



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
ENERGY INSTITUTE

AUTOMATICKÝ KOTEL NA PELETTY

AUTOMATIC BOILER FOR BIOMASS PELLETS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. VÍT SKLENÁŘ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. JIŘÍ POSPÍŠIL, Ph.D.

BRNO 2015

Abstrakt

Cílem této diplomové práce je řešit automatických kotlů na dřevní pelety a jejich hořáků, konstrukční návrh automatického kotle na dřevní pelety, který zahrnuje výpočtovou a výkresovou část a na závěr technicko-ekonomické posouzení užití kotle pro zvolený objekt. Práce je rozdělena do čtyř hlavních částí. První část práce se zabývá obecnými informacemi o peletách, automatických kotlech spalujících pelety, hořácích a normou, kterou tyto kotle musí plnit. Ve druhé části je proveden návrh automatického kotle na pelety. Ve třetí části je vytvořen 3D model navrženého kotle a popsána jeho konstrukce. Čtvrtá část porovnává tři varianty topení mezi sebou jak po stránce ekonomické, tak i po stránce uživatelské.

Klíčová slova

Kotel, pelety, brikety, automatický kotel na pelety

Abstract

The aim of this diploma thesis is the research of automatic boilers for biomass pellets and their burners, design of automatic boiler for biomass pellets which include calculation part and drawing part and technical-economics assessment for building in the end. Thesis is divided into four main parts. The first part deals with general information about pellets, automatic boilers for pellets, burners and the standard for boiler. In the second part the pellet boiler is calculated. In the third part the automatic pellet boiler is designed. The fourth section compares three possible variants. Comparison is done for economics and the user.

Keywords

Boiler, pellets, briquette, automatic boiler for biomass pellets

Bibliografická citace

SKLENÁŘ, V. *Automatický kotel na pelety*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 101 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D..

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením doc. Ing. Jiřího Pospíšila Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 28.5.2015

.....

Vít Sklenář

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat doc. Ing. Jiřímu Pospíšilovi, Ph.D. za odborné vedení mé diplomové práce. Svým rodičům, přítelkyni a rodině, kteří mě po celou dobu studia podporovali a byli pro mě velikou oporou.

Obsah

Úvod.....	13
1 Biomasa a její rozdělení.....	14
1.1 Původ biomasy.....	14
1.2 Pelety.....	14
2 Automatické kotle na pelety.....	19
2.1 Historie spalovacích zařízení pro vytápění budov.....	19
2.2 Automatický kotel na pelety.....	19
2.3 Hořák a spalovací komora.....	21
2.4 Ostatní části kotle.....	26
2.5 Výrobci automatických kotlů na pelety.....	30
3 Vybrané legislativní části z normy ČSN EN 303-5.....	32
3.1 Obecné požadavky.....	32
3.2 Požadavky na konstrukci.....	32
3.3 Bezpečnostní požadavky.....	34
3.4 Požadavky na výkon kotle.....	36
4 Výpočet automatického kotle na pelety [11] [12].....	38
4.1 Zadání.....	38
4.2 Vstupní parametry paliva (pelet).....	38
4.3 Základní spalovací rovnice.....	40
4.4 Stechiometrické výpočty.....	41
4.5 Objemy vzduchu a spalin.....	43
4.6 Entalpie vzduchu a spalin.....	49
4.7 Ztráty kotle a tepelná účinnost.....	51
4.8 Výpočet rozměrů spalovací komory.....	54
4.9 Výpočet výměníku spaliny-voda.....	54
5 Konstrukční studie automatického kotle na pelety.....	62
5.1 Kotel na pelety SC-20.....	63
5.2 Stručný přehled výhod.....	64
5.3 Parametry kotle.....	66
5.4 Popis kotle.....	68

5.5	Řídící, regulační a zabezpečovací prvky kotle.....	76
5.6	Voda pro kotel.....	77
5.7	Možnosti umístění kotle.....	77
5.8	Hydraulické schéma zapojení kotle	79
5.9	Odhad ceny kotle	80
6	Technicko-ekonomické zhodnocení užití kotle na pelety pro rodinný domek.....	81
6.1	Výpočet energie potřebné pro ohřev a vytápění RD.....	81
6.2	Ekonomické zhodnocení	82
6.3	Ekonomické vyhodnocení jednotlivých variant.....	87
7	Závěr	89
	Použité informační zdroje.....	90
	Seznam obrázků.....	91
	Seznam tabulek.....	93
	Seznam grafů	95
	Seznam příloh	96
	Seznam použitých zkratk	97
	Seznam použitých značek a symbolů	98

