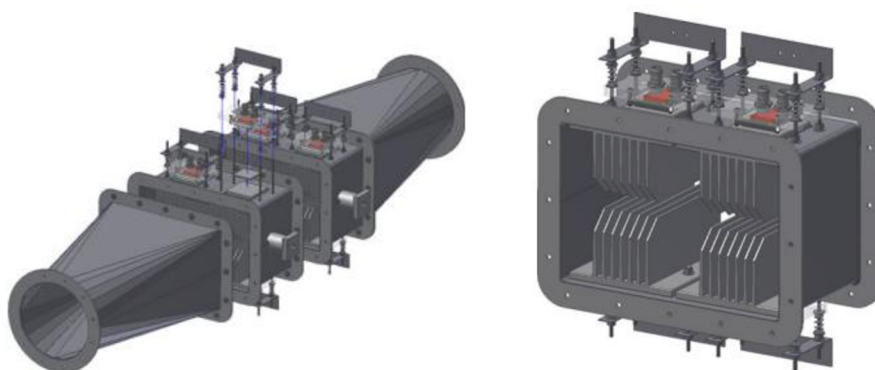
#### 1.4.2 Automatický kotol na biomasu Verner A251.1

Autori štúdie testovali integrovaný TEG v prostredí automatického kotla na biomasu Verner A251.1 o nominálnom výkone 25 kW<sub>th</sub>. Kotol má schopnosť spaľovať rôzne druhy biomasy ako napr. drevené pelety, drevnú štiepku, poľnohospodársky odpad. Pri testoch ako palivo boli použité drevené pelety, aby sa vyhlo poškodeniu koróziou hliníkových rebier na generátore. Termoelektrické moduly použité v generátore sú na báze Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>. Jedná sa o priemyselne dostupné modely pozostávajúce zo 127 termoelektrických dvojíc. Parametre modulu sú zaznamenané v ďalšej tabuľke Tab. 4. [32]

Tab.4 Charakteristiky použitého modulu TEG-127-230-32e [32]

Parameter	Označenie	Jednotka	Hodnota
Operačná teplota	T	°C	230
Teplota na teplej strane	Th	°C	220
Teplota na studenej strane	Tc	°C	20
Seebeckov koeficient	$\alpha$	V/K	0,052
Vnútroň odpor modulu	$r_{in}$	$\Omega$	1,54
Elektrický výkon modulu	P	W	9,6
Účinnosť modulu	$\eta$	%	5,08

Generátor pozostával zo štyroch takýchto modulov zapojených do série. Na stranu spalín boli pripevnené rebrované hliníkové výmenníky tepla. Z vonkajšej strany kotla zostava bola chladená blokmi vodného chladenia. Zostava generátora bola zostrojená tak, aby mohla byť pripojená k existujúcemu zariadeniu. Jej úlohou je využívať zvyškové teplo kotla vo forme odchádzajúcich spalín s ohľadom na teplotu kondenzácie spalín. Zostava generátora je zobrazená na Obr.9.



Obr. 9 Prototyp TEG generátora na ľavo v spalinovom potrubí, na pravo segment TEG [32]

Testy v štúdií okrem termoelektrických veličín sledujú aj dopad inštalácie TEG na emisie kotla a tlakovú stratu pred komínom a celkovú účinnosť kotla. Testy ukázali, že TEG bol schopný produkovať výkon 8,5 W pri 142 °C na teplej strane a teplote 27 °C na studenej strane. Teplota spalín bola takmer o 40 °C nižšia na výstupe z generátora, ako bola na výstupe spalín z kotla. Analýza spalín odhalila, že boli minimalizované tepelné straty kotla a integrácia generátora zdvihla celkovú účinnosť kotla z pôvodných 75,12 % na 78,74 %. Ťah komína ostal konštantný aj po integrácii TEG.

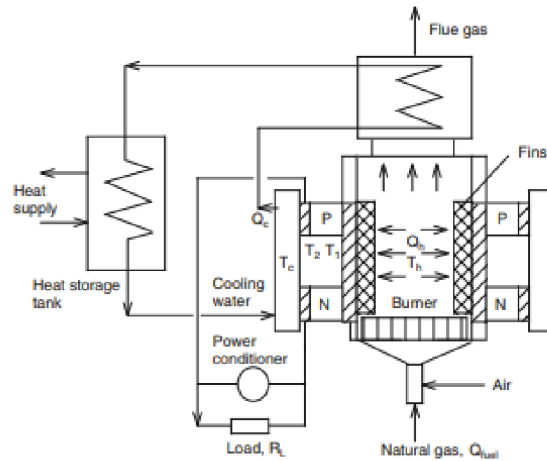
### 1.4.3 Kotel na zemný plyn

Štúdia je prevádzaná na komerčne dostupnom plynovom kotly určenom pre vykurovanie domácnosti. Kotel disponoval výkonom 32 kW. Aparatúra TEG mala zabezpečiť pokrytie elektrického výdaju kotla. Elektrická spotreba kotla sa skladala hlavne z čerpadla a ventilátora na odťah spalín von z kotla, čo dokopy predstavovalo 155 W elektrickej energie. Na tento účel boli použité termoelektrické moduly od Hi-Z o rozmeroch 75 mm x 75 mm x 5 mm. Jedná sa o 71 polovodičových dvojíc na báze  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ , spojených do série za pomoci metalurgickej metódy lisovania za tepla, čo je vysokotlakový proces práškovej metalurgie. Takýto modul by mal byť schopný operovať za teploty 250 °C a vydržať krátkodobé prekročenie teploty 400°C bez tepelného poškodenia modulu. Pri podmienkach stanovených výrobcom by modul mal generovať výkon 20 W [33]. Špecifikácia ku modulu od Hi-Z sa nachádza v Tab.5.

Tab.5 Parametre Hi-Z  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ , o rozmeroch 75 mm x 75 mm x 5 mm [34]

Parameter	Označenie	Jednotka	Hodnota
Teplota na teplej strane	$T_h$	°C	259
Teplota na studenej strane	$T_c$	°C	45
Napätie v otvorenom obvode	U	V	9,3
Odpor zhodnej záťaži	R	$\Omega$	2,2
El. prúd pri zhodnej záťaži	I	A	4,1
Elektrický výkon modulu	P	W	20,1

Celá aparátúra TEG sa skladala z ôsmich spomínaných modulov elektricky zapojených do série. Na studenej strane bolo zaobstarané chladenie vodou, teplota vody bola udržiavaná pod 45 °C. Na teplú stranu TEG bola prirobená hliníková doska z rebrami vytrčajúcimi do vnútra spaľovacej komory kotla. Schéma zostavy kotla a TEG je znázornená na nasledujúcom obrázku. Obr.10.



Obr. 10 Schéma zostavy kotla a integrovaného TEG [33]

Samotná zostava TEG pred inštaláciou je vyobrazená na Obr.11, zložená z ôsmich TE modulov od firmy Hi-Z. Celkový rozmer prototypu bol 340 mm x 290 mm x 110 mm.



Obr. 11 Prototyp TEG [33]

Po nainštalovaní aparátúry TEG prebehol test za nominálneho výkonu kotla 32 kW. Meracia aparátúra zostavená na vyhodnocovanie sa skladala z termoelektrických čidiel na meranie teploty, prietokomeru a analyzátora napätia a prúdu pre overenie elektrického výkonu TEG. Tento test ukázal že pri teplote 259 °C na teplej strane modulu TEG produkoval 161 W elektrickej energie, čo prevýšilo výdaj el. energie kotla ako takého, čo kladne prispelo ku celkovej účinnosti kotla.



## 1.5 Popis funkcie splyňovacieho kotla

Splyňovanie je termochemická premena resp. konverzia tuhých palív na uhlíkatom základe. Splyňovanie prebieha v uzatvorenom priestore kotla za obmedzeného prístupu vzduchu v teplotnom rozsahu 700 až 1200 °C. Produktom splyňovania je výhrevný energetický plyn, ktorý sa dá ďalej spracovať. Tento plyn obsahuje výhrevné zložky ako: CH<sub>4</sub>, CO, H<sub>2</sub>, tie sú sprevádzané zložkami obsiahnutými vo vzduchu (N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, Ar), ako aj CO<sub>2</sub>, ktoré vzniklo pri splyňovaní paliva, avšak nie je reaktívnou zložkou. [35] Splyňovací kotol je zariadenie, ktoré sa zakladá na spomínanom mechanizme splyňovania. Takéto kotle majú vysokú účinnosť a teda aj šetrnosť k životnému prostrediu. Splyňovacie kotle sú vyrobené špecificky pre palivo, ktoré používajú. Môže to byť napr. drevo alebo uhlie, vo výnimočných prípadoch sú splyňovacie kotle konštruované aj na viacej druhov paliva. Proces splyňovania sa skladá zo štyroch základných pochodov:

- Sušenie
- Pyrolýza
- Redukcia
- Horenie

Prvé tri procesy sú endotermické, teda si vyžadujú dodanie energie vo forme tepla, či už sa jedná o autonómne splyňovanie (teplo sa dostane do procesu čiastočným spálením paliva), alebo alotermné splyňovanie (teplo je do procesu privádzané z vonkajšieho zdroja). Posledný proces je exotermický, kde dochádza k rade oxidácií, uvoľneniu tepla z plynu. Konkrétny prípad splyňovacieho kotla Ekoscroll bude predmetom nasledujúcich podkapitol 1.5, 1.6.

## 2. Splyňovací kotol Ekoscroll

Model splyňovacieho kotla je prototypom spoločnosti Ekoscroll o nominálnom výkone 25 kW<sub>th</sub>, zobrazený na Obr.10. Jedná sa o splyňovací kotol na kusové drevo s autotermným splynovaním určených na výhrev domácnosti a bytových priestorov. Pre jednoduchosť sa dá povedať, že tento splyňovací kotol pracuje na dve fázy. Prvá fáza zahŕňa prehorievanie paliva za prívodu primárneho vzduchu, zabezpečeného konštrukčným prvkom (bypassovej klapky). Fáza prehorievania je pozorovateľná pri nabíhaní kotla, kde sú dvierka kotla otvorené, kotol je naložený do 60 % hmotnostného obmedzenia zásobníku, ventilátor je vypnutý a je otvorená bypassová klapka pre zabezpečenie dostatočného ťahu kotla. V tejto fáze sa kotol rozbieha, pričom sa znižuje vlhkosť paliva a narastá teplota v zásobníku.

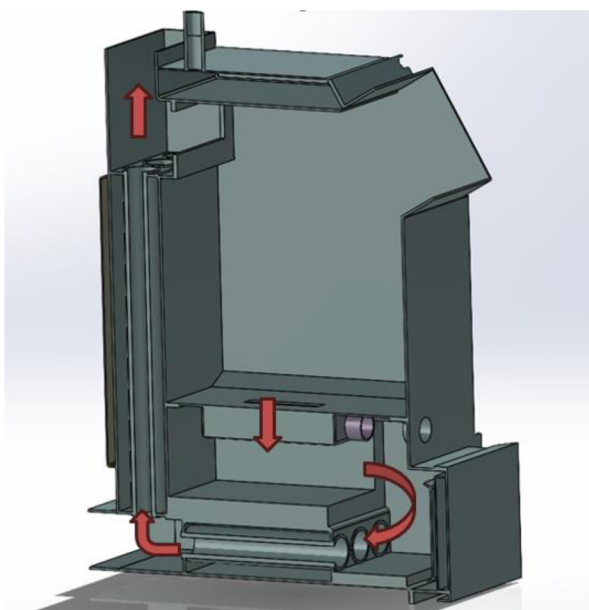
Druhá fáza nastáva po doložení kotla na medzi hmotnostného objemu zásobníka zatvorením dvierok a bypassovej klapky, čím sa primárny vzduch v zásobníku obmedzí na minimum. Potom je uvedený do chodu ventilátor, ktorý ma za úlohu dodávať vzniknutým plynom dostatočný objem kyslíku pre ich oxidáciu. V tejto fáze sa uvoľňuje značné množstvo tepla, ktoré je následne predávané do vody za pomoci stien kotla. Vzniknuté teplo vzťahnuté na jednotku hmotnosti pôvodného paliva je výrazne ovplyvnené jeho prvkovým zložením, ako aj jeho vlhkosťou. Konkrétny model prototypu, bez inak prítomnej izolácie a ďalších prvkov, ktoré sú prítomné pri komerčnej kúpe od firmy Ekoscroll na 25 kW<sub>th</sub> je vyobrazený na Obr. 12.



Obr. 12 Prototyp splyňovacieho kotla Ekoscroll o výkone 25 kW<sub>th</sub>

Pre lepší popis geometrie kotla je na Obr.13 prierez modelom kotla. Hornú časť kotla tvorí zásobník na kusové drevo, v spodnej časti zásobníku nadväzuje žiaruvzdorná tvarovka (tryska), tvarové zúženie pozdĺžneho tvaru otvoru, ktorá umožňuje priechod plynov do spodnej časti kotla a zaisťuje vyhorenie všetkých spáliteľných látok. Priestor za tryskou sa nazýva spaľovací priestor. Dno spaľovacieho priestoru tiež funguje ako popolník, kde sa zachytáva nespáliteľný tuhý zbytok, ktorý je spoločne s horľavým plynom strhávaný cez trysku zo zásobníku paliva pri primárnom horení. Z bočnej strany kotla je vidieť vstup vody do kotla, a na hornej stene zase výstup vody, do ktorej sa predáva tepelný výkon kotla, pričom jej pohyb zabezpečuje obehové čerpadlo. Na prednej strane kotla sa nachádzajú dvierka pre kontrolu a čistenie kotla od tuhého zbytku. Nad dvierkami je umiestnený otvor pre prístup vzduchu, ktorý je

zabezpečený ventilátorom. V hornej časti kotla sú lokalizované dva otvory obdĺžnikového tvaru. Väčší z nich slúži na dokladanie kusového dreva a je taktiež opatrený dvierkami (dvierka nie sú súčasťou obrázku). Menší otvor je výstup ochladených spalín z kotla ktorý potom nadväzuje na komín.



Obr. 13 Prierez modelom geometrie splyňovacieho kotla Ekoscroll

Najrozmernejšou sekciou na obr. 13 je zásobník kusového dreva, oproti otvoru na vkladanie dreva je výrez, ktorý je zaobstaraný klapkou, ktorá je manuálne ovládateľná z vonka kotla. Tento výrez (bipasová klapka) sa používa pri nabíjaní kotla pre zabezpečenie ťahu. V dolnej časti zásobníku je podlhovastý otvor, tiež označovaný ako tryska. Tesne pod tryskov je vedenie primárneho vzduchu. Nasleduje radiačná časť kotla, ktorej steny sú obložené šamotovým obložením 2 cm hrubým. Ďalej sa nachádzajú len spalínovody vo forme trubiek, ktoré sú obtekané chladiacou vodou. Ide o takzvanú konvekčnú sekciu kotla. Namerané technické parametre kotla sú spísane v kapitole 2.1 a 2.2

## 2.1 Meranie parametrov kotla

Na kotli bolo prevedených niekoľko skúšok horenia, meranie emisií kotla ako aj detailnejšie meranie teplôt v miestach možnej integrácie TEG. Pri spomínaných meraniach ako palivo bol použitý suchý dub. Rozbor paliva a jeho prvkové zloženie je uvedené v Tab.6, Tab.7.

Tab.6 Údaje o použíom palive, suchý dub

Parameter	Jednotka	Hodnota
Uhlík	[wt%]	44,48
Vodík	[wt%]	4,99
Kyslík	[wt%]	39,45
Dusík	[wt%]	0,73
Síra	[wt%]	0,08
Výhrevnosť	[MJ/kg]	15,01
Spalné teplo	[MJ/kg]	16,35

Tab.7 Hrubý rozbor paliva, suchý dub

Parameter	Jednotka	Hodnota
Vlhkosť	[wt%]	10,00
Popolovina	[wt%]	0,29
Horľavina	[wt%]	76,05
Fixný uhlík	[wt%]	13,66
Spolu	[wt%]	100,00

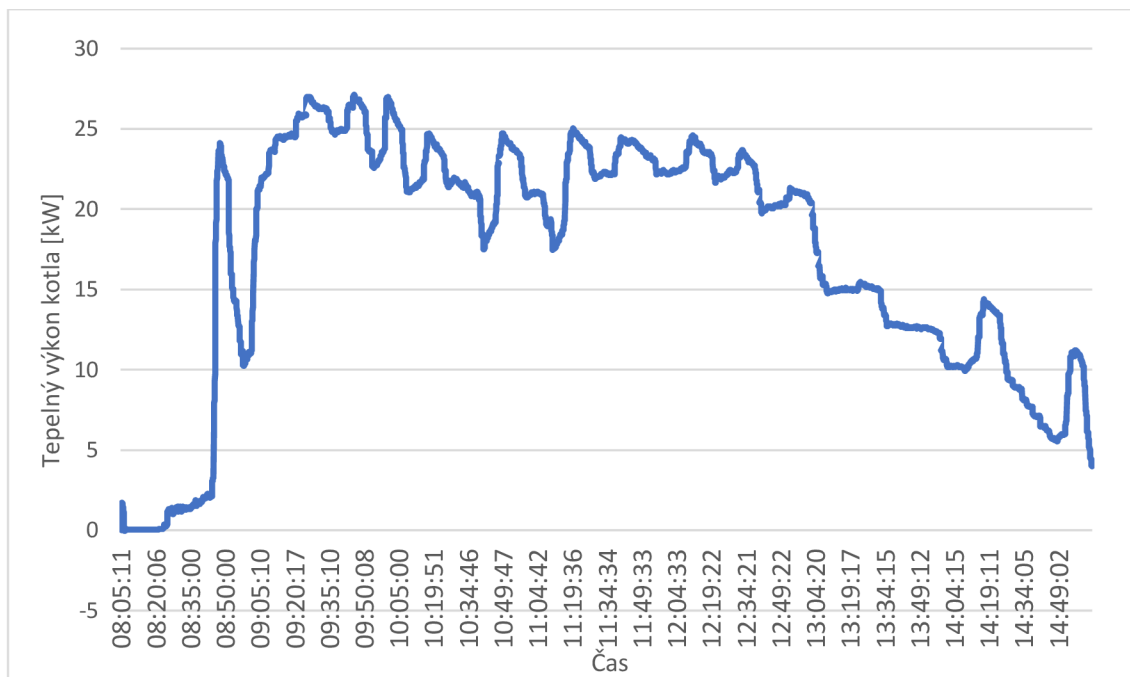
Skúška horenia, pri ktorej boli merané emisie kotla, ako aj tepelný výkon kotla a elektrická spotreba prebiehala po dobu cca 6 hodín. O 8:23 kotol bol naložený palivom potom zapálený. O 8:45 bola prevedená kontrola paliva nasledovaná priložením paliva o 8:56. V časoch 9:20, 9:26 a 9:57 bola vykonaná regulácia za pomoci otáčok ventilátoru. Ďalšia a posledná kontrola bola prevedená o 10:39, po ktorej nasledovalo posledné priloženie paliva v čase 11:07 potom bol kotol ponechaný v činnosti až do doby 14:07, kedy boli merania ukončené. Kotol nepracuje kontinuálne ale dávkovo jeho výkon s časom fluktuluje podľa úbytku paliva, pridania paliva a podobne, podobné to je aj pre ostatné merané parametre, preto aby výsledky merania boli reprezentatívne bolo vybrané časové okno od 11:18 do 12:29 výsledky sú zhrnuté v tabuľkách Tab.8, Tab.9, Tepelný výkon kotla počas skúšky je zaznamenaný v Obr. 14.

Tab.8 Emisie kotla v čase od 11:18 do 12:29

Označenie	Jednotka	Hodnota	Smerodajná odchylka
CO	[vol %]	0,251	0,0089
CO <sub>2</sub>	[vol %]	10,796	0,8442
O <sub>2</sub>	[vol %]	9,374	0,8149
NO <sub>x</sub>	[mg]	246,674	47,5666
SO <sub>2</sub>	[mg]	12,06	5,1891
TOC	[mg]	45,778	33,1413

Tab.9 Parametre kotla v čase od 11:18 do 12:29

Parameter	Jednotka	Hodnota	Smerodajná odchylka
Teplota vody in	[°C]	59,99	0,6087
Teplota vody out	[°C]	76,53	0,7188
Teplota spalín	[°C]	210,76	3,3914
Prietok vody	[m <sup>3</sup> /h]	1,39	0,0032
Tlak vody	[bar]	0,9	0,0026
Tepelný výkon	[kW]	23,15	0,9179

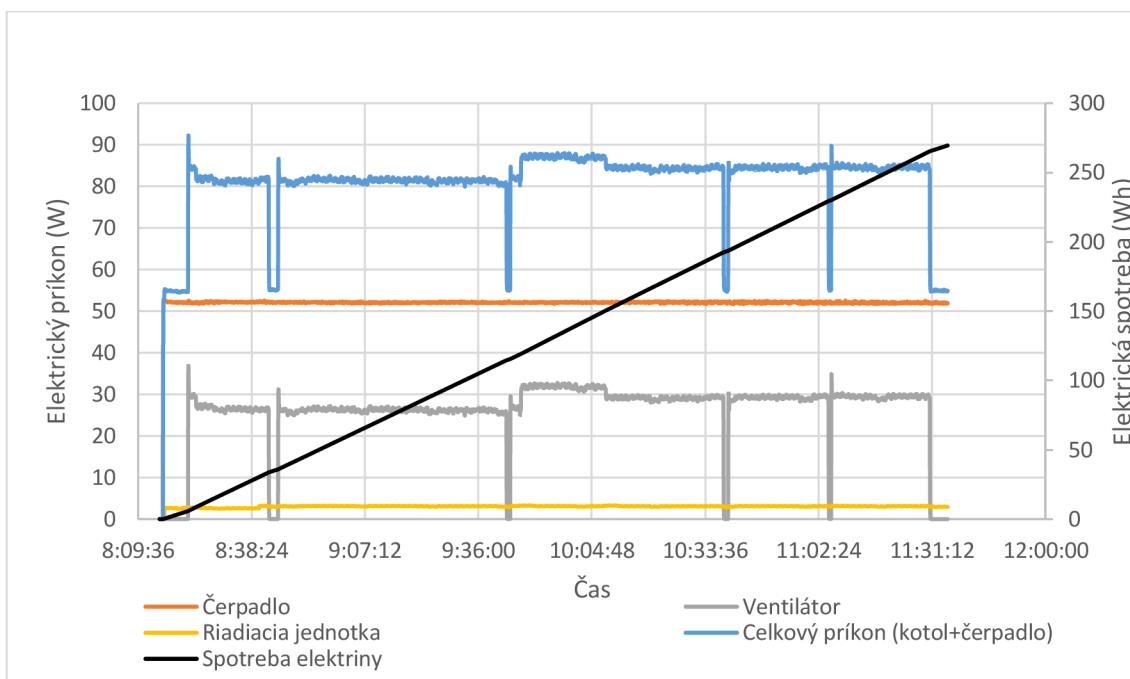


Obr. 14 Priebeh výkonu počas doby spaľovacej skúšky

## 2.2 Spotreba elektrickej energie splyňovacieho kotla

Výdaj elektrickej energie kotla sa skladá s energetických nárokov obehového čerpadla, riadiacej jednotky kotla a lopatkového ventilátora. Meranie spotreby elektrickej energie bolo vykonávané pomocou viackanálového analyzátoru PA900 od spoločnosti Vitrek, ktorý vyhovuje pre tieto účely z hľadiska požadovanej rýchlosti i presnosti záznamu (22bitové rozlíšenie, presnosť merania 0,1 %). Meranie prebiehalo v 1-sekundových intervaloch. Bolo merané napájacie napätie a elektrický prúd prechádzajúci meracími svorkovnicami. Sledovanými veličinami bol elektrický príkon komponentov kotla (vzduchový ventilátor, riadiaca jednotka) a príkon nezávislého obehového čerpadla.

Z nameraných príkonov jednotlivých komponentov bol vždy odvodený celkový elektrický príkon zostavy a z priebehu celkového príkonu v čase následne celková spotreba elektriny. Elektrický príkon obehového čerpadla a riadiacej jednotky kotla v čase počas meraní zostáva v podstate nezmenený, 53  $W_{el}$  pre čerpadlo a 2,7  $W_{el}$ , pre riadiacu jednotku kotla ecoMAX 800 D2. Čerpadlo použité v meracom okruhu skúšobného kúta je štandardným bezupchávkovým mokrobežným čerpadlom (Grundfos ALHA2 25-80 180) s voliteľne nastaviteľným prietokom. Druhým výraznejšie energeticky náročným spotrebičom zostavy kotla je ventilátor. Ide o radiálny ventilátor s dopredu zahnutými lopatkami prevozovanom na úrovni 50-60 % výkonu, čo odpovedá zhruba 160  $m^3/h$ . Jeho príkon sa počas skúšky menil, avšak počas horenia paliva zostal takmer konštantný. Kotlový regulátor udržiava pevne nastavený výkon ventilátora bez ohľadu na priebeh spaľovacieho procesu. Príkon ventilátora a celkový príkon zostavy sa preto v čase počas horenia paliva výraznejšie nemení. Po rozhorení paliva v kotli príkon ventilátora dosahoval úroveň 30  $W_{el}$ . Ventilátor vykazuje ojedinelé poklesy odberu energie v prípadoch kedy bolo do kotla zasahované. Je vidieť, že bol vypnutý, teda jeho odber zo siete bol nulový. Je teda možné prehlásiť, že elektrická spotreba kotla je skoro konštantná po dobu jeho funkcie. Priemerná spotreba elektrickej energie kotla bola 82,7  $W_{el}$  pričom maximálna hodnota elektrického odberu bola 92,2  $W_{el}$ , ktorá sa objavila hneď na začiatku merania. Výdaj elektrickej energie jednotlivých položiek je zobrazený v Obr. 15.



Obr. 15 Výdaj elektrickej energie zostavy kotla

Z meraní elektrickej spotreby komponentov splynovacieho kotla vyplýva, že navrhovaná jednotka TEG bude musieť byť schopná generovať elektrický výkon v rozmedzí 80-100 W. To by však bolo technicky veľmi komplikované. Preto je nutné najprv znížiť potrebný elektrický príkon kotla. Z vykonaných meraní vyplynulo, že hlavnými spotrebičmi elektrickej energie sú vzduchový ventilátor a kotlové čerpadlo.

### Čerpadlo

V súčasnosti používané obehové kotlové čerpadlá spĺňajú oproti ventilátorom prísnejšie požiadavky na energetickú účinnosť. Príkon čerpadla je daný typom vykurovacej sústavy. Laboratórna skúšobná slučka využívaná na experimenty obsahuje doskový výmenník s veľkou tlakovou stratou, v dôsledku toho bol nameraný aj značný príkon čerpadla. V skutočnosti by elektrické príkony čerpadiel v domových nízkoteplotných inštaláciách oproti nameraným hodnotám dosahovali príkony okolo 25 Wattov príkladom je čerpadlo Grundfos, ALPHA1 L XX-40 (N).

### Ventilátor

V prípade experimentálneho kotla v pôvodnom prevedení išlo o v tepelnej technike štandardne používaný ventilátor typu WPA 06 od spoločnosti EBM PAPST, vid' Obr.16 a Obr.17, ktorý je tvorený jednostranne sacím radiálnym nízkotlakovým obežným kolesom s dopredu zahnutými lopatkami a vstavaným jednofázovým asynchrónnym 2-pólovým motorom s kondenzátorom a napájaným 230 V AC/50 Hz, ktoré sú spoločne umiestnené v špirálovej skrini. Podľa technického listu od výrobcu, dosahuje ventilátor pri 2500 ot/min a elektrickom príkone 83 W maximálneho dopravného tlaku 260 Pa alebo objemového prietoku 255 m<sup>3</sup>/h. Z údajov od výrobcu a vykonaných meraní vyplynulo, že celková účinnosť premeny energie vo ventilátore je veľmi nízka, pri bežnom zaťažení kotla iba v ráde jednotiek percent a neúmerne by navyšovala potrebný výkon TEG.

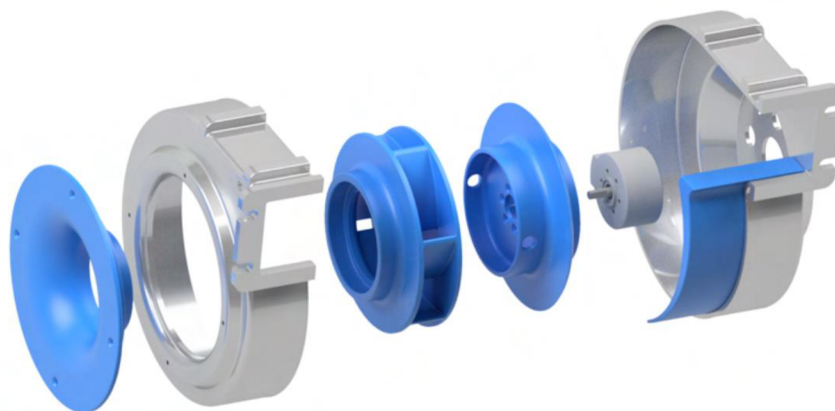


Obr. 16 Pôvodný ventilátor WPA 06



Obr. 17 Pohľad na demontované obežné koleso

V prípade zvoleného kotla nie sú také veľké objemy vzduchu potrebné, ventilátor musel byť výrazne výkonovo obmedzovaný a aj v dôsledku toho ďalej klesala jeho celková účinnosť. Príčinami tohto stavu sú použitý typ motora, jeho dimenzovanie, spôsob regulácie výkonu a v neposlednom rade aj tvar lopatkovania obežného kolesa. V rámci projektu boli navrhnuté opatrenia na zvýšenie celkovej účinnosti ventilátora: úprava existujúceho ventilátora resp. zachovanie existujúcej podoby liatej hliníkovej špirálovej skrine ventilátora, výmena obežného kolesa s dopredu zahnutými lopatkami s integrovaným indukčným motorom za dozadu zahnuté lopatkovanie s účinnejším typom elektronicke komutovaného BLDC (Brushless, direct current) motora, čo je bezkefový jednosmerný elektromotor s vyššou odhadovanou účinnosťou pre túto aplikáciu. Model zostavy ventilátora s upravenou skriňou pôvodného ventilátora WPA 06 je na Obr. 18. Súčasti zľava: nové sacie ústie, predná časť pôvodnej špirálovej skrine, obežné koleso, lôžko motora, elektromotor Faulhaber, zužujúca vložka a zadná časť pôvodnej špirálovej skrine. Novo vyrobené komponenty sú zafarbené na modro.



Obr. 18 Model zostavy ventilátora s upravenou skriňou pôvodného ventilátora WPA 06

Takto upravený ventilátor WPA 06 sa elektrickým príkonom pri nasledujúcich experimentálnych meraniach za prevozu kotla blížil hodnote 10 W, čo je tretina z pôvodného el. príkonu. V dôsledku toho sa maximálny požadovaný výkon TEG znížil na 60 W pri uvažovanom maximálnom príkone čerpadla (40 W) Grundfos, ALPHA1 L XX-40 (N). Pri vhodnom zapojení vykurovacej sústavy by bol dostačujúci elektrický príkon kotla na úrovni cca. 40 W. V prípade samotiažneho obehu vykurovacej sústavy pilotného kotla by boli dostačujúce už aj príkony na úrovni iba do cca. 15 W.

### 2.3 Experimentálne stanovenie teplotného poľa kotla

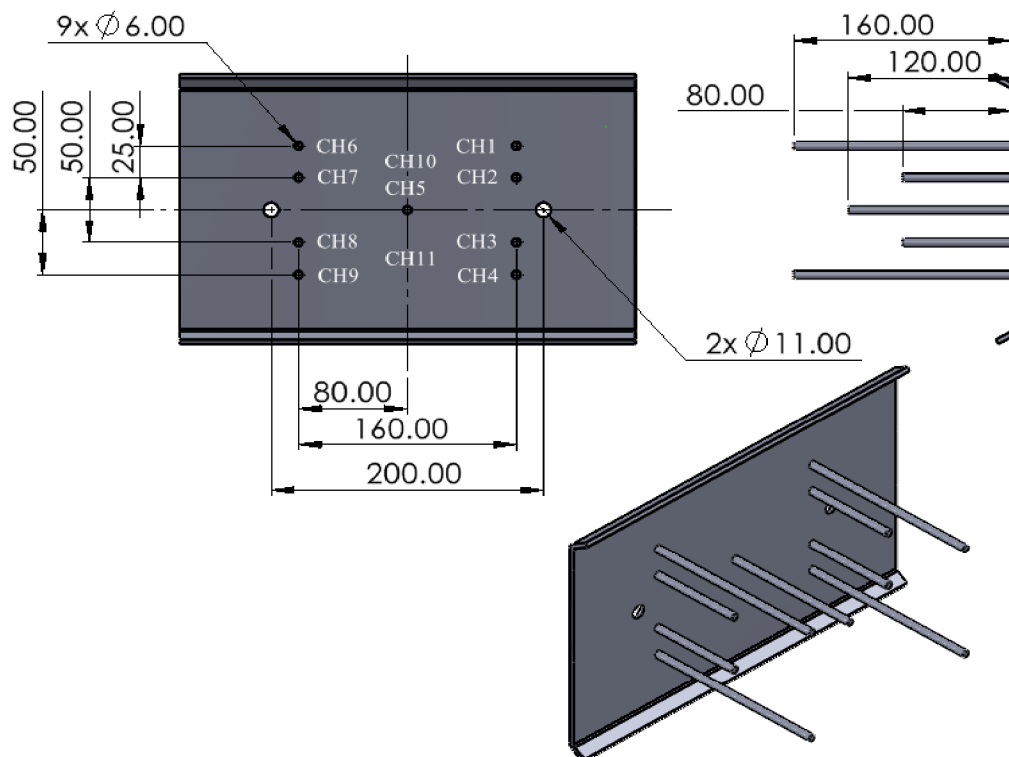
Toto meranie je dvôležité, nakoľko poskytne vitálne informácie o teplotách v oblasti za spaľovacou komorou kotla, čo umožní presnejší výber TE modulov vzhľadom na teplotnú úroveň modulov pri návrhu termoelktrického generátoru v kapitole 6.

Do kotla, konkrétne do priestoru predných dvierok bolo rovnomerne zavedených 11 termočlánkov. Pomocou posuvného šróbenia boli konce termočlánkov uchytené v rôznych vzdialenostiach od plochy dvierok kotla Obr.19,20. Rozmiestnenie jednotlivých termočlánkov v priestore bolo zvolené tak, aby maximálne popísalo celý sledovaný objem. Meranie prebiehalo v troch rovinách so stredovým bodom v strede krycieho plechu vo vnútri dvierok. Dlhšie termočlánky CH1, CH4, CH6 a CH9 boli zasunuté do priestoru 160 mm a sú od stredového bodu na výšku posunuté o -50 mm a 50 mm a do strán posunuté o -80 mm a 80 mm. Približne v rovnakej vzdialenosti od stredového bodu dvierok sú aj termočlánky CH2, CH3, CH7 a CH8, ale tieto snímače sú vysunuté iba 80 mm. V strede dvierok je potom vysunutý termočlánok CH5 v dĺžke 120 mm. Bola sledovaná aj teplota odrazového plechu na vnútornej strane dvierok, ktorá pozíciou odpovedá umiestneniu teplej strany TEM. Termočlánok CH10 je približne 50 mm nad stredovým bodom a CH11 je 50 mm pod stredovým bodom v osi dvierok. Dimenzie termočlánkov a ich rozloženia sa nachádzajú na Obr.20.



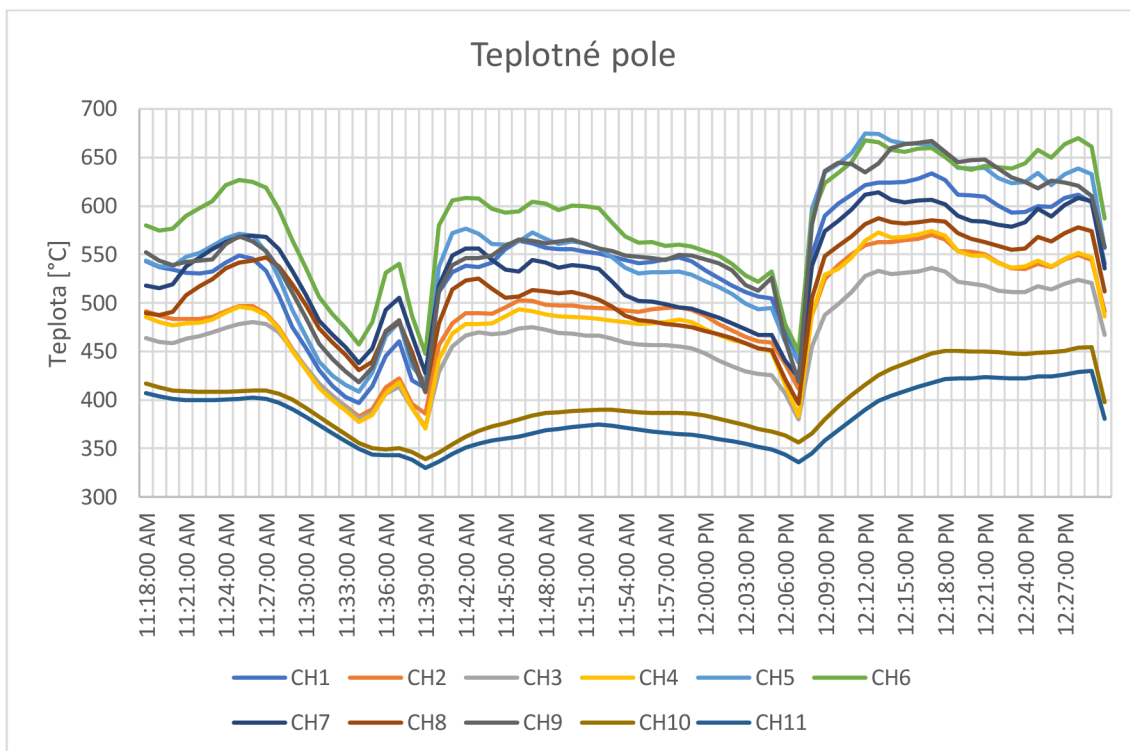
*Obr. 19 Fotografia TE článkov v oblasti dvierok kotla*





Obr. 20 Rozloženie TE článkov v kotli

Jedná sa o termoelektrické snímače teploty od výrobcu Mavis nový Bor s.r.o, model MTC11 typu K o hrúbke plášťa 6 mm, čo sú tvarovateľné a zároveň robustné snímače s rýchlou teplotnou odozvou. Termočlánok je zapuzdrený v kovovom plášti a je obklopený minerálnou izoláciou. V trvalom prevoze sú články schopné fungovať pri teplotách do 1140 °C a krátkodobo vystáť teploty nad 1200 °C, ako udáva výrobca.[36] Pomocou posuvného šróbenia bolo možné články uchytiť v rôznych vzdialenostiach od plochy dvierok kotla. Výstupnou hodnotou termočlánku je napätie, ktorého závislosť je stanovená normou ČSN EN 60584-1 ed.2. Vďaka tejto závislosti sa hodnoty napätia prevedú na číselné hodnoty teploty, ktoré sú zaznamenávané každú minútu. Hodnoty napätia sú zaznamenávané a prevádzane pomocou zapisovača Datalogger GRAPHTEC GL840-WV Na meranie teplotného poľa bol použitý datalogger Model GL840, viď. obr. 31. Jedná sa o 20 kanálové analógové zariadenie rozširiteľné na 200 kanálov, rozšírené o štyri diskkrétne vstupy a výstupy. Jeho diskkrétne vstupy je možné nakonfigurovať ako logické vstupy, alebo ako pulzné vstupy. Každý z 20 analógových vstupných kanálov GL840 môže byť nakonfigurovaný na meranie priamo pripojeného napätia v rozsahu 20 mV až 100 V plného rozsahu v 12 rozsahoch, pre priamo pripojený termočlánok akéhokoľvek typu alebo trojvodičový PT100 alebo PT1000 RTD. Každý z analógových vstupných kanálov GL840 je elektricky izolovaný od ostatných kanálov a od napájacieho uzemnenia, čo umožňuje meranie mimo zeme pomocou bočnikov a tiež napájaných alebo uzemnených termočlánkov. Záznam dát je možné nezávisle spustiť alebo zastaviť v závislosti na úrovni analógového a pulzného/diskkrétneho signálu (jednotlivého alebo v okne), alarmu, dátumu a času a dňa v týždni. Výsledkom je teda 11 hodnôt bodových teplôt za minútu. Priebeh merania pre časový úsek 11:18- 12:29 je zaznamenaný v Obr.21. Priemerné hodnoty CH1-CH11 sa nachádzajú v Tab.10, zaznamenávané hodnoty teplôt sú merané s presnosťou  $\pm 0,6$  °C v danom rozsahu 100 do 1100 °C.