Úvod

V dnešní moderní době, kdy stále roste spotřeba energií, ať už elektrické, či tepelné, je zcela nezbytné ve větším měřítku využívat energii uloženou v obnovitelných zdrojích. Fosilní paliva, tak jak je známe od objevení prvních ložisek v 19. století (uhlí, ropa a zemní plyn), nám začínají pomalu docházet a je jen otázkou času (i přes neustálé prolamování těžebních limitů, či objevování nových nalezišť), kdy nám dojdou úplně. Pokud si tedy člověk bude chtít zachovat svůj komfortní styl života, bude zcela nepochybně nucen využívat veškerou možnou energii z právě zmíněných obnovitelných zdrojů. Za obnovitelný zdroj se považuje takový zdroj, jenž se nedá vyčerpat, a může být stále obnovován. K těmto zdrojům řadíme např. biomasu, energii vod, větru, slunce a geotermální energii. Výhodou těchto obnovitelných zdrojů energií je jejich neutrální vliv vůči životnímu prostředí. Např. u spalování biomasy se sleduje pouze množství prachového úletu, nikoliv však množství uvolněného CO₂, neboť se bere v úvahu, že přibližně stejné množství CO₂ by se uvolnilo do atmosféry, i kdyby tato biomasa nebyla spálena, ale pouze by se s pomocí mikroorganismů postupně rozkládala.

Téma této diplomové práce bylo vybráno na základě reálné možnosti vývoje automatického peletového kotle pro jednoho soukromého investora. Ten se rozhodl do tohoto odvětví investovat z toho důvodu, že výroba a prodej automatických kotlů na pelety bude v nejbližších letech poměrně zajímavým obchodním produktem. To je dáno tím, že na tyto zdroje budou v následujících letech uvolněny značné prostředky z různých dotačních programů. Příkladem může být „*nová zelená úsporám*“, kdy se automatických kotlů na pelety týká oblast podpory C.: *Efektivní využití zdrojů energie*. Tato oblast poskytuje dotaci na výměnu neekologického zdroje tepla za efektivní ekologicky šetrné zdroje. Mezi efektivní a ekologicky šetrné zdroje patří právě automatické kotle na pelety. Momentální alokace finančních prostředků činí: 600 000 000 Kč. Maximální výše podpory je 50%.

Práce se tedy bude zabývat návrhem plně funkčního automatického kotle na pelety, avšak protože se jedná o experimentální zařízení, tak některé konstrukční uzly budou řešeny jinak než u kotle pro sériovou výrobu.

Práce je rozdělena na dvě hlavní části. První část práce se zabývá především popisem pelet jako paliva, automatickým kotlem na pelety a jeho jednotlivými částmi a normami vztahujícími se ke konstrukčnímu návrhu kotle. Druhá část práce je zaměřena na praktickou stránku věci. Je zde proveden výpočet kotle a jeho výměníku, objasnění konstrukčního řešení jednotlivých částí kotle a na závěr zhodnocení ekonomiky výroby a nasazení kotle pro zvolený objekt.

1 Biomasa a její rozdělení

1.1 Původ biomasy

Dřevní biomasa

Z této biomasy se vyrábějí pelety pro spalování v později navrženém kotli. Jedná se o biomasu ze stromů, keřů a křovin. [1]

Bylinná biomasa

Je to biomasa z rostlin, které nemají dřevitý stonek a které odumírají na konci vegetační doby (obilniny, traviny, olejniný na semeno, kořenoviny, luskoviny, květiny). [1]

Ovocná biomasa

Biomasa, kterou reprezentují části rostlin, které jsou ze semen, nebo obsahují semena (bobule, dužina, semena) [1]

Vodní biomasa

Je rozdělena na následující hlavní druhy: řasa, vodní hyacint, jezerní a mořská řasa. [1]

Směsná biomasa

Jedná se o směsi a příměsi, tedy kombinace předešlých skupin s tím, že směsi jsou záměrně smíchaná biopaliva a příměsi nezáměrně smíchaná biopaliva. [1]

1.2 Pelety

Dřevní peleta – ztuhlé biopalivo vyrobené z dřevní biomasy s přísadami nebo bez přísad, obvykle válcovitého tvaru, průměrné délky běžně 5 mm až 40 mm a průměru do 25 mm a s ulámanými konci. [2]



Obr. 1- Dřevní peleta [3]

1.2.1 Historie pelet

Historie dřevní pelety se začala psát poměrně nedávno v Severní Americe. S peletizací sypkých materiálů se však poprvé setkáváme před více než 100 lety. Slovo peleta pochází

z francouzského *pellet*, což v češtině znamená *sbalek*. Ty vznikaly postupným nabalováním