Obr. 21 Záznam bodových meraní teploty v oblasti dvierok kotla v časovom úseku 11:18-12:29

Tab.10 Priemerné hodnoty nameraných teplôt pre časový úsek 11:18-12:29

Označenie TE článku	Priemerná teplota	Smerodajná odchylka
CH1	540,55	61,63
CH2	491,74	48,81
CH3	467,07	42,57
CH4	486,31	52,67
CH5	557,05	71,53
CH6	587,38	57,92
CH7	536,07	50,97
CH8	512,86	47,88
CH9	557,79	66,62
CH10	397,12	32,69
CH11	379,7	28,71

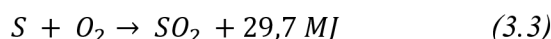
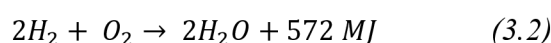
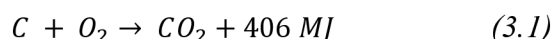
### 3. Výpočtová časť

Výpočtová časť práce sa venuje výpočtom potrebným ku tvorbe CFD modelu v programe Fluent [37]. Táto časť zahŕňa stechiometriu spaľovania tuhých palív, množstvo potrebného spaľovacieho vzduchu, entalpiu vzniknutých spalín, teplotu nechladeného plameňa, tepelnú bilanciu kotla, stanovenie súčiniteľov prestupu tepla, výpočty zdrojov hmoty a energie použitých pri definovaní okrajových podmienok.

#### 3.1 Spaľovací vzduch

Pri spaľovacích skúškach bolo ako palivo použité kusové drevo suchého dubu. Jedná sa o dvrďé drevo o nízkom obsahu vlhkosti  $W_r$  10%. Hrubý rozbor a prvkové zloženie je uvedené v tabuľkách Tab.7, Tab.8.

Ku spaľovaniu v oblasti kotla je za potreby kyslík. Množstvo kyslíku potrebného na dokonalé spálenie jednotkovej hmotnosti paliva vychádza zo stechiometrických spaľovacích rovníc pre dané palivo popísané jeho hrubým rozborom a prvkovým zložením. Výpočet sa opiera o rad oxidačných reakcií horľavých prvkov obsiahnutých v palive, rovnice 3.1-3. Kyslík do kotla vstupuje ako zložka spaľovacieho vzduchu z okolia. Množstvo vzduchu sa určí ako podiel požadovaného množstva kyslíka a jeho objemového zastúpenia vo vzduchu. Uvažované zloženie vzduchu je uvedené v tabuľke Tab.11, Detailný výpočet je uvedený nižšie.



Tab.11 Zloženie vzduchu

Plynná zložka	Označenie	Jednotka	Hodnota
Dusík	N <sub>2</sub>	[vol%]	78,09
Kyslík	O <sub>2</sub>	[vol%]	20,95
Argón	Ar	[vol%]	0,93
Oxid uhličitý	CO <sub>2</sub>	[vol%]	0,03
Spolu	SUMA	[vol%]	100

Aby bolo zaručené že naozaj dôjde k úplnému spáleniu paliva v kotli je potrebné o čosi navýšiť množstvo privádzaného vzduchu do kotla. Tohoto je dosiahnuté pomocou koeficientu prebytku vzduchu  $\alpha$ . Koeficient pre tento konkrétny prípad bol uvažovaný o hodnote 1,3. Nasledovný výpočet sa zakladá na modeli dokonalého spaľovania tuhých palív [38]. Minimálne množstvo kyslíku pre spálenie 1 kg paliva ( $m_N^3/kg_{pal}$ );  $p = 101,325 \text{ kPa}$ ;  $t = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ ):

$$O_{O_2,min} = \frac{22,39}{100} \cdot \left( \frac{C^r}{12,01} + \frac{H^r}{4,032} + \frac{S^r}{32,06} - \frac{O^r}{32} \right) \quad (3.4)$$

$$O_{O_2,min} = 0,8686 \text{ m}_N^3/kg_{pal}$$

Minimálne množstvo suchého vzduchu pre spálenie 1 kg paliva:

$$O_{VZ,min}^S = \frac{100}{21} \cdot O_{O_2,min} \quad (3.5)$$

$$O_{VZ,min}^S = 4,1364 \text{ m}_N^3/\text{kg}_{pal}$$

Minimálne množstvo vlhkého vzduchu pre spálenie 1 kg paliva ( $f = 1,016$ ):

$$O_{VZ,min} = f \cdot O_{VZ,min}^S \quad (3.6)$$

$$O_{VZ,min} = 4,2026 \text{ m}_N^3/\text{kg}_{pal}$$

Skutočné množstvo vzduchu s prebytkom  $\alpha$  1,3 je teda:

$$O_{VZ} = \alpha \cdot O_{VZ,min} \quad (3.7)$$

$$O_{VZ} = 5,4634 \text{ m}_N^3/\text{kg}_{pal}$$

objem CO<sub>2</sub> v spalinách sa určí ako:

$$O_{CO_2} = \frac{22,26}{100} \cdot \frac{c^r}{12,01} + 0,0003 \cdot O_{VZ,min}^S \quad (3.8)$$

$$O_{CO_2} = 0,8375 \text{ m}_N^3/\text{kg}_{pal}$$

objem SO<sub>2</sub>:

$$O_{SO_2} = \frac{21,89}{100} \cdot \frac{s^r}{32,06} \quad (3.9)$$

$$O_{SO_2} = 0,0002 \text{ m}_N^3/\text{kg}_{pal}$$

objem dusíku:

$$O_{N_2} = \frac{22,4}{100} \cdot \frac{N^r}{28,016} + 0,7805 \cdot O_{VZ,min}^S \quad (3.10)$$

$$O_{N_2} = 3,2341 \text{ m}_N^3/\text{kg}_{pal}$$

objem argónu, ktorý zahrnuje aj ďalšie vzácne plyny vo vzduchu:

$$O_{Ar} = 0,0092 \cdot O_{VZ,min}^S \quad (3.11)$$

$$O_{Ar} = 0,0381 \text{ m}_N^3/\text{kg}_{pal}$$

Minimálne množstvo suchých spalín vznikne dokonalým spálením 1 kg paliva bez prebytku vzduchu, teda pri  $\alpha = 1$ , a určí sa ako súčet jednotlivých zložiek spalín:

$$O_{SP,min}^S = O_{CO_2} + O_{SO_2} + O_{N_2} + O_{Ar} \quad (3.12)$$

$$O_{SP,min}^S = 4,1099 \text{ m}_N^3/\text{kg}_{pal}$$

Objem vodnej páry v minimálnom množstve vlhkých spalín:

$$O_{H_2O,min} = \frac{44,8}{100} \cdot \frac{H^r}{4,032} + \frac{22,4}{100} \cdot \frac{W^r}{17,016} + (f - 1) \cdot O_{VZ,min}^S \quad (3.13)$$

$$O_{H_2O,min} = 2,5333 \text{ m}_N^3/\text{kg}_{pal}$$

Minimálne množstve vlhkých spalín:

$$O_{SP,min} = O_{SP,min}^S + O_{H_2O,min} \quad (3.14)$$

$$O_{SP,min} = 6,6432 \text{ m}_N^3/\text{kg}_{pal}$$

Skutočné množstvo spalín s prebytkom vzduchu:

$$O_{SP} = O_{SP,min} + (\alpha - 1) \cdot O_{VZ,min} \quad (3.15)$$

$$O_{SP} = 7,9040 \text{ m}_N^3/\text{kg}_{pal}$$

### 3.2 Užitočné teplo spalín

Teplota nechladeného plameňa (adiabatická teplota spalín) je teplota spalín, ktorej ešte nebolo odobrané žiadne teplo. Jedná sa teda o maximálnu hodnotu teploty spalín. Pre jej stanovenie je treba poznať hodnotu užitočného tepla uvoľneného v ohnisku spaľovacími reakciami  $Q_{ir}$  a dodaného spaľovacím vzduchom  $Q_{VZ}$ , poprípade iným zdrojom.

$$Q_{ir} = Q_s - \frac{2441,5}{100} (W_r + 8,94 H_r) \quad (3.16)$$

$$Q_{ir} = 15,010 \text{ MJ}/\text{kg}_{pal}$$

$W_r$  je obsah vody v hm. %,  $H_r$  je obsah vodíku v hm. %, 2441,5 kJ/kg výparné teplo vody a 8,94 je koeficient k prepočtu vodíku na vodu (vodík sa stanovuje elementárnou analýzou). Množstvo tepla privádzaného vo vzduchu sa potom stanoví ako:

$$Q_{VZ} = \alpha \cdot \sum x_i \cdot I_{VZ,min}^{(C)} \quad (3.17)$$

$$Q_{VZ} = 42,511001 \text{ KJ}/\text{kg}_{pal}$$

Kde  $x_i$  predstavuje podiel danej zložky spaľovacieho vzduchu a jeho  $I_{(VZ,min)}^{(C)}$  [kJ/kg<sub>pal</sub>] entalpiu pre danú teplotu. Napr. pre podiel primárneho a sekundárneho vzduchu 20: 80 a pri predohreve primárneho vzduchu na teplotu 150 °C by sa  $Q_{VZ}$  určilo ako:

$$Q_{VZ} = \alpha \cdot (0,2 \cdot I_{VZ,min}^{150^\circ C} + 0,8 \cdot I_{VZ,min}^{25^\circ C}) \quad (3.18)$$

Vzduch predhrievaný pri spalovacích skúškach z kapitoly 2. nebol a tak je jeho teplota uvažovaná 25°C. Potom celková entalpia spalín vznikajúcich dokonalým spálením jedného kg paliva je daná nasledujúcim vzťahom (3.19).

$$I_u = Q_i^r \cdot \frac{100 - z_{cn} - z_c - z_{fs}}{100 - z_c} + Q_{vz} \quad (\text{kJ/kg}_{pal}) \quad (3.19)$$

$$I_u = 16284,035 \text{ kJ/kg}_{pal}$$

$Q_i^r$  – výhrevnosť paliva (kJ/kg<sub>pal</sub>)

$z_c$  – strata mechanickým nedopaľom (%)

$z_{cn}$  – strata chemickým nedopaľom (%)

$z_{fs}$  – strata fyzickým teplom tuhých zbytkov (%)

$Q_{vz}$  – množstvo tepla privedeného v spaľovacom vzduchu (kJ/kg<sub>pal</sub>)

### 3.3 Entalpia spalín

Spaľovanie je chemická reakcia uvoľňujúca teplo, ktorá nastáva keď palivo reaguje s kyslíkom. Výpočet tepla dodaného do kotla zahŕňa celkovú entalpiu spaľovacieho vzduchu a energiu, ktorá vzniká pri vzájomnej reakcii paliva a spaľovacieho vzduchu. Táto hodnota musí byť rovnaká, ako entalpia obsiahnutá vo výsledkoch reakcie, teda vo výsledných spalínach. Teplo je vždy vypočítané, ako súčin objemového alebo hmotnostného prúdu zohľadneného v bilancii a špecifickej entalpie prislúchajúcej danej časti. Množstvo vzduchu, paliva a spalín je určené na základe stechiometrických výpočtov pre spaľovanie tuhých palív.[38]

Entalpia spalín vzniknutých pri spálení 1 kg paliva pre danú teplotu (kJ/kg<sub>pal</sub>):

$$I_{SP} = I_{SP,min} + (\alpha - 1) \cdot I_{VZ,min} \quad (3.20)$$

kde  $I_{SP,min}$  je entalpia spalín pri  $\alpha = 1$  (kJ/kg<sub>pal</sub>), teda:

$$I_{SP,min} = O_{CO_2} \cdot i_{CO_2} + O_{SO_2} \cdot i_{SO_2} + O_{N_2} \cdot i_{N_2} + O_{H_2O,min} \cdot i_{H_2O,min} + O_{Ar} \cdot i_{Ar} \quad (3.21)$$

$I_{VZ,min}$  je entalpia minimálneho množstva vzduchu (kJ/kg<sub>pal</sub>):

$$I_{VZ,min} = O_{VZ,min}^S \cdot i_{VZ,min} \quad (3.22)$$

Jednotlivé entalpie prvkov (CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, Ar) v závislosti na teplote sú zobrazené v Tab. 12 [38]. Výsledky rovníc 3.20-22 pre jednotlivé teploty sú zaznamenané v tabuľke Tab.13 a budú slúžiť na zostrojenie rovnice lineárnej regresie pomocou, ktorej sa určí teplota nechladeného plameňa.

Tab.12 Entalpie plynných zložiek vztiahnutých na  $m_N^3$  [38]

Teplota	O2	CO2	N2	H2O	SO2	Ar	Vzduch
[°C]	[kJ/m <sup>N</sup> <sub>3</sub> ]	[kJ/m <sup>N</sup> <sub>3</sub> ]	[kJ/m <sup>N</sup> <sub>3</sub> ]	[kJ/m <sup>N</sup> <sub>3</sub> ]	[kJ/m <sup>N</sup> <sub>3</sub> ]	[kJ/m <sup>N</sup> <sub>3</sub> ]	[kJ/m <sup>N</sup> <sub>3</sub> ]
0	0	0	0	0	0	0	0
25	32,78	41,62	32,53	39,1	46,81	23,32	32,57
100	131,7	170	129,5	150,6	191,2	93,07	132,3
200	267	357,5	259,9	304,5	394,1	186	266,2
300	406,8	558,8	392,1	462,8	610,4	278,8	402,5
400	550,9	771,9	526,7	625,9	836,5	371,7	541,7
500	698,7	994,4	664	794,5	1070	464,7	684,1
600	849,9	1225	804,3	968,8	1310	557,3	829,6
700	1003	1462	947,3	1149	1554	650,2	978,1
800	1159	1705	1093	1335	1801	743,1	1129
900	1318	1952	1241	1526	2052	835,7	1283
1000	1477	2203	1392	1723	2304	928,2	1439
1100	1638	2458	1544	1925	2540	1020	1597
1200	1802	2716	1698	2132	2803	1114	1756
1300	1965	2976	1853	2344	3063	1207	1916
1400	2129	3239	2009	2559	3323	1300	2077
1500	2293	3503	2166	2779	3587	1393	2240
1600	2465	3769	2325	3002	3838	1577	2403
1800	2804	4305	2643	3458	4363	1742	2732
2000	3138	4844	2965	3925	4890	1857	3065
2500	4006	6204	3778	5132	6205	2321	3909

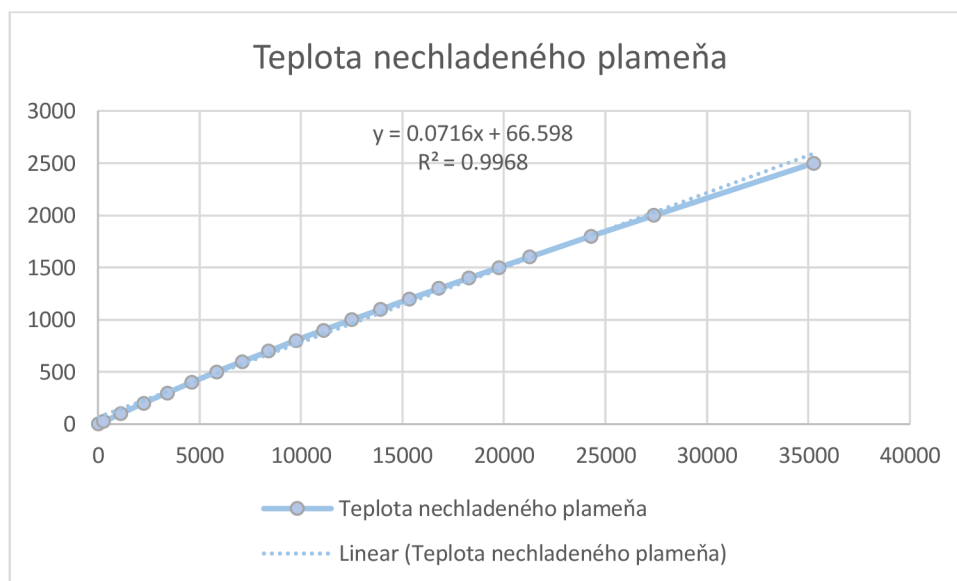
Tab.13 Výsledky rovnic 3.20-3.22, entalpia splashu a vzduchu

Teplota	I <sub>SP,min</sub>	I <sub>VZ,min</sub>	I <sub>SP</sub>
[°C]	[kJ/kg <sub>pal</sub> ]	[kJ/kg <sub>pal</sub> ]	[kJ/kg <sub>pal</sub> ]
0	0	0	0
25	239,32	134,07	279,55
100	943,55	544,60	1106,93
200	1913,01	1095,79	2241,75
300	2910,95	1656,86	3408,01
400	3938,65	2229,87	4607,61
500	4996,84	2816,05	5841,65
600	6085,87	3414,99	7110,37
700	7203,90	4026,28	8411,79
800	8350,32	4647,45	9744,56
900	9520,14	5281,38	11104,56
1000	10718,14	5923,55	12495,21

Teplota	ISP,min	IvZ,min	ISP
1200	13174,24	7228,46	15342,78
1300	14430,65	7887,09	16796,77
1400	15700,38	8549,83	18265,33
1500	16986,83	9220,81	19753,08
1600	18292,43	9891,79	21259,97
1800	20924,62	11246,10	24298,45
2000	23598,14	12616,87	27383,20
2500	30424,86	16091,14	35252,21

### 3.4 Teplota nechladeného plameňa

Hodnoty teplôt z tabuľky Tab.16 boli vynesené na základe príslušných entalpií zmesi vzduchu a spalín, potom boli dáta preložené lineárnou krivkou, ktorú popisuje rovnica zobrazená v Obr.22. Do rovnice bola dosadené užitočné teplo spalín, ktoré je výsledkom podkapitoly 3.2. Na základe popísaných krokov bola určená teplota nechladeného plameňa o hodnote 1264 °C.



Obr. 22 Entalpia spalín a vzduchu ako funkcia teploty

### 3.5 Splyňovanie tuhého paliva

Pri prehoriavaní kusového dreva za obmedzeného prístupu kyslíku sa v zásobníku kotla uvoľňujú horľavé plyny vo forme zmesi, tiež nazývanej drevoplyn, ako bolo uvedené v kap.1.4. Zloženie drevoplynu je prebrané z prípadovej štúdie z roku 2021 [39]. V Štúdií bolo použité tiež ako palivo suchý dub, avšak je treba mať na zreteli že zloženie zmesi drevoplynu závisí od viacerých faktorov ako napr. vlhkosť paliva a teplota v zásobníku. A teda uvažované zloženie a realita sa môžu od seba minoritne líšiť. Uvažované zloženie drevoplynu je uvedené v Tab. 14.



Tab.14 Zloženie drevoplynu [39]

Plynná zložka	Označenie	Jednotka	Hodnota
Metán	CH <sub>4</sub>	[mol%]	2
Vodík	H <sub>2</sub>	[mol%]	10
Oxid uholnatý	CO	[mol%]	25
Oxid uhličitý	CO <sub>2</sub>	[mol%]	10
Dusík	N <sub>2</sub>	[mol%]	53
Spolu	SUMA	[mol%]	100

Ako bolo už zmienené do kotla sa palivo nedopravuje kontinuálne ale vsádzkovo. Na splyňovanie pre simulovaný úsek však je možné nahliadať ako na kontinuálny proces, čiže za jednotku času v doméne zásobníka, kde palivo prehorieva za obmedzeného prístupu kyslíku vznikne istý objem horľavého plynu. Množstvo plynnej zmesi vznikajúcej v zásobníku paliva získame, ako podiel tepelného príkonu kotla a výhrevnosti plynnej zmesi ten je potom vzťahnutý na jednotku objemu domény, v ktorej bude vznikať. Spočítané množstvá zdrojov hmoty a energie v zásobníku sú uvedené v Tab.16

Energia v doméne bola spočítaná pomocou špecifických tepiel  $c_p$  pre jednotlivé zložky zmesi. Pričom špecifické teplo je funkciou teploty. Špecifické teplo bolo zapísané v tvare

$$c_p(T) = A + BT + CT^2 + DT^3 + E/T^2$$

Pričom použité konštanty jednotlivých zložiek zmesi A, B, C, D, E sú zhrnuté v tab.15

Tab.15 Koeficienty pre polynomický rozvoj  $c_p$  ako funkcie teploty [40]

Konštanta	$c_{pCH_4}$	$c_{pH_2}$	$c_{pCO}$	$c_{pCO_2}$
A	403,5847	13602,45	968,3899	429,9289
B	9,0573	3,4023	0,4488	1,8745
C	-0,014425	-0,003358	-0,001152	-0,001152
D	1,58E-05	-3,91E-07	1,66E-06	1,30E-06
E	-6,34E-09	1,71E-09	-7,35E-10	-4,00E-10

Tab.16 Zdroje energie a hmoty v zásobníku paliva

Zložka	Jednotka	Hodnota
CH <sub>4</sub>	[kg·s <sup>-1</sup> m <sup>-3</sup> ]	0,0006976
CO <sub>2</sub>	[kg·s <sup>-1</sup> m <sup>-3</sup> ]	0,0008773
CO	[kg·s <sup>-1</sup> m <sup>-3</sup> ]	0,0146328
H <sub>2</sub>	[kg·s <sup>-1</sup> m <sup>-3</sup> ]	0,0004181
N <sub>2</sub>	[kg·s <sup>-1</sup> m <sup>-3</sup> ]	0,0389943
Celkovo	[kg·s <sup>-1</sup> m <sup>-3</sup> ]	0,0556200
Energia	[W/m <sup>3</sup> ]	57380

### 3.6 tepelná bilancia kotla

Tepelná bilancia kotla ukazuje, aké množstvo tepla sa uvoľní z paliva po reakcii so spaľovacím vzduchom, následne predá do vody a aké množstvo tepla budú mať spaliny na výstupe. Samotná tepelná bilancia je uvedená v Tab.17 Teplo je v každom prípade počítané ako súčin objemového či hmotnostného toku a špecifickej entalpie danej zložky. Teplo predané do vody je výsledkom merania v podkapitole 2.1.

Tab.17 Energetická bilancia kotla

Zložka tepelnej bilancie	Jednotka	Hodnota
Entalpia spaľovacieho vzduchu za jednotku času	kW	0,00996
Objemový tok vzduchu	m <sub>N</sub> <sup>3</sup> /s	0,000306
Špecifická entalpia vzduchu	kJ/m <sub>N</sub> <sup>3</sup>	32,57
Energia uvoľnená pri spálení tuhého paliva za jednotku času	kW	26,8
Množstvo splynnenej zmesi	mol/s	0,1834
Výhrevnosť zmesi	kJ/mol	117,281
Energia plynnej zmesi	kW	21,51277
Zdroj energie	kW	5,300916
Teplo predané do vody za jednotku času	kW	23,15
Prietok vody	m <sup>3</sup> /s	0,000388
Entalpia spalín na výstupe z kotla za jednotku času	kW	3,656

### 3.7 Stanovenie hodnôt koeficientov prestupu tepla stien kotla

Doména výpočtového modelu riešeného v 3. kapitole práce zahŕňa len vnútornú časť kotla, kde prebieha spaľovanie a následné prúdenie teplých spalín smerom von z kotla. Prestup tepla je simulovaný za pomoci okrajových podmienok stien. Podmienka prestupu tepla vo výpočtovom modeli vyžaduje stanoviť hodnoty koeficientov prestupu tepla pre steny na, ktoré bude takáto podmienka aplikovaná. Jedná sa o steny kotla, ktoré sú z jednej strany obklopené spalinami nesúcimi teplo z reakcie a z druhej strany sú obmývané vodou. Pre komplikovanú geometriu kotla by sa len ťažko obstarávali potrebné hodnoty k výpočtu súčiniteľ prestupu tepla za pomoci bezrozmerných kritérií. A tak hodnota súčiniteľov je získaná výsledkami pomocnej simulácie v prostredí fluentu. Voda v kotly je poháňaná vďaka obehovému čerpadlu, čiže ide o prípad nútenej konvekcie. A však pre relatívne pomalé prúdenie vody v kotly je simulácia riešená ako prípad kombinácie prirodzenej a nútenej konvekcie. Toto bolo zhodnotené za použitia Rayleighovo kritéria, ktoré sa používa na posúdenie charakteru prúdenia, prípadne transportu energie v tekutine.

$$Ri = \frac{Gr}{Re^2} \quad (3.23)$$

Pričom je uvádzané že:

$$Ri \gg 1 \rightarrow \text{volná konekcia}$$

$$Ri \approx 1 \rightarrow \text{kombinácia volnej a nútenej konvekcie}$$

$$Ri \ll 1 \rightarrow \text{nútená konvekcia}$$

Výsledné hodnoty spoločne s parametrami kotlovej vstupnej, výstupnej vody kotla sa nachádza v nasledovnej tabuľke Tab. 18 Aby bola zohľadnená zmena vlastností vody so zvyšujúcou sa teplotou bola zavedená stredná teplota, čo je aritmetický priemer vstupnej a výstupnej teploty vody kotla.

Tab.18 Parametre kotlovej vody

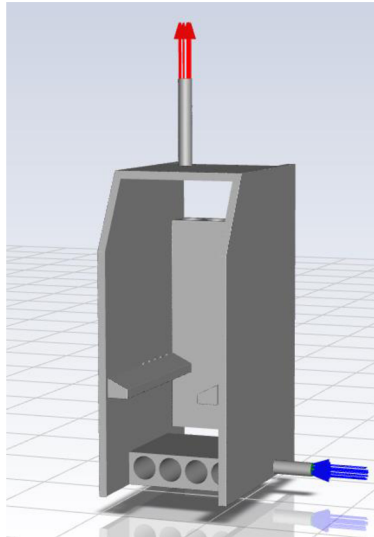
Parameter	Jednotka		Hodnota		
			voda vstup	voda výstup	stredná
Teplota vody	T	[°C]	59	76	67,5
Gravitačné zrýchlenie	G	[ms <sup>-2</sup> ]	9,81		
Koeficient teplotnej rozťažnosti	B	[K <sup>-1</sup> ]	0,000516	0,000597	0,000557
Kinematická viskozita	N	[m <sup>2</sup> /s]	4,808E-07	3,82E-07	4,31E-07
Charakteristický rozmer	Xk	[m]	0,091107786		
Objem priestoru medzi stenami	V	[m <sup>3</sup> ]	0,062887149		
Zmáčaná plocha stien	S	[m <sup>2</sup> ]	2,761		
Rýchlosť voľného prúdu	V	[m/s]	0,01586616		
Teplota voľného prúdu	T	[°C]	67,5		
Priemerná teplota povrchu steny	T avg	[°C]	142,638		
Maximálna teplota povrchu	T max	[°C]	1372		
Hodnoty pre teplotný rozdiel	-	-	MAX	PRIEMER	
Teplotný rozdiel	ΔT	[°C]	1304,5	75,138	-
Ge/Re2 pre priemer	Ri	-	148,458695	>>	1
Ge/Re2 pre max	Ri	-	2577,44906	>>	1

Pre prípad kedy bola uvažovaná maximálna teplota steny bol Rayleighovo číslo omnoho väčšie ako 1, podobne pre prípad priemernej teploty steny. A teda prestup tepla bude na strane vody bude riešený ako prípad voľnej konvekcie.

### 3.8 CFD simulácie voľnej konvekcie vody

#### 3.8.1 Geometria

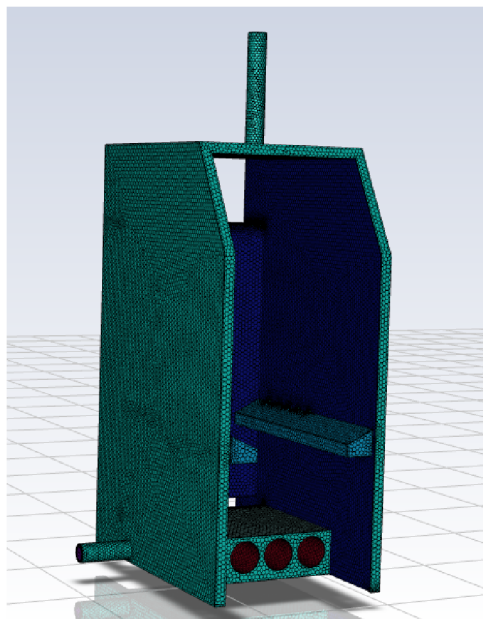
Prúdenie vody v kotly je zabezpečené nízko prietokovým čerpadlom, ako bolo spomínané. Čerpadlo dodáva vodu do spodnej časti kotla ako je ukázané na Obr.23, kde je vstup vody znázornený modrými šípkami. Voda je potom ohrievaná cez steny kotla. Ohrev vody spôsobí rozdiel v hustotách vody na rôznych teplotných úrovniach, čoho dôsledkom vzniká vztlaková sila a nastáva prirodzený pohyb vody smerom nahor k výstupu vody. Výstup z kotla je znázornený červenými šípkami. Vody do kotla vstupuje o teplote 59 °C a vystupuje o teplote 76 °C.



Obr. 23 Geometria medzistenového priestoru kotla

### 3.8.2 Výpočtová sieť

Minimálna veľkosť buniek v povrchovej sieti bola stanovená na 1,28 mm a maximálna veľkosť bola nastavená na 10 mm. Povrchová sieť bola potom vylepšená za použitia kritéria face quality limit, ktorý bol nastavený na 0,5. Objemová sieť pozostáva z polyhedrických buniek, pričom ich maximálna veľkosť bola nastavená na 12 mm a tempo rastu buniek bolo ponechané na prednastavenej hodnote 1,2. Ďalej boli vytvorené prizmatické vrstvy v oblasti stien modelu za použitia funkcie smooth transition, kde počet vrstiev bol nastavený hodnotu štyri a ostatné parametre boli ponechané ako prednastavené. Výpočtová sieť je zobrazená na Obr.24, s celkovým počtom buniek 425285, s minimálnou ortogonálnou kvalitou 0,5 a priemernou ortogonálnou kvalitou 0,92, pričom iba v 0,06 % všetkých buniek sa ortogonálna kvalita pohybovala medzi 0,5 a 0,55.



Obr. 24 Výpočtová sieť medzistenového priestoru kotla

### 3.8.3 Model turbulencie

Ako model turbulencie bol použitý model realizable k-epsilon s funkciou enhanced wall treatment.

### 3.8.4 Materiály

V záložke materiálov boli vybrané materiál voda z databázy fluentu pre fluid a oceľ pre steny modelu s virtuálnou hrúbkou 5 mm. Pri simulovaní voľnej konvekcie vo vode je dôležité, aby sa hustota vody menila s teplotou. Toho je dosiahnuté vďaka bousineq modelu pre výpočet hustoty, kde hustota vody je zadaná ako funkcia teploty a koeficientu teplotnej rozťažnosti  $\beta$ . Tento model uvažuje, že ak sú teplotné zmeny malé, tak zmeny v hustote média budú lineárne. Hustota je počítaná ako:

$$\rho = \rho_0 [1 - \beta (T - T_0)] \quad (3.24)$$

$\rho$ -hustota [ $\text{kg/m}^3$ ]

$\beta$  – koeficient teplotnej rozťažnosti [ $\text{K}^{-1}$ ]

T – teplota [K]

$T_0$  – referenčná teplota [K]

$\rho_0$  – referenčná hustota [ $\text{kg/m}^3$ ]

### 3.8.5 Okrajové podmienky

#### Inlet

Okrajová podmienka inlet je zadaná ako hmotnostný tok o hodnote 0,386 kg/s, čo odpovedá prietoku 1,39  $\text{m}^3/\text{h}$ , rovnako ako pri spaľovacích skúškach kotla v kapitole 2.1. Voda vstupuje do kotla o teplote 59 °C o tlakovej úrovni 0.9 bar.

#### Outlet

Okrajová podmienka typu outlet je zadaná ako pressure outlet.

#### Steny

Z meraní nachádzajúcich sa v kapitole 2.1 vyplýva, že predaný tepelný výkon do vody vo vybranom časovom úseku bol 23,15 kW. Toto v simulácii zohľadnené pomocou okrajovej podmienky stien typu tepelného toku, pričom vstupným parametrom je hodnota 8383,36  $\text{W/m}^2$ . Hodnota je výsledkom podielu predaného výkonu 23,15 kW a celkovej plochy vodou chladených stien. Z bilančného hľadiska je hodnota 8283,36  $\text{W/m}^2$  správna, avšak je to hodnota priemerná, a tak nerešpektuje lokálne vyššie či nižšie tepelné zaťaženie jednotlivých stien. Jedná sa iba o odhad pomocou priemernej hodnoty a výsledkom bude taktiež odhad pre hodnotu koeficientu prestupu tepla.

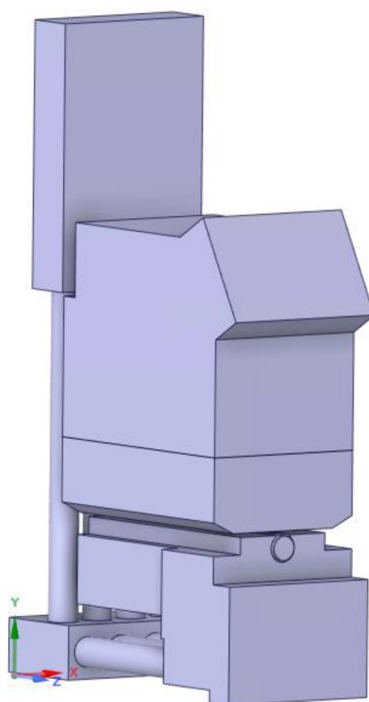
### 3.8.6 Výsledky

Výpočet bol ukončený pred dosiahnutím požadovaného rezidua kontinuity o hodnote 10-3. Výsledné reziduum kontinuity sa pohybovalo v okolí 7e-3. Sledované hodnoty teploty a rýchlosti na výstupe vody, ako aj hodnoty rýchlosti vo vytvorených kontrolných bodoch boli stabilné. Za pomoci povrchových integrálov jednotlivých stien, boli po ukončení výpočtu, zistené hodnoty koeficientov prestupu tepla. Priemerná výška koeficientu prestupu tepla bola 130  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$ . Táto hodnota bude nastavená, ako východzia pri zadávaní okrajových podmienok vodou chladených stien.

## 4. CFD Model spaľovania v kotli

### 4.1 Geometria kotla

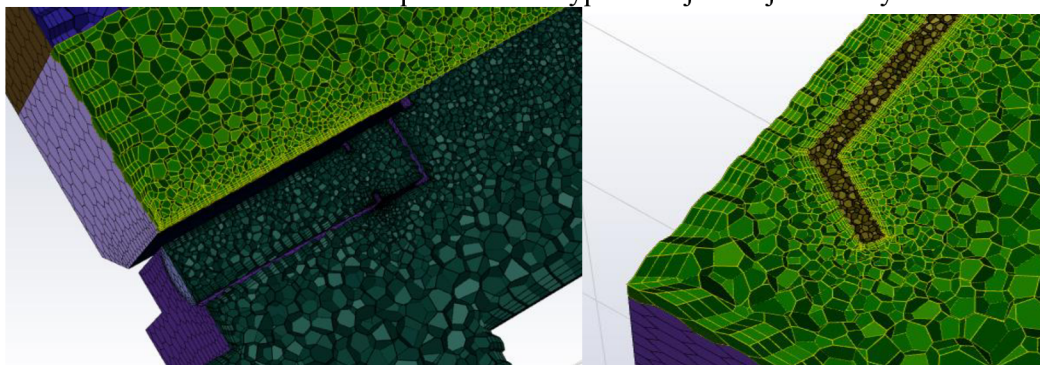
Geometria výpočtového modelu je zjednodušená v porovnaní so skutočným kotlom. Cieľom tohto zjednodušenia je vytvoriť funkčný model toku spalín, ktorý zachytáva všetky podstatné fyzikálne faktory ovplyvňujúce vlastnosti a tvar toku média v priestore kotla, pričom zároveň berie do úvahy náročnosť a realizovateľnosť numerických simulácií. Proces tvorby výpočtovej geometrie si preto vyžaduje hľadanie rovnováhy medzi presnosťou a časovou náročnosťou výpočtu. Kvalita vytvorenej geometrie ovplyvňuje všetky ďalšie kroky v procese výpočtu, od tvorby siete cez nastavenie okrajových podmienok, až po voľbu vhodnej výpočtovej metódy. Model kotla určený pre simulácie toku v programovom balíku Ansys Fluent [37], bol vytvorený pomocou softvéru Solidworks [41], kde bol vytvorený kompletný model kotla. Kritickým bodom celej geometrie kotla je priestor medzi stenami kotla, kde prebieha spaľovací proces a následné prúdenie teplých spalín. Vytvorený model geometrie kotla bol následne upravený vid' Obr.25. V kroku úpravy boli odstránené prebytočné konštrukčné prvky kotla, ktoré by zanedbateľne ovplyvňovali výsledok simulácie a navyše by ich ponechanie zbytočne navýšilo počet buniek výpočtovej siete. Po odstránení zmienovaných prvkov bola využitá funkcia na výber vnútorného objemu, obmedzeného príslušnými hranami a plochami vytvoreného modelu kotla. Následne boli pomenované plochy reprezentujúce steny kotla, vstup vzduchu, výstup spalín a kontrolné plochy. Detailné nastavenie týchto plôch bude riešené v časti o okrajových podmienkach (kap. 4.4).



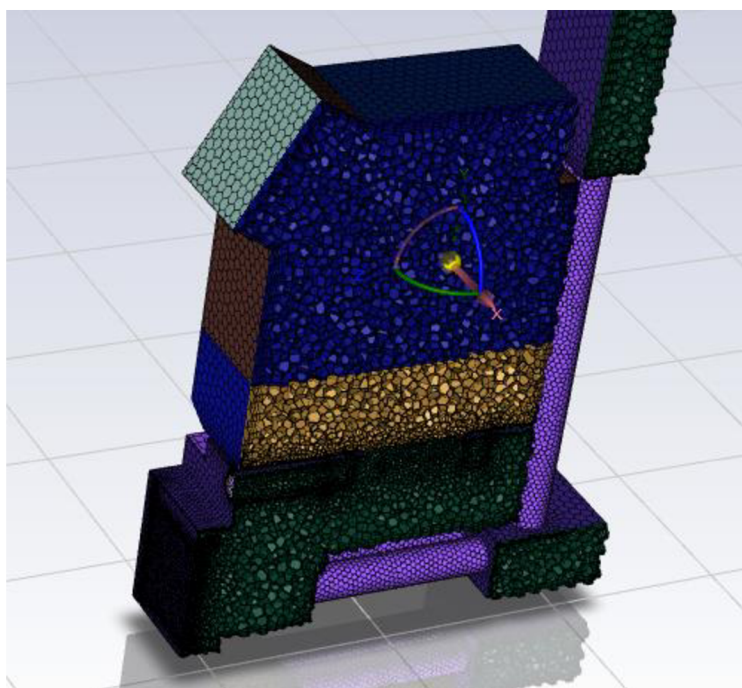
Obr. 25 Upravená geometria splynovacieho kotla

## 4.2 Výpočtová sieť

Tvorba výpočtovej siete označuje časť procesu pri ktorej sa tvorí sieť elementov, na ktorých bude prebiehať výpočet, pričom ich veľkosť a tvar má vplyv na presnosť ako aj časovú náročnosť výsledkov. Po úprave geometrie podľa požiadaviek zmenených v predchádzajúcej podkapitole 3.1 sa dostávame ku tvorbe výpočtovej siete. Tento krok prebiehal za pomoci Fluent meshingu od firmy Ansys. Rozmery domény modelu kotla sú 360 mm v šírke, 813 v dĺžke, 1395 mm vo výške aj s predĺženým odtáhom spalín na výstupe s kotla. Vygenerovaná povrchová a objemová sieť sa nachádza na obrázku Obr.27. Minimálna veľkosť bunky povrchovej siete bola nastavená na hodnotu 1.5 mm a maximálna hodnota bola nastavená na 20 mm. Objemová sieť je tvorená bunkami typu polyhedra ich maximálna veľkosť bola nastavená na 20 mm. Zvlášť bola venovaná pozornosť miestam respektíve bunkám v blízkosti stien. Je tomu tak aby boli zachytené deje prebiehajúce v medznej vrstve prúdenia. Tohto bolo dosiahnuté za pomoci funkcie smooth transition, kde parameter bol špecifikovaný celkový počet vrstiev na hodnotu 3, to znamená, že na stenách tohto modelu sa navýši počet buniek so špecifikovaným rastom bunky jednej oproti druhej smerom do vnútra prúdu. Táto skutočnosť je pozorovateľná na Obr.26. Prehľad parametrov výpočtovej siete je zhrnutý v tabuľke Tab.19.



Obr. 26 Výpočtová sieť v blízkosti stien



Obr. 27 Vygenerovaná sieť

Tab.19 Parametre výpočtovej siete

Parameter	Hodnota
Údaje objemovej siete	
Počet buniek siete	780619
Minimálna ortogonálna kvalita siete	0,5
Percento buniek s ortogonálnou kvalitou medzi 0,5 a 0,55	0,072
Priemerná ortogonálna kvalita siete	0,925
Maximalna hodnota aspect ratio	29,48
Údaje povrchovej siete	
Maximálna šikomnosť povrchovej siete	0,5437
Maximalna hodnota aspect ratio	24,03

## 4.3 Výber a nastavenie fyzikálnych modelov

### 4.3.1 Materiály

Fluent obsahuje databázu pre materiály, kde sa nachádzajú materiály typu solid, fluid, mixture a ich termodynamické vlastnosti. Steny kotla sú vyrobené z ocele, čomu v databáze Fluentu odpovedá materiál (steel, typu solid). V reálnom kotli sú v spaľovacej komore kotla uložené šamotové tvárnice, ktoré chránia steny kotla pred tepelným poškodením, šamotový materiál sa vyznačuje nízkou tepelnou vodivosťou a vysokou tepelnou kapacitou. Materiál pre šamotové tvárnice bola využitá možnosť vytvorenia vlastného materiálu vo fluente tiež typu (solid), pričom potrebné fyzikálne vlastnosti boli prevzaté zo zdroja. [48] Zhrnutie vlastností použitých materiálov typu solid sa nachádza v Tab.20.

Tab.20 Fyzikálne vlastnosti ocele a šamotu

Parameter	Jednotka	Oceľ	Šamot
Hustota	kg/m <sup>3</sup>	8030	1362
Merná tepelná kapacita	J/(kg K)	502,48	750
Tepelná vodivosť	W/(m K)	16,27	1
Vnútoraná emisivita	-	0,85	0,8

Vo všetkých doménach typu fluid vyskytujúcich sa v modeli bol zadaný materiál typu mixture. Zmes obsahuje sedem zložiek: metán, dusík, oxid uhličitý, oxid uhoľnatý, vodík, vodu, kyslík. Vlastnosti týchto zložiek sú brané s fluentovej databázy. Treba však pripomenúť, že sa jedná o látky v plynom skupenstve a ich termodynamické vlastnosti ukazujú veľkú premenlivosť v závislosti na podmienkach, v ktorých sa nachádzajú. Teplota sa v modeli vyskytuje vo veľkom spektre a fyzikálne vlastnosti plynov sú typicky značne závislé na teplote, preto ich vlastnosti nie je možné zadané ako konštanty, pretože by to viedlo k menej presnému riešeniu. Pre látky boli vybrané tepelné závislosti vzhľadom na teplotu pre ich hustotu a mernú tepelnú kapacitu. Ďalej je podstatné vybrať spôsob, ktorým sa budú počítať spomenuté vlastnosti pre zmes plynov ako takú. Prúdenie spalín je považované za nestlačiteľné. (upri prúdení plynu s Machovým číslom  $M < 0,1$ , je možné efekt stlačiteľnosti plynu zanedbať) [49].



Rovnica (1.33) uvádza vzťah pre výpočet hustoty  $\rho$  nestlačiteľného ideálneho plynu:

$$\rho = \frac{\rho_{OP}}{\frac{R}{M_w} \cdot T} \quad (4.1)$$

$\rho_{OP}$ - operačný tlak kotla

$R$ - plynová konštanta

$M_w$ - molárna hmotnosť zmesi plynov

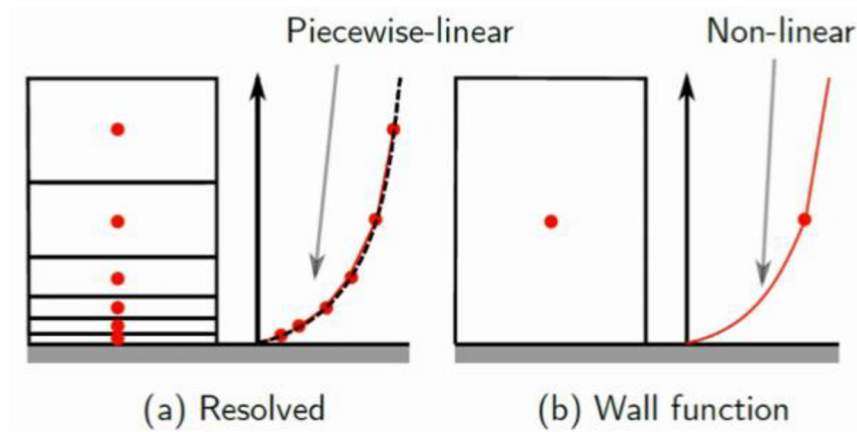
$T$ - termodynamická teplota spalín

Metóda mixing law použitá pre vyjadrenie špecifického tepla ( $c_p$ ) spalín zmesi spočíta výslednú hodnotu vlastnosti zmesi plynov, ako súčet molárnych zložiek od jednotlivých látok zmesi. Kde jednotlivý príspevok je daný objemovým zlomkom a špecifickým teplom danej látky pri danej teplote.

### 4.3.2 Model Turbulencie

V simuláciách je turbulenciu používaný Realizable k- $\epsilon$  model s funkciou enhanced wall treatment. Tento model je založený na dvoj rovnicovom popise turbulencie, kde sa sleduje turbulentná kinetická energia ( $k$ ) a jej disipačná rýchlosť ( $\epsilon$ ). Model k- $\epsilon$  je považovaný za robustný a efektívny pre rôzne typy turbulentných prúdení. Je široko používaný v priemysle. Je tomu tak aj pri riešení tepelných spaľovacích zariadení, ako je uvedené v [42][43][44]. Ešte častejšie sa v publikáciách vyskytuje modifikácia modelu Realizable k- $\epsilon$ . Príkladom toho sú práce [46][44][45]. Blížšie informácia ku modelu sú uvedené v zbierke [47].

Ako parameter pre vyhodnocovanie jemnosti buniek siete v blízkosti steny slúži bezrozmerný koeficient  $y^+$ . Koeficient  $y^+$  je bezrozmerná lokálna normálová vzdialenosť od povrchu steny modelu do stredu prvej buky ku nej priláhej. Jemnosť siete sa vyznačuje tým, či je rozlíšená viskózná podvrstva prúdenia, čomu odpovedá hodnota  $y^+$ . Funkcia enhanced wall treatment kombinuje výhody dostatočne jemnej siete, kde hodnota  $y^+$  je dostatočne nízka na zachytenie vývoju profilu prúdenia pri stene, ako aj výhody wall function, použiteľ v opačnom prípade pre nedostatočné  $y^+$ , ukážka fungovania funkcie enhanced wall treatment je na Obr.28. V miestach pri stene, kde sa nachádza dostatočne jemná mesh na vývoj profilu prúdenia bude použité lineárne riešenie a tam kde program uzná, že je sieť nedostatočná bude použité nelineárne logaritmicke riešenie ako ilustruje nasledujúci obrázok. Model realizable k s funkciou enhanced wall treatment je odporúčané používať v prípadoch kedy model pracuje s hodnotami  $y^+$  plus blízkym hodnote 1. V modeli je priemerná hodnota  $y^+$  plus 1,006 čo spĺňa odporúčanie pre optimálne pracovanie.

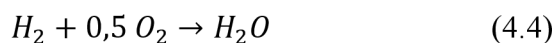
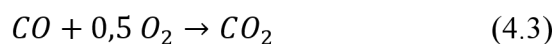
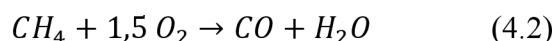


Obr. 28 Znáznornenie funkcie enhanced wall treatment [50]

### 4.3.3 Model spal'ovania

Ako model spalovania bol použitý eddy dissipation model (EDM). Model Eddy Dissipation (EDM) bol predstavený Magnussenom a Hjertagerom. Predpokladá, že palivo a oxidátor sú prenášané samostatnými vírmi v difúzných plameňoch. Ďalej sa predpokladá, že chemické reakcie prebiehajú rýchlo, takže palivo a oxidátor zareagujú hneď, ako sa premiešajú na molekulárnej úrovni. V modeli EDM je rýchlosť, ktorou reakcie prebiehajú, závislá od rýchlosti, akou sa premiešavajú turbulentné víry nesúce palivo a oxidátor. Model sa niekedy nazýva "mixed-is-burned", čím sa zdôrazňuje myšlienka, že keď sa palivo a oxidátor považujú za zmiešané, okamžite horia tzv. rýchla chémia. Model EDM býva typický užívaný pre maximálne dve globálne chemické reakcie.

V tejto simulácii je model rozšírený na sadu troch reakcií bez zohľadnenia kinetiky chemických reakcií. Rýchlosť chemických reakcií je riadená bezrozmernými parametrami A a B. Hodnota parametru A bola oproti štandardnej hodnote 4 znížená na hodnotu 0,6 na základe príkladu [51], Hodnota parametru B bola ponechaná na prednastavenej hodnote 0,5. Uvažované globálne objemové chemické reakcie súnasledovné:



Viac krát bol skúšaný aj model spalovania EDC. Model EDC oproti modelu EDM uvažuje kinetiku chemických reakcií. Kinetika reakcií je v modeli zohľadnená Arheniovým koeficientom, aktivačnou energiou a teplotným koeficientom pre danú reakciu. Model EDC predpokladá, že reakcia sa vyskytuje v malých turbulentných štruktúrach, tzv. fine eddies. Pri implementácii modelu EDC je odporúčané vychádzať z výsledkov nadobudnutých za použitia jednoduchšieho modelu EDM. Úspešnej implementácie však nebolo dosiahnuté. Plameň po spustení modelu EDC vyhasínal, k zapáleniu nedošlo ani po inicializácii, kde boli vytvorené bunkové registre v oblasti trysiek ako aj v spaľovacej komore kotla, v ktorých bola nastavená hodnota teploty 2000 °C a špecifikované hodnoty koncentrácií reaktantov, a produktov o hodnote 0,05. Toto môže byť spôsobené viacerými faktormi ako napríklad jemnosť výpočtovej siete, alebo absencia zdroja turbulencie v doméne zásobníka.

#### 4.3.4 Model Transportu zložiek spaľovania

Horľavá zmes plynov predstavujúca drevoplyn je v modeli definovaná ako ideálna viaczložková zmes piatich plynov – vodík ( $H_2$ ) dusík ( $N_2$ ) metán ( $CH_4$ ) oxid uhličitý ( $CO_2$ ) a oxid uhoľnatý ( $CO$ ). Na prenos častíc jednotlivých zložiek zmesi slúži model Species transport. Prenos častíc je počítaný pre materiál typu mixture z kap.4.3.1. ako tzv. okrajová zložka bol vybraný dusík. Je to zložka, s ktorou rovnice modelu species transport nebudú počítať, a všetky hodnoty s ňou súvisiace sa získajú ako rozdiel hodnoty celej zmesi a hodnôt ostatných zložiek.

#### 4.3.5 Model Radiácie

ANSYS Fluent poskytuje rôzne možnosti modelovania radiačných javov, ktoré umožňujú simulovať rôzne aspekty spaľovania a výmenu tepla medzi povrchmi vrátane účinkov participujúceho média. Pre rôzne typy médií a optických podmienok sú k dispozícii rôzne modely, ktoré sa môžu použiť na simuláciu účinkov radiácie. Model Rosseland sa často využíva na modelovanie radiačných javov v opticky hrubých médiách, kde je dôležitý prenos tepla. Na druhej strane model Discrete Ordinates (DO) sa používa pre širšie spektrum optických šírok. Model Surface-to-surface (S2S) je vhodný pre modelovanie prenosu tepla v uzavretých priestoroch, kde nie je prítomné médium. Tento model je zameraný na simuláciu tepelného prenosu medzi povrchmi. V kontexte uvedenej práce bol model Discrete Ordinates (DO) vybratý na základe jeho schopnosti modelovať široké spektrum optických podmienok a umožniť detailnejšiu simuláciu radiačných javov v kotli.

Tento model je veľmi dôležitý ak sa výpočet pohybuje v prostredí vysokých teplôt, nakoľko sa opiera o a Stefan-Boltzmannov zákon, popísaný rovnicou (1.34) kde termodynamická teplota sa vyskytuje so štvrtou mocninou.

$$E_0 = \sigma \cdot T^4 \quad (4.5)$$

$E_0$  -žiarivosť čierneho telesa ( $W/m^2$ )

T – teplota povrchu (K)

$\sigma$  – Stefan-Boltzmannova konštanta ( $W/(m^2K^4)$ )

Tento model rieši radiačnú zložku prestupu tepla. Model (DO) rieši distribúciu intenzity radiácie v jednotlivých bodoch domény je popísaný diferenciálnou rovnicou, ktorá je potom numericky riešená. Toto špecifikuje smer žiarenia v rôznych smeroch podľa diskretizácie priestorového uhlu. Hodnoty uhlovej diskretizácie boli ponechané na predvolených hodnotách. V predvolenom nastavení je počet divízií Theta a počet divízií Phi nastavený na 2. Predvolená pixelácia pre Theta a Phi je 1. Oceľ a šamot, ktoré tvoria steny kotla sa považujú za nepriehľadné materiály, ktorých charakteristickým znakom je, že neprepúšťajú tepelné žiarenie. Dopadajúce tepelné žiarenie na stenu kotla sa z časti absorbuje a zvyšok sa odrazí. Model DO predpokladá že absorbovaná zložka je priamo úmerná emisivite daného materiálu. Tento model je výpočtovo časovo náročný a preto pri práci s ním je výhodné stanoviť iteračný interval po ktorom sa prenos tepla pomocou radiácie spočíta, na čo najmenej iterácií, tak aby to nemalo dopad na konvergenciu riešenia.

## 4.4 Okrajové podmienky

Okrajové podmienky v Fluente sú aplikované na hraniciach výpočtovej oblasti v simulácii. Tieto podmienky definujú správanie sa toku tekutiny alebo iných fyzikálnych veličín na hraniciach simulácie. Fluent poskytuje rôzne možnosti okrajových podmienok. Použitým typom podmienok a ich riadiacim parametrom sú venované nasledujúce podkapitoly.

### 4.4.1 Okrajová podmienka Inlet

V tomto modeli je podmienka inlet zadaná pomocou rýchlosti. Podmienka predstavuje vstup okolitého vzduchu do kotla za pomoci ventilátoru. Uvažuje sa, že vzduch stupuje do kotla o teplote 25 °C. Zloženie spalovacieho vzduchu v simuláciách je zobrazené v tabuľke Tab.21

Tab.21 Hmotnostné zloženie vzduchu na vstupe do kotla

Plynná zložka	Označenie	jednotka	hodnota
Dusík	N <sub>2</sub>	[hmot%]	72,15
Kyslík	O <sub>2</sub>	[hmot%]	23,05
Voda	H <sub>2</sub> O	[hmot%]	0,52
Oxid uhličitý	CO <sub>2</sub>	[hmot%]	4,28
Spolu	SUMA	[hmot%]	100

### 4.4.2 Okrajová podmienka Outlet

Táto podmienka predstavuje výstup spalín z modelu kotla. Spaliny opúšťajú kotol o podtlaku 21 Pa voči atmosférickému.

### 4.4.3 Objemová zóna, zdroj hmoty a energie

Objemové zóny tiež v tejto práci veľa krát referované ako objemové domény, či len domény, sú objemy pomenované pri príprave geometrie. Slúžia na zadefinovanie podmienok, aké budú v tomto objeme, to sa týka teploty, tlakovej straty pre napríklad poréznu prekážku, zdroju hmoty, či dodanie lokálneho tepelného výkonu. V doméne zásobníku je nastavený zdroj hmoty pre jednotlivé zložky predstavujúce zloženie horľavej zmesi drevoplynu, ako aj zdroj energie dodávanej doméne zásobníku, čo by malo mať za následok priblíženie sa reálnym podmienkam v zásobníku kotla pri jeho fungovaní.

Pomocou zdroja hmoty je v zásobníku paliva tvorená horľavá zmes plynov zastupujúca drevo po jeho splynení. Zdroj hmoty je definovaný jednotkou [kg·s·m<sup>-3</sup>]. Ide o zdroj hmoty látky, ktorá sa splyní za jednotku času v jednotkovom objeme, viz.jednotky. Zloženie nadefinovanej zmesi odpovedajúcej produktom splyňovania je uvedené v Tab.14, Táto zmes sa bude v celom objeme domény tvoriť za jednotku času. Zdroj energie posluži k zadaniu lokálneho výkonu v rozmere [W/m<sup>3</sup>], uvedený v Tab.15 spolu so zdrojmi hmoty, Zdroj energie sa využíva na privedenie tvoriacich sa látok v doméne zásobníku na teplotu, pri ktorej splyňovanie prebieha. Táto hodnota predstavuje teplo nutné pre ohrev zmesi, ktorá je v doméne vytvorená za jednu sekundu na 800 °C v prípade kedy by zásobník nebol chladený pomocou vodou chladených stien. V reálnom kotli bude teplota v zásobníku o mnoho nižšia na kolko splyňovanie v reálnom prípade prebieha aj za nižších teplot ako 800°C ako aj kvôli okolitým stenám, kde je výkon predávaný do vody.

#### 4.4.4 Okrajová podmienka vodou chladených stien

Vo výpočtovej modeli je výmena tepla medzi spalinami a stenami kotla chladenými vodou simulovaná za pomoci okrajových podmienok stien. Reálna stena je nahradená stenou s priradeného materiálu u špecifikovanej virtuálnej hrúbke. Model pre tieto vodou chladené steny využíva podmienku konvekcie. Takáto podmienka je úplne zadaná parametrami výberu materiálu teploty, voľného prúdu chladiaceho média, výber materiálu s definovaným súčiniteľom vedenia tepla a súčiniteľom prestupu tepla konvekciou medzi chladiacim médiom a stenou. Pre odhad súčiniteľu prestupu tepla bola zhotovená pomocná výpočtová simulácia opísaná v kapitole 3.8. Výsledkom simulácie bola priemerná hodnota súčiniteľu prestupu tepla pre steny o hodnote  $130 \text{ W/m}^2\text{K}^{-1}$ . Táto hodnota bola pre túto simuláciu navýšená na hodnotu  $180 \text{ W/m}^2\text{K}^{-1}$ , kedy bol dosiahnutý požadovaný výkon odovzdaný do stien kotla  $23,15 \text{ kW}$ . Virtuálna šírka ocelevej steny je  $0,005 \text{ m}$ , teplota voľného prúdu chladiaceho média je uvažovaná ako stredná teplota vody medzi vstupom a výstupom z kotla  $67.5 \text{ }^\circ\text{C}$ .

#### 4.4.5 Okrajová podmienka steny spaľovacej komory

V reálnom kotli sa v oblasti spaľovacej komory nachádza šamotové obloženie, ktoré chráni stenu kotla pred tepelným poškodením Obr.29. Táto skutočnosť je v modeli zohľadnená pomocou použitia okrajovej podmienky steny typu konvekcie s tým rozdielom, že stena je zložená zo šamotu a ocelevej steny kotla. Pre tieto dve vrstvy je zadefinovaná virtuálna šírka steny kotla  $0,005\text{m}$  ako aj šírka šamotovej výzdievky  $0,02 \text{ m}$ . Ostatné parametre sú rovnaké ako v prípade vodou chladených stien.



Obr. 29 Šamotové obloženie spaľovacej komory

#### 4.4.6 Okrajová podmienka steny coupled

Pomocou tejto podmienky je v modeli simulovaný odrazový plech dvierok typu solid, kde bude nastavená teplota na zadnej strane plechu, čo bude predstavovať chladenie TEG zostavy za pomoci kotlovej vody o teplote  $59,7 \text{ }^\circ\text{C}$ , pre získanie konkrétnej hodnoty tepelného toku touto stenou.

#### 4.4.7 Ostatné steny

Ostatné steny kotla sú považované za izolované, čiže cez nich neprechádza žiadny tepelný tok.

#### 4.4.8 Súhrn Okrajových podmienok

Pre prehľadnosť je súhrn okrajových podmienok zapísaný do Tab.22.

Tab.22 Súhrn okrajových podmienok

<b>Inlet</b>			
Rýchlosť na vstupe	v	[m/s]	5,21
<b>Zloženie vzduchu</b>			
Dusík	N <sub>2</sub>	[hmot %]	72,15
Kyslík	O <sub>2</sub>	[hmot %]	23,05
Voda	H <sub>2</sub> O	[hmot %]	0,52
Oxid uhličitý	CO <sub>2</sub>	[hmot %]	4,28
<b>Outlet</b>			
Pretlak voči operačným tlaku	p	[Pa]	-21
<b>Objemová zóna zásobníka</b>			
Metán	CH <sub>4</sub>	[kg·s <sup>-1</sup> m <sup>-3</sup> ]	0,0006976
Oxid uhličitý	CO <sub>2</sub>	[kg·s <sup>-1</sup> m <sup>-3</sup> ]	0,0008773
Oxid uhoľnatý	CO	[kg·s <sup>-1</sup> m <sup>-3</sup> ]	0,0146328
Vodík	H <sub>2</sub>	[kg·s <sup>-1</sup> m <sup>-3</sup> ]	0,0004181
Zdroj energie	P	[W/ m <sup>3</sup> ]	57380
<b>Steny</b>			
Koeficient prestupu tepla	α	[W·m <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> ]	180
Teplota voľného prúdu	T	[°C]	67,5
Vnutorná emisivita ocel	ε	[-]	0,85
Vnutorná emisivita šamot	ε	[-]	0,8
Hrúbka ocelevej steny	h	[m]	0,005
Hrúbka šamotovej výzdievky	h	[m]	0,02

#### 4.5 Nastavenia monitoringu konvergenencie

Konvergencia výpočtov bola posudzovaná na základe monitorov reziduí, ktoré boli ponechané na predvolenej hodnote 10<sup>-3</sup>, pre rovnice energie a radiácia bola hodnota nastavená na 10<sup>-6</sup>. Okrem reziduí boli vykresľované krivky pre teplotu spalín na výstupe, maximálnu teplotu v doméne a prvkové zasúpenia (O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub>) v spalínach na výstupe z kotla. Konvergencia bola posudzovaná aj na základe spomínaných kriviek, ktoré boli vykresľované v grafických oknách počas výpočtu. Aby bolo možné prehlásiť výpočet za skonvergovaný je nutné, aby sledované veličiny boli stabilizované na jednej hodnote za súčasného dosiahnutia nízkych hodnôt reziduí. Na záver boli vždy overené hmotnostné toky v doméne ako aj energetické toky v podobe odvedeného tepla do stien a energetických tokov na vstupe a výstupe kotla. Z počiatku reziduá jednotlivých rovníc sa pohybovali na relatívne vysokých hodnotách aj vďaka spätnému prúdeniu v oblasti výstupu spalín, tento problém bol vyriešený natiahnutím spalínového komína, čo vyriešilo problém so zavírením spalín na výstupe z kotla resp. Preventovalo spätné prúdenie. Rovnice použitých fyzikálnych modelov boli spúšťané v poradí hybnosť a turbulencia, potom rovnice transportu jednotlivých zložiek, a ako posledné rovnice prenosu energie a radiácie. Pri tejto stratégii výpočet relatívne dobre konvergoval. Pseudo relaxačné faktori boli ponechané na predvolených hodnotách, hodnoty relaxačných faktorov sú uvedené v Tab.23

Tab.23 Pseudo-relaxačné faktory

Relaxačné faktory	Hodnota
Tlak	0,7
Hustota	0,5
Objemové sily	1
Hybnosť	0,7
Turbulentná kinetická energia	0,8
Rýchlosť disipácie energie	0,8
Turbulentná viskozita	1
Zložky	1
Energia	1
Radiácia DO	1

#### 4.6 Nastavenia riešiča

V simuláciach bol použitý riešič SIMPLE. Diskretizačné schémy sú uvedené v tabuľke Tab.24.

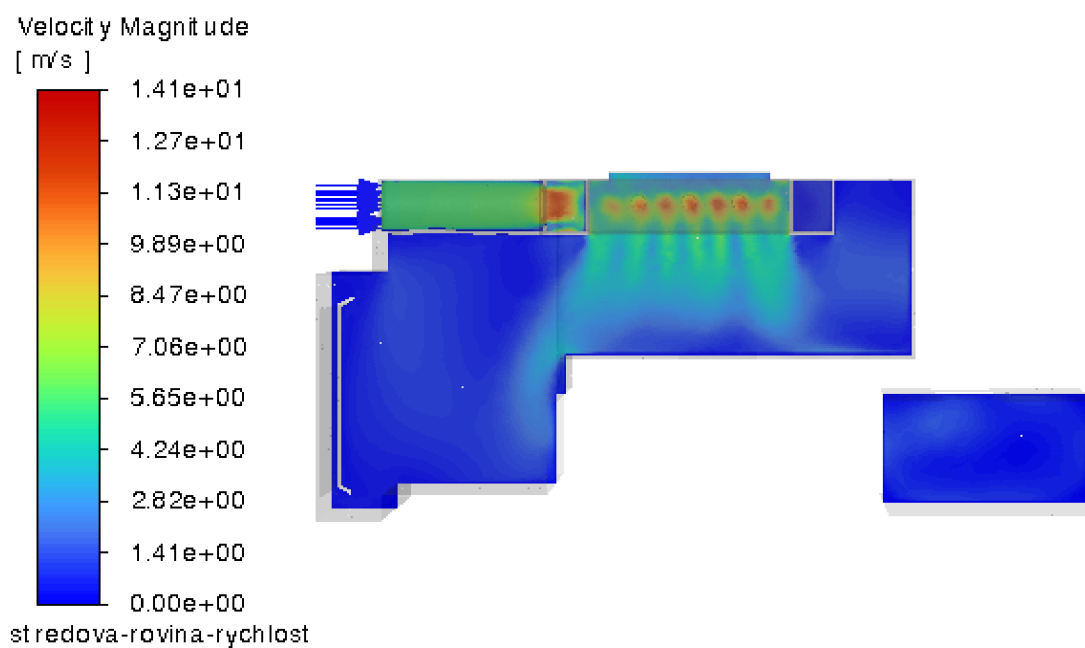
Tab.24 Diskretizačné schémy pre výpočet

Rovnica	Diskretizačné schéma
Gradient	Least Squares Cell Based
Tlak	Second Order
Hybnosť	Second Order Upwind
Turbulentná kinetická energia	Second Order Upwind
Rýchlosť disipácie energie	Second Order Upwind
Zložky zmesi	Second Order Upwind
Energia	Second Order Upwind
Radiácia	First Order Upwind

## 5. Výsledky simulácie

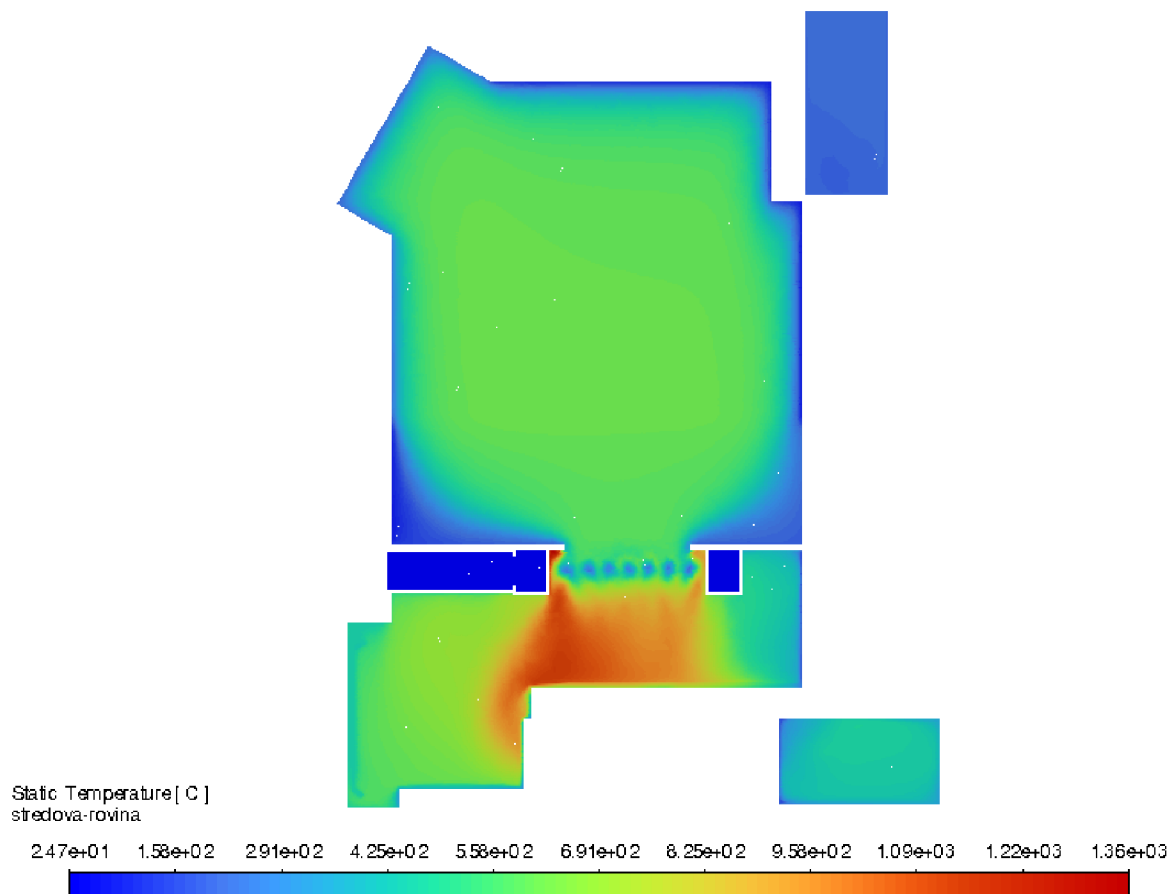
V tejto kapitole sú predložené výsledky matematických simulácií prevedených v prostredí Ansys Fluent na modeli splyňovacieho kotla. Najprv sú diskutované výsledky v porovnaní s nameranými hodnotami z experimentálnych meraní, ako je predaný výkon do vody, teplota spalín na výstupe z kotla, zloženie spalín na výstupe a bodové merania teplot v oblasti otočnej komory kotla z kapitoly 2. Po validácii modelu, je zapnutá okrajová podmienka typu coupled popísaná v kap. 4.4.6, potom sú diskutované hlavné výsledky tepelného toku stenou dvierok ako miesta pre integráciu zostavy TEG a dopad na výstupné parametre spalín z kotla v porovnaní s prvotnou simuláciou.

Všeobecnými výsledkami simulácií je rýchlostné a teplotné pole kotla. Diskutované budú najmä výsledky pre spaľovaciu oblasť kotla, kde sa predpokladala najvyššia teplota spalín a najlepšie podmienky na prestup tepla. Najvyššia teplota spalín aj najväčšia rýchlosť a turbulentné prúdenie je tesne pod spaľovacou tryskou kotla vid Obr.30, Obr.31. Avšak umiestniť zostavu TEG priamo do spaľovacej oblasti kotla by bolo problematické, bolo by nutné zasiahnuť do vodou chladeného plášťa kotla, čo by bolo konštrukčne veľmi obtiažne. Druhým najlepším miestom z hľadiska turbolencie horúcich spalín sa potvrdilo byť miesto obratovej komory nachádzajúcej sa pri predných dvierkach kotla. Detail oblasti je vidieť na Obr.32.

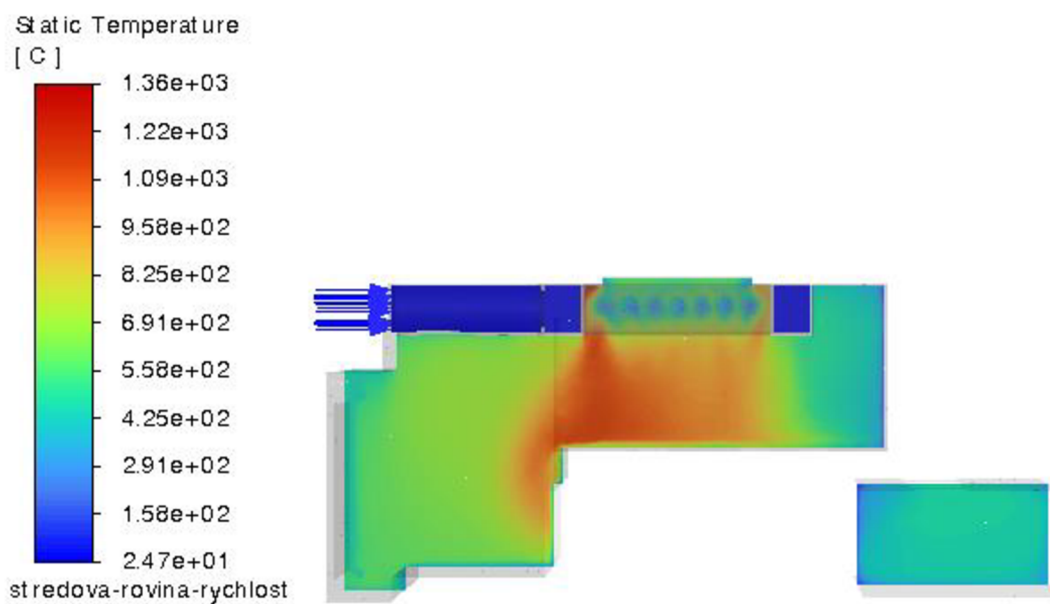


Obr. 30 Detail rýchlostného pola v spaľovacej komore



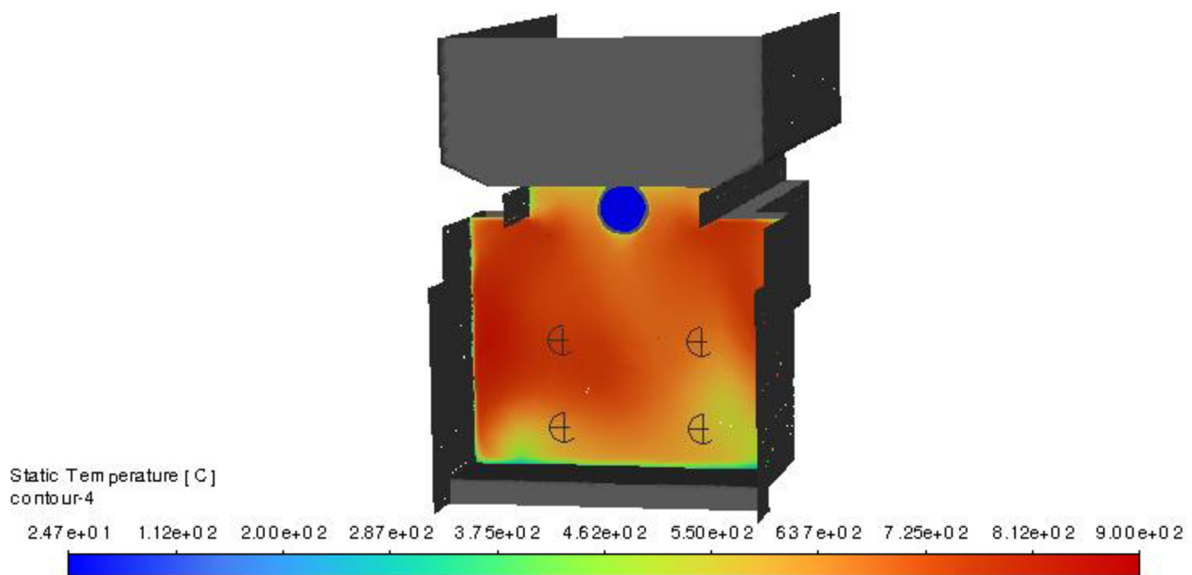


Obr. 31 Teplotné pole v stredovej rovine kotla

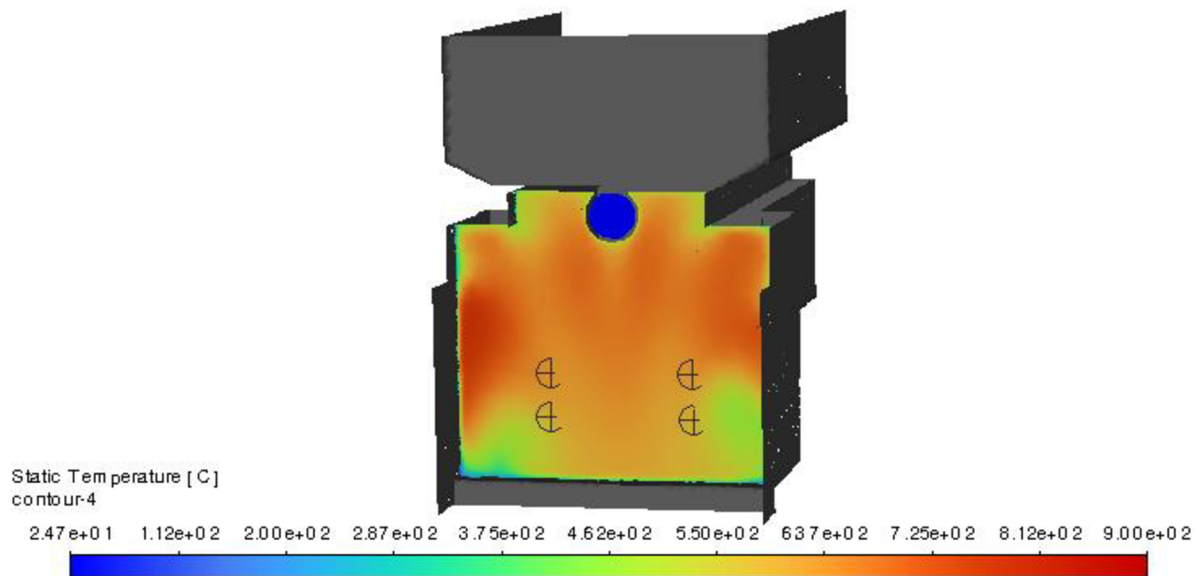


Obr. 32 Detail teplotného pola v spalovacej komore

V simulácií boli vytvorené kontrolné body pomenované ako CH1-CH9 podľa označenia TE meradiel použitých na meranie teplotného poľa v kap. 2.3. Zaznamenané hodnoty v spomínaných bodoch sú v Tab.25. Výsledné hodnoty boli dosiahnuté pomocou priemerovania hodnôt teplot získaných z najbližích okolných bodov, označovaným ako vertex average pre jednotlivé body meraní reprezentujúce CH1-CH9. Pre hodnoty článkov CH10-11, ktoré boli pri experimentálnom meraní kontaktom spojené s plochou odrazového plechu ich hodnota je spočítaná pomocou povrchového integrálu steny odrazového plechu typu surface average. Na Obr.33 je kontúra teplot rovinou prechádzajúcou bodmi meraní CH 1, CH4, CH6, CH9 . Táto rovina sa nachádza vo vzdialenosti 16 cm od odrazového plechu dverok. Podobne je tomu tak na Obr.34, ktorý zachytáva rovinu z článkami CH2, CH3, CH7, CH8 vo vzdialenosti 8 cm od odrazového plechu.



Obr. 33 Kontúra teploty v rovine článkov CH 1, CH4, CH6, CH9



Obr. 34 Kontúra teploty v rovine článkov CH2, CH3, CH7, CH8

Tab.25 Bodové merania v simulácii

<b>Označenie TE článku</b>	CH1	CH2	CH3	CH4	CH5
<b>Teplota v simulácii</b>	761,28	635,47	586,13	643,57	667,85
<b>Označenie TE článku</b>	CH6	CH7	CH8	CH9	CH10-11
<b>Teplota v simulácii</b>	674,84	626,82	581,37	592,38	437,64

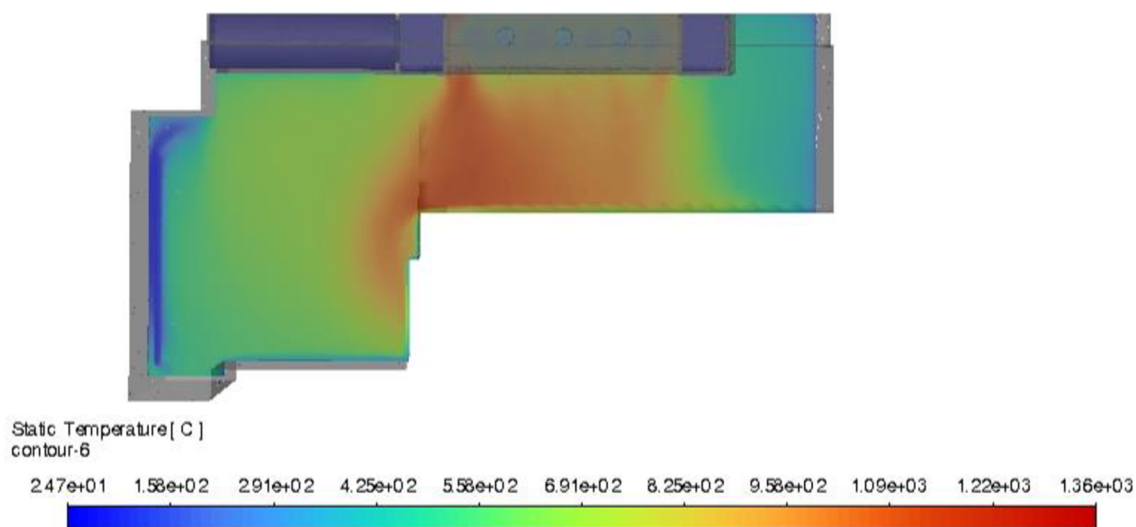
Ak hodnotami porovnáme s hodnotami nameranými počas časového úseku, ktorý simulácia vykazuje pomerné značné odchýlky. Toto je priamym dôsledkom použitia modelu spaľovania EDM. Ako bolo popísané model EDM počíta na základe princípu, čo je zmiešané to zhorí, a teda na malom úseku vzniká veľmi intenzívne horenie nad rámec reálneho kotla, čo spôsobuje vyššie predikované hodnoty teplôt v oblastiach blízkych spaľovacej komore. Zhrnutie hodnôt objemových podielov plynných zložiek na výstupe kotla v simulácii je uvedené v Tab.26

Tab.26 Percentuálne zastúpenie prvkov na výstupe z kotla v suchých spaliniach

Zložka	Jednotka	Hodnota
CO	[vol %]	2,90E-06
CO <sub>2</sub>	[vol %]	11,115
O <sub>2</sub>	[vol %]	9,379

Teplota spalín na výstupe dosahovala v simulácii dosahovala 209,16 °C, čo je 0,76 % menej ako bola priemerná teplota spalín v danom časovom úseku počas meraní z kapitoly 1.6. Zloženie spalín na výstupe z kotla taktiež zaznamenáva oproti meraniam minoritné odchýlky. Badateľné je to hlavne pri percentuálnom zastúpení oxidu uhoľnatého CO na výstupe kde bola nameraná hodnota 0,251 objemového %. Táto odchýlka je priamym dôsledkom zvoleného modelu spaľovania EDM. Touto skutočnosťou sú samozrejme ovplyvnené aj podiely CO<sub>2</sub>, ktoré sú v simulácii vyššie takmer o 3 % a podobne v prípade kyslíku O<sub>2</sub> v porovnaní z Tab.11. Odovzdaný tepelný výkon stenami je za koeficientov prestupu tepla 180 W·m<sup>-2</sup>K<sup>-1</sup> vodou chladených stien rovný hodnote 23208,7 W, čo predstavuje rozdiel oproti meraniu v danom časovom úseku o 0,25 %.

Po porovnaní nameraných parametrov kotla a simulácie bolo na zadnej strane odrazového plechu simulované chladenie zostavy vratnou vodou z teplovodného okruhu kotla. Zmenené teplotné pole v oblasti otočnej komory je vyobrazené na Obr.35.



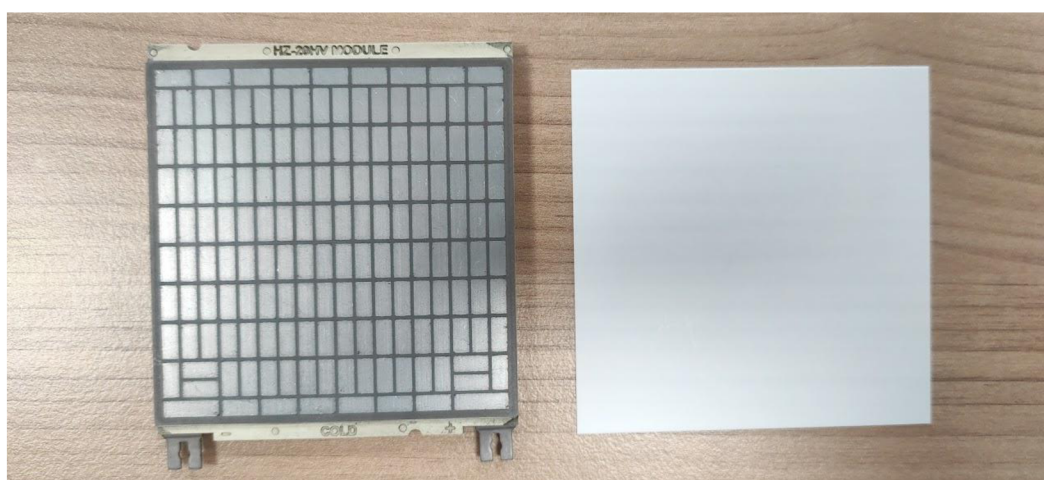
*Obr. 35 Kontúra teplôt stredovou rovinou pri simulácii chladenia steny dvierok*

Implementáciou chladenia došlo ku ochladeniu spalín na hodnotu  $205,6^{\circ}\text{C}$  čo je zníženie o  $3,56^{\circ}\text{C}$  oproti pôvodnej simulácii. Samozrejme by mohlo dôjsť aj k minoritnému ovplyvneniu hodnoty objemových podielov plynných zložiek na výstupe kotla, čo však model EDM nie je schopý zachytiť. Vysledný tepelný tok stenou dvierok vyššiel  $925\text{ W}$ , čo ak by bola uvažovaná konverzia tepelnej energie na elektrickú pre zariadenie TEG 5%, ako tomu bolo vo viacerých skúmaných prípadoch v prehľade prípadových štúdií v kap.1.4. Tak je možné generovať až  $46\text{ W}_{el}$  závisiac od konštrukčného prevedenia zostavy a schopnosti zaistenia teplotného rozdielu medzi teplou a studenou stranou TEG. Prevedenie Zostavy TEG je diskutované v nasledujúcej kapitole.

## 6. Návrh TEG zostavy

### 6.1 Výber TEG modulu

Na trhu v priebehu posledného roka došlo k výraznému zhoršeniu dostupnosti termoelektrických modulov vhodných na inštaláciu do kotla, s ohľadom na ich teplotné a mechanické parametre a požadované tepelné toky a spády. Na realizáciu TEG bol preto kompromisne vybraný termoelektrický modul HZ-20HV ukázaný na Obr.36 od výrobcu Hi-Z Technology, Inc. Nemá úplne optimálne parametre. Výkon jedného modulu je až 24,3 W, čo je však podmienené veľkým teplotným spádom na module a taktiež požiadavkou na nízku teplotu studeného konca TEG modulu. Pre účely pilotnej jednotky bol zvolený variant s inštaláciou dvoch modulov, maximálne dosiahnuteľný výkon TEG by bol na úrovni cca 40 W, čo by malo pokrývať el.nároky kotla.špecifikácie pre daný modul sú v Tab.27



Obr. 36 Termoelektrický modul HZ-20HV a izolačný wafer, pred ich inštaláciou

Tab.27 Parametre modulu HZ-20HV [34]

Parameter	Označenie	Jednotka	Hodnota
Teplota na teplej strane	$T_h$	°C	250
Teplota na studenej strane	$T_c$	°C	50
Napätie v otvorenom obvode	U	V	10,8
Napätie pri zhodnej záťaži	$U_m$	V	5,4
Vnútorňý odpor	$R_{in}$	$\Omega$	1,2
El. prúd pri zhodnej záťaži	I	A	4,5
Elektrický výkon modulu	P	W	24,3

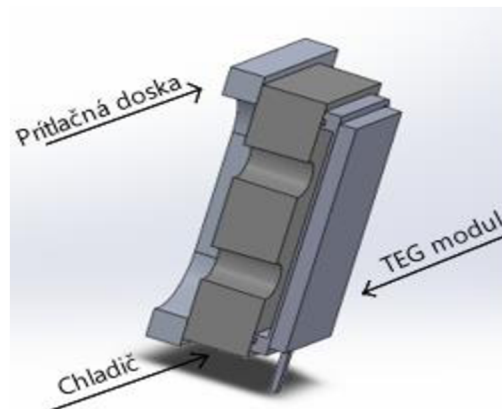
### 6.2 Konštrukčné riešenie upevnenia

Zostava Termoelektrického generátora je umiestnená do priestoru predných dvierok splyňovacieho kotla. Integrácia zostavy TEG si vyžaduje v tomto mieste minimálne zásahy do geometrie kotla, čo je veľkou výhodou. Z vonkajšej strany dvierok bola pripravená podporná konštrukcia na zostavenie TEG modulu. Celá zostava sa skladá z TEG, vodného chladiča, pripojovacej dosky pre prívod a odvod chladiacej kvapaliny a prítlačnej dosky, ktorá slúži na celkové upevnenie jednotlivých komponentov.

Veľmi dôležitým aspektom je perfektné dodržanie rovinatosti plôch medzi spalinovým výmenníkom TEG a vodným výmenníkom tak, aby bol zaistený maximálny tepelný tok cez TEG modul. Jednotlivé komponenty v nasledujúcich podkapitolách 6.2.1,6.2.2.

### 6.2.1 Chladienie

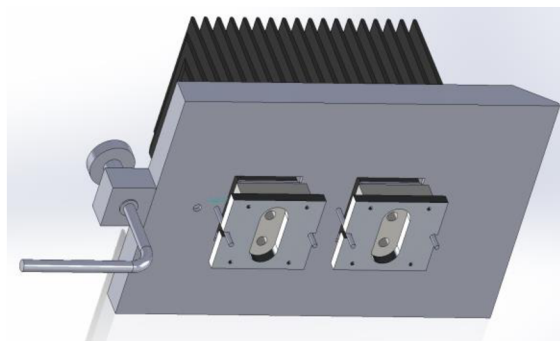
Odvod tepla z TEG je zaistený vodným výmenníkom tvoreným nerezovým plechom ostrekoványm vratnou vodou z teplovodného okruhu. Krycí plech chladiacej nerezovej základne je vyrobený z kopolyméru Ertacetal a opatrený fittingami. Výmenník pozostáva z tenkej dosky s dierami, ktorá je stenou spojená s termoelektrickým modulom. Chladič je ku modulu pripevnený za pomoci prítlačnej dosky. Medzi chladičom a prítlačnou doskou sa nachádza tesnenie, ktoré zabráňuje úniku chladiaceho média. Prierez zostavou chladenia aj popis je na Obr.37.



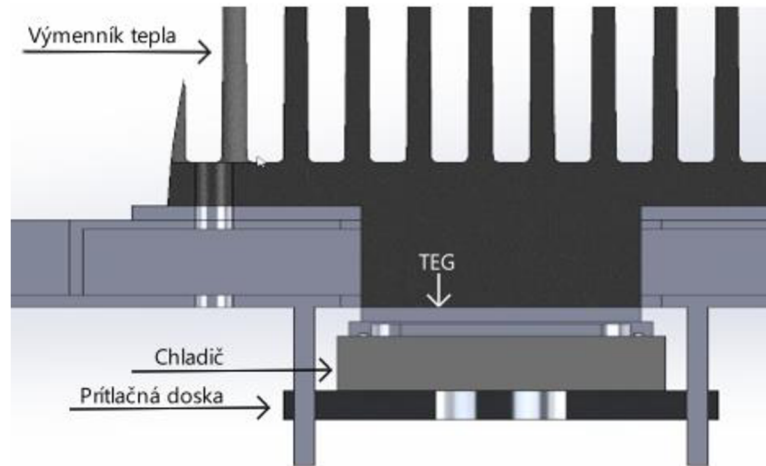
Obr. 37 Prierez zostavou chladenia TEM

### 6.2.2 Výmenník tepla

Pretože teplotné pole otočnej komory kotla v oblasti dvierok je značne ovplyvnené prítomnosťou trubkového výmenníku tepla konvekčnej sekcie kotla. výmenník tepla, nachádza sa v oblasti otočnej komory kotla. Jeho úlohou je zuniformniť a zintenzívniť prestup tepla smerom do TEG. Rebrovaný výmenník je rebriami umiestnený do obratovej komory spalín, resp. do priestoru medzi spaľovacou komorou a konvekčou sekciou kotla. Výmeník je vyrobený z liatiny s lupienkovým grafitom pre jej teplovodné vlastnosti. Vizualizácia rebrovaného výmenníku tepla je na Obr.38. Popis celej zostavy sa nachádza na Obr.39.



Obr. 38 Kompletná zostava TEG



Obr. 39 Rez zostavou TEG

Výrobcovia a predajcovia termoelektrických modulov poskytujú v katalógových listoch modulov iba obmedzené množstvo informácií. Súčasne, pre potreby výkonových simulácií TEG a experimenty by bolo vhodné poznať detailnejšie parametre použitých termoelektrických modulov - Seebeckov koeficient, elektrický odpor, tepelnú vodivosť a koeficient termoelektrickej účinnosti ako funkcie teploty a poznať aj reálne výkonové parametre modulu pri definovaných teplotách. V rámci projektu prebieha na VUT výskum a testovanie dlhodobej životnosti zvolených generátorov, ktoré sa zameriava nielen na testovanie ich životnosti vplyvom mechanického a teplotného zaťaženia, ale aj na detailné stanovenie ich vlastností. Aktivity sú a budú realizované v dvoch smeroch. Jednak bude využité experimentálne zázemie riešiteľov zapojených do projektu, ďalej sú realizované počítačové simulácie v programe ANSYS.

V rámci predchádzajúcich výskumov a projektov bolo na VUT v Brne navrhnuté a čiastočne realizované skúšobné zariadenie, ktoré využíva metódy steady-state a je na tieto účely určené. Zariadenie môže byť súčasne modifikované na merania spojené s posudzovaním životnosti a spoľahlivosti termoelektrických modulov. V rámci realizácie roku 2022 bolo zariadenie konštrukčne upravené tak, aby oproti svojmu pôvodnému prevedeniu mohlo byť pri riešení projektu využité na skúšky termoelektrických modulov a súčasne ich dlhodobé testovanie z pohľadu životnosti a spoľahlivosti.

## Záver

Úvodná časť tejto práce sa zaoberá popisom jednotlivých javov TE premeny z dôrazom na generáciu elektrickej energie za pomoci Seebeckovho javu a materiálov používaných na tento účel. Teoretická časť taktiež vo všeobecnosti popisuje princíp funkcie splyňovacích kotlov a v neposlednom rade obsahuje rešerš prípadových štúdií, kde boli do spaľovacích zariadení integrované zostavy TEG ako možnosť využitia odpadového tepla a prispeli tak k zvýšeniu celkovej účinnosti daných zariadení. Hlavným problémom aplikácií TEG modulov je zaistenie požadovaného teplotného rozdielu na koncoch modulu a teda zaistenie dostatočného tepelného toku modulom.

Diplomová práca sa zaoberá tvorbou CFD modelu splyňovacieho kotla Ekoscroll o nominálnom výkone  $24\text{kW}_{\text{th}}$ , do ktorého by mala byť v rámci projektu medzi VUT a firmou Ekoscroll integrovaná zostava TEG. Cieľom projektu je zostrojenie pilotnej jednotky TEG pre tento model kotla, tak aby bola jednotka schopná pokryť elektrické výdaje celej zostavy kotla. V druhej kapitole práce sú merané jednotlivé parametre kotla, ako aj spotreba elektrickej energie zostavy kotla. Pri meraniach v experimentálnom prostredí bolo zistené že elektrický príkon kotla sa pohybuje medzi hodnotami 80-100 W počas jeho fungovania. Zostavenie TE zariadenia schopného generovať takéto výkony by bolo však technicky veľmi náročné. Preto boli podniknuté kroky na zníženie elektrického príkonu jednotlivých komponentov kotla menovito čerpadla a ventilátoru. Po implementácii navrhovaných opatrení je očakávaná elektrická spotreba kotla pri vhodnom zapojení vykurovacej sústavy na úrovni cca. 40 W. V prípade samotiažneho obehu vykurovacej sústavy pilotného kotla by boli dostačujúce už aj príkony na úrovni iba do cca. 15 W.

Na bližšie overenie teplotného pola kotla a jeho tepelných tokov vzhľadom na integráciu TEG zostavy bol zostrojený CFD model v rozhraní Ansys Fluent. Popis použitých fyzikálnych modelov a nastavení je uvedený v kapitole 4., pričom model sa opiera o hodnoty nadobudnuté počas meraní v kapitole 2., ako aj o dopočítané parametre ktoré neboli priamo merané z kapitoly 3. Model odhalil, že ak by na studenej strane zostavy bola dosiahnutá teplota  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  bol by dosiahnutý tepelný tok o hodnote 925 W. Pokiaľ by bola uvažovaná účinnosť TE premeny 5%, ako tomu bolo v rešerši prípadových štúdií, tak zostava TEG by teoreticky mala byť schopná generovať elektrický výkon o hodnote  $46\text{ W}_{\text{el}}$ , čo by naplnilo požiadavky elektrickej spotreby zostavy kotla.

Záverečná kapitola práce popisuje návrh prototypu TEG zostavy určenej na integráciu v oblasti dvierok kotla. Zostava sa skladá z dvoch TE modulov typu HZ-20HV od firmy Hi-Z, z chladiaceho zariadenia a rebrovaného výmenníku tepla. Tieto prvky zostavy majú za úlohu zabezpečenie dostatočného tepelného toku TE modulmi tak aby bol dosiahnutý požadovaný elektrický výkon. V rámci projektu boli taktiež testované vybrané TE moduly na experimentálnom zariadení so zameraním na ich životnosť a ich výkonnostné parametre.



## Zoznam použitej literatúry

- [1] ING. KAREL KABEŠ, 2021. Význam termoelektrických generátorů rychle roste - Časopis Elektro - Odborné časopisy. Odbornecasopisy.cz [online] [vid. 2024-04-30]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/vyznam-termoelektricky-generatoru-rychle-roste--9847>
- [2] ROWE, David Michael, 1994. CRC handbook of thermoelectrics. Boca Raton New York London [etc.]: CRC press. ISBN 978-0-8493-0146-9.
- [3] FAIRBANKS, J W, 2007. *Vehicular Thermoelectrics Applications Overview*. [online]. Dostupné z: [http://www1.eere.energy.gov/vehiclesandfuels/pdfs/deer\\_2007/session6/deer07\\_fairbanks.pdf](http://www1.eere.energy.gov/vehiclesandfuels/pdfs/deer_2007/session6/deer07_fairbanks.pdf)
- [4] Gerát, M. (2017). Vytápění rodinných domů tuhými palivy [Heating of Family Houses with Solid Fuels]: Bakalářská práce [Bachelor's thesis]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství [Brno University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering]. Vedoucí bakalářské práce: Ing. Marek Baláš, Ph.D.
- [5] LALONDE, Aaron D., Yanzhong PEI, Heng WANG a G. JEFFREY SNYDER, 2011. Lead telluride alloy thermoelectrics. *Materials Today* [online]. **14**(11), 526–532. ISSN 13697021. Dostupné z: doi:10.1016/S1369-7021(11)70278-4
- [6] KASAP, S., 2001. THERMOELECTRIC EFFECTS IN METALS: THERMOCOUPLES. In: [online]. [vid. 2024-05-01]. Dostupné z: <https://www.semanticscholar.org/paper/THERMOELECTRIC-EFFECTS-IN-METALS%3A-THERMOCOUPLES-Kasap/ea19e630ea14603ebd4979b5156fb48711f3baca>
- [7] ROWE, D.M. (Ed.). *Thermoelectrics Handbook: Macro to Nano* (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420038903> (2006)
- [8] Anon., [b.r.]. Basic Thermoelectric Principles. Thermoelectric [online] [vid. 2024-05-02]. Dostupné z: <https://thermal.ferrotec.com/technology/thermoelectric-reference-guide/thermalref02/>
- [9] Anon., 2011. Caltech Researchers Develop High-Performance Bulk Thermoelectrics. California Institute of Technology [online] [vid. 2024-05-01]. Dostupné z: <https://www.caltech.edu/about/news/caltech-researchers-develop-high-performance-bulk-thermoelectrics-1689>
- [10] Michalcová, L. (2014). Mikrokrystalické křemíkové tenké vrstvy pro fotovoltaické články III. generace [Microcrystalline Silicon Thin Films for Third Generation Photovoltaic Cells]: Diplomová práce [Master's thesis]. Plzeň: Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni. Vedoucí práce: Doc. RNDr. Pavol Šutta, Ph.D.
- [11] ZHANG, Chao, Yifan LUO, Jiaqiang XU a Marc DEBLIQUY, 2019. Room temperature conductive type metal oxide semiconductor gas sensors for NO<sub>2</sub> detection. *Sensors and Actuators A: Physical* [online]. **289**, 118–133. ISSN 09244247. Dostupné z: doi:10.1016/j.sna.2019.02.027

- [12] PALLAB BHATTACHARYA, HIROSHI KAMIMURA a ROBERTO FORNARI, 2011. *Comprehensive Semiconductor Science and Technology* [online]. B.m.: Elsevier Science. 1 [vid. 2024-05-01]. ISBN 978-0-444-53153-7. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com:5070/referencework/9780444531537/comprehensive-semiconductor-science-and-technology>
- [13] POURKIAEI, Seyed Mohsen, Mohammad Hossein AHMADI, Milad SADEGHZADEH, Soroush MOOSAVI, Fathollah POURFAYAZ, Lingen CHEN, Mohammad Arab POUR YAZDI a Ravinder KUMAR, 2019. Thermoelectric cooler and thermoelectric generator devices: A review of present and potential applications, modeling and materials. *Energy* [online]. **186**, 115849. ISSN 0360-5442. Dostupné z: doi:10.1016/j.energy.2019.07.179
- [14] WEI, Jiangtao, Liangliang YANG, Zhe MA, Peishuai SONG, Mingliang ZHANG, Jing MA, Fuhua YANG a Xiaodong WANG, 2020. Review of current high-ZT thermoelectric materials. *Journal of Materials Science* [online]. **55**(27), 12642–12704. ISSN 0022-2461, 1573-4803. Dostupné z: doi:10.1007/s10853-020-04949-0
- [15] KARAMI RAD, Meysam, Alireza REZANIA, Mahmoud OMID, Ali RAJABIPOUR a Lasse ROSENDAHL, 2019. Study on material properties effect for maximization of thermoelectric power generation. *Renewable Energy* [online]. **138**, 236–242. ISSN 0960-1481. Dostupné z: doi:10.1016/j.renene.2019.01.104
- [16] WOOD, Nathan D., Lisa J. GILLIE, David J. COOKE a Marco MOLINARI, 2022. A Review of Key Properties of Thermoelectric Composites of Polymers and Inorganic Materials. *Materials* [online]. **15**(23), 8672. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma15238672
- [17] XIE, Wenjie, Jian HE, Hye Jung KANG, Xinfeng TANG, Song ZHU, Mark LAVER, Shanyu WANG, John R. D. COPLEY, Craig M. BROWN, Qingjie ZHANG a Terry M. TRITT, 2010. Identifying the Specific Nanostructures Responsible for the High Thermoelectric Performance of (Bi,Sb)<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> Nanocomposites. *Nano Letters* [online]. **10**(9), 3283–3289. ISSN 1530-6984, 1530-6992. Dostupné z: doi:10.1021/nl100804a
- [18] LI, J.Q., S.P. LI, Q.B. WANG, L. WANG, F.S. LIU a W.Q. AO, 2011. Effect of Ce-Doping on Thermoelectric Properties in PbTe Alloys Prepared by Spark Plasma Sintering. *Journal of Electronic Materials* [online]. **40**(10), 2063–2068. ISSN 1543-186X. Dostupné z: doi:10.1007/s11664-011-1715-9
- [19] DUGHAIISH, Z. H., 2002. Lead telluride as a thermoelectric material for thermoelectric power generation. *Physica B: Condensed Matter* [online]. **322**(1), 205–223. ISSN 0921-4526. Dostupné z: doi:10.1016/S0921-4526(02)01187-0
- [20] WANG, Heng, Yanzhong PEI, Aaron D. LALONDE a G. Jeffrey SNYDER, 2011. Heavily Doped p-Type PbSe with High Thermoelectric Performance: An Alternative for PbTe. *Advanced Materials* [online]. **23**(11), 1366–1370. ISSN 0935-9648, 1521-4095. Dostupné z: doi:10.1002/adma.201004200
- [21] WANG, X. W., H. LEE, Y. C. LAN, G. H. ZHU, G. JOSHI, D. Z. WANG, J. YANG, A. J. MUTO, M. Y. TANG, J. KLATSKY, S. SONG, M. S. DRESSSELHAUS, G. CHEN a Z. F. REN, 2008. Enhanced thermoelectric figure of merit in nanostructured n-type silicon

germanium bulk alloy. Applied Physics Letters [online]. **93**(19), 193121. ISSN 0003-6951, 1077-3118. Dostupné z: doi:10.1063/1.3027060

[22] ZOU, Minmin, Jing-Feng LI a Takuji KITA, 2013. Thermoelectric properties of fine-grained FeVSb half-Heusler alloys tuned to p-type by substituting vanadium with titanium. Journal of Solid State Chemistry [online]. **198**, 125–130. ISSN 00224596. Dostupné z: doi:10.1016/j.jssc.2012.09.043

[23] YU, Junjie, Kaiyang XIA, Xinbing ZHAO a Tiejun ZHU, 2018. High performance p-type half-Heusler thermoelectric materials. Journal of Physics D: Applied Physics [online]. **51**(11), 113001. ISSN 0022-3727. Dostupné z: doi:10.1088/1361-6463/aaaa58

[24] SAKURADA, S. a N. SHUTOH, 2005. Effect of Ti substitution on the thermoelectric properties of (Zr,Hf)NiSn half-Heusler compounds. Applied Physics Letters [online]. **86**(8), 082105. ISSN 0003-6951, 1077-3118. Dostupné z: doi:10.1063/1.1868063

[25] WANG, Shanyu, Han LI, Ruiming LU, Gang ZHENG a Xinfeng TANG, 2013. Metal nanoparticle decorated n-type Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>-based materials with enhanced thermoelectric performances. Nanotechnology [online]. **24**(28), 285702. ISSN 0957-4484, 1361-6528. Dostupné z: doi:10.1088/0957-4484/24/28/285702

[26] HSIN, Cheng-Lun, Matthew WINGERT, Chun-Wei HUANG, Hua GUO, Ten-Jen SHIH, Joonki SUH, Kevin WANG, Junqiao WU, Wen-Wei WU a Renkun CHEN, 2013. Phase transformation and thermoelectric properties of bismuth-telluride nanowires. Nanoscale [online]. **5**(11), 4669. ISSN 2040-3364, 2040-3372. Dostupné z: doi:10.1039/c3nr00876b

[27] PEI, Yanzhong, Xiaoya SHI, Aaron LALONDE, Heng WANG, Lidong CHEN a G. Jeffrey SNYDER, 2011. Convergence of electronic bands for high performance bulk thermoelectrics. Nature [online]. **473**(7345), 66–69. ISSN 0028-0836, 1476-4687. Dostupné z: doi:10.1038/nature09996

[28] WANG, Heng, Yanzhong PEI, Aaron D. LALONDE a G. Jeffrey SNYDER, 2011. Heavily doped p-type PbSe with high thermoelectric performance: an alternative for PbTe. Advanced Materials (Deerfield Beach, Fla.) [online]. **23**(11), 1366–1370. ISSN 1521-4095. Dostupné z: doi:10.1002/adma.201004200

[29] TECTEG, [b.r.]. Tecteg Power Generator. Tecteg Power Generator.com [online] [vid. 2024-05-01]. Dostupné z: <https://tecteg.com/>

[30] FRANK, V. Zařízení pro testování termoelektrických modulů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 88 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.

[31] USÓN, Sergio, Javier ROYO a Paula CANALÍS, 2023. Integration of thermoelectric generators in a biomass boiler: Experimental tests and study of ash deposition effect. Renewable Energy [online]. **214**, 395–406. ISSN 0960-1481. Dostupné z: doi:10.1016/j.renene.2023.05.100

[32] BRAZDIL, Marian a Jiri POSPISIL, 2013. Thermoelectric Power Generation Utilizing the Waste Heat from a Biomass Boiler. Journal of Electronic Materials [online]. **42**(7), 2198–2202. ISSN 0361-5235, 1543-186X. Dostupné z: doi:10.1007/s11664-013-2570-7

- [33] QIU, K. a A. C. S. HAYDEN, 2011. Development of Thermoelectric Self-Powered Heating Equipment. *Journal of Electronic Materials* [online]. **40**(5), 606–610. ISSN 1543-186X. Dostupné z: doi:10.1007/s11664-010-1473-0
- [34] Hi-Z Products. Hi-Z Technology - San Diego [online]. [vid. 2024-05-02]. Dostupné z: <https://hi-z.com/products/>
- [35] Votoupal, A. (2017). Zplyňovací kotle [Gasification Boilers]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství [Brno University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering]. Vedoucí bakalářské práce: Ing. Marek Baláš, Ph.D.
- [36] MAVIS., [b.r.]. MTC11 - Termoelektrické snímače teploty MAVIS Nový Bor s.r.o. [online]. [vid. 2024-05-01]. Dostupné z: <https://mavis.cz/produkt/mtc11/>
- [37] Anon., [b.r.]. Ansys Fluent | SVS FEM s.r.o. [online]. [vid. 2024-05-02]. Dostupné z: <https://www.svsfem.cz/ansys-fluent>
- [38] JIROUŠ, FRANTIŠEK, [b.r.]. Efektivní spalování paliv [online] [vid. 2024-05-01]. Dostupné z: <https://search.mlp.cz/cz/titul/efektivni-spalovani-paliv/4121859/>
- [39] PANDEY, Bhoopendra, Yogesh K. PRAJAPATI a Pratik N. SHETH, 2021. CFD analysis of biomass gasification using downdraft gasifier. *Materials Today: Proceedings* [online]. **44**, 4107–4111. ISSN 22147853. Dostupné z: doi:10.1016/j.matpr.2020.10.451
- [40] LINSTROM, P. NIST Chemistry WebBook, NIST Standard Reference Database 69 [online]. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology, 1997. [vid. 2024-05-02]. DOI: 10.18434/T4D303. Dostupné z: <http://webbook.nist.gov/chemistry/>
- [41] R.O, WDT, spol s, [b.r.]. 3DEXPERIENCE® Works [online]. [vid. 2024-05-02]. Dostupné z: <https://www.solidworks.cz/3dexperience-works>
- [42] DONG, Changqing, Yongping YANG, Rui YANG a Junjiao ZHANG, 2010. Numerical modeling of the gasification-based biomass co-firing in a 600 MW pulverized coal boiler. *Applied Energy* [online]. **87**(9), 2834–2838. ISSN 03062619. Dostupné z: doi:10.1016/j.apenergy.2009.05.033
- [43] CENTENO-GONZÁLEZ, Felipe Orlando, Electo Eduardo SILVA LORA, Helcio Francisco VILLA NOVA, Lourival Jorge MENDES NETO, Arnaldo Martín MARTÍNEZ REYES, Albert RATNER a Mohsen GHAMARI, 2017. CFD modeling of combustion of sugarcane bagasse in an industrial boiler. *Fuel* [online]. **193**, 31–38. ISSN 0016-2361. Dostupné z: doi:10.1016/j.fuel.2016.11.105
- [44] GÓMEZ, M. A., R. MARTÍN, S. CHAPELA a J. PORTEIRO, 2019. Steady CFD combustion modeling for biomass boilers: An application to the study of the exhaust gas recirculation performance. *Energy Conversion and Management* [online]. **179**, 91–103. ISSN 0196-8904. Dostupné z: doi:10.1016/j.enconman.2018.10.052
- [45] WIESE, Jens, Frank WISSING, Dominik HÖHNER, Siegmund WIRTZ, Viktor SCHERER, Ursula LEY a Hans Martin BEHR, 2016. DEM/CFD modeling of the fuel conversion in a pellet stove. *Fuel Processing Technology* [online]. **152**, 223–239. ISSN 0378-3820. Dostupné z: doi:10.1016/j.fuproc.2016.06.005

- [46] YEPES MAYA, Diego Mauricio, Electo Eduardo SILVA LORA, Rubenildo Vieira ANDRADE, Albert RATNER a Juan Daniel MARTÍNEZ ANGEL, 2021. Biomass gasification using mixtures of air, saturated steam, and oxygen in a two-stage downdraft gasifier. Assessment using a CFD modeling approach. *Renewable Energy* [online]. **177**, 1014–1030. ISSN 0960-1481. Dostupné z: doi:10.1016/j.renene.2021.06.051
- [47] TU, Jiyuan, Guan Heng YEOH a Chaoqun LIU, 2013. *Computational fluid dynamics: a practical approach*. Second edition. Amsterdam: Elsevier/BH. ISBN 978-0-08-098243-4.
- [48] IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE). (2017). Volume 14, Issue 2 Ver. V (Mar. - Apr. 2017), PP 01-05. e-ISSN: 2278-1684, p-ISSN: 2320-334X. Retrieved from <https://www.iosrjournals.org>.
- [49] ANSYS Academic Research CFD, Release 2023 R1, ANSYS Fluent Theory guide, ANSYS, Inc.
- [50] ARNAU BAYÓN, [b.r.]. Wall functions | Introduction to CFD [online]. [vid. 2024-05-02]. Dostupné z: <https://cfdblogs.upv.es/turbulence/wall-functions/>
- [51] YIN, Chungen, Lasse ROSENDAHL, Søren K. KÆR, Sønnik CLAUSEN, Søren L. HVID a Torben HILLE, 2008. Mathematical Modeling and Experimental Study of Biomass Combustion in a Thermal 108 MW Grate-Fired Boiler. *Energy & Fuels* [online]. **22**(2), 1380–1390. ISSN 0887-0624, 1520-5029. Dostupné z: doi:10.1021/ef700689r

## Zoznam obrázkov

Obr. 1 Prerozdelenie nosičov náboja v kove pri rozdielnych teplotách koncov [6] .....	3	
Obr. 2 Porovnanie koeficientov Z vybraných materiálov [8].....	5	
Obr. 3 Porovnanie termoelektrických vlastností vo vzťahu ku koncentrácii nosičov [9].....	6	
Obr. 4 pásové diagramy polovodičov typu P a N (sprava do ľava) [10].....	7	
Obr. 5 Termoelektrická dvojica zostavená z viacerých materiálov [7].....	10	
Obr. 6 Příklad TE modulu určeného pre generovanie el. energie [29] .....	11	
Obr. 7 prierez kotlom od výrobcu BioCurve kde boli moduly integrovaný [31] .....	12	
Obr. 8 Montáž a modifikácie zostavy TEG do vrchného krytu kotla [31].....	13	
Obr. 9 Prototyp TEG generátora na ľavo v spalinovom potrubí, na pravo segment TEG [32] .....	14	
Obr. 10 Schéma zostavy kotla a integrovaného TEG [33].....	15	
Obr. 11 Prototyp TEG [33] .....	15	
Obr. 12 Prototyp splyňovacieho kotla Ekoscroll o výkone 25 kWth .....	17	
Obr. 13 Prierez modelom geometrie splyňovacieho kotla Ekoscroll .....	18	
Obr. 14 Priebeh Výkonu počas doby spalovacej skúšky.....	20	
Obr. 15 Výdaj elektrickej energie zostavy kotla .....	21	
Obr. 16 Pôvodný ventilátor WPA 06	Obr. 17 Pohľad na demontované obežné koleso.....	22
Obr. 18 Model zostavy ventilátora s upravenou skriňou pôvodného ventilátora WPA 06.....	22	
Obr. 19 Fotografia TE článkov v oblasti dvierok kotla .....	23	
Obr. 20 Rozloženie TE článkov v kotli .....	24	
Obr. 21 Záznam bodových meraní teploty v oblasti dvierok kotla v časovom úseku 11:18-12:29.....	25	
Obr. 22 Entalpia spalín a vzduchu ako funkcia teploty .....	31	
Obr. 23 Geometria medzistenového priestoru kotla .....	35	
Obr. 24 Výpočtová sieť medzistenového priestoru kotla.....	35	
Obr. 25 Upravená geometria splyňovacieho kotla .....	37	
Obr. 26 Výpočtová sieť v blízkosti stien.....	38	
Obr. 27 Vygenerovaná sieť.....	38	
Obr. 28 Znárodnenie funkcie enhanced wall treatment [50].....	41	
Obr. 29 Šamotové obloženie spalovacej komory.....	44	
Obr. 30 Detail rýchlostného pola v spalovacej komore.....	47	
Obr. 31 Teplotné pole v stredovej rovine kotla .....	48	
Obr. 32 Detail teplotného pola v spalovacej komore .....	48	
Obr. 33 Kontúra teploty v rovine článkov CH 1, CH4, CH6, CH9.....	49	
Obr. 34 Kontúra teploty v rovine článkov CH2, CH3, CH7, CH8.....	49	
Obr. 35 Kontúra teploty stredovou rovinou pri simulácii chladenia steny dvierok.....	51	
Obr. 36 Termoelektrický modul HZ-20HV a izolačný wafer, pred ich inštaláciou .....	52	
Obr. 37 Prierez zostavou chladenia TEM.....	53	
Obr. 38 Kompletná zostava TEG.....	53	
Obr. 39 Rez zostavou TEG.....	54	

## Zoznam tabuliek

Tab.1 Zhrnutie vlastnosti TE materiálov .....	10
Tab.2 Parametre TEG1-24111-6.0 [29].....	12
Tab.3 Parametre TEG1-12611-6.0 [29].....	12
Tab.4 Charakteristiky použitého modulu TEG-127-230-32e [32] .....	13
Tab.5 Parametre Hi-Z Bi <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> , o rozmeroch 75 mm x 75 mm x 5 mm [34].....	14
Tab.6 Údaje o použítoj palive, suchý dub .....	18
Tab.7 Hrubý rozbor paliva, suchý dub.....	19
Tab.8 Emisie kotla v čase od 11:18 do 12:29.....	19
Tab.9 Parametre kotla v čase od 11:18 do 12:29.....	19
Tab.10 Priemerné hodnoty nameraných teplôt pre časový úsek 11:18-12:29.....	25
Tab.11 Zloženie vzduchu .....	26
Tab.12 Entalpie plynných zložiek vztiahnutých na m <sub>N</sub> <sup>3</sup> [38].....	30
Tab.13 Výsledky rovníc 3.20-3.22, entalpia spláin a vzduchu .....	30
Tab.14 Zloženie drevoplynu [39].....	32
Tab.15 Koeficienty pre polynomický rozvoj cp ako funkcie teploty [40] .....	32
Tab.16 Zdroje energie a hmoty v zásobníku paliva .....	32
Tab.17 Energetická bilancia kotla.....	33
Tab.18 Parametre kotlovej vody.....	34
Tab.19 Parametre výpočtovej siete.....	39
Tab.20 Fyzikálne vlastnosti ocele a šamotu .....	39
Tab.21 Hmotnostné zloženie vzduchu na vstupe do kotla .....	43
Tab.22 Súhrn okrajových podmienok .....	45
Tab.23 Pseudo-relaxačné faktory.....	46
Tab.24 Diskretizačné schémy pre výpočet .....	46
Tab.25 Bodové merania v simulácii .....	50
Tab.26 Percentuálne zastúpenie prvkov na výstupe z kotla v suchých spalinách.....	50
Tab.27 Parametre modulu HZ-20HV [34].....	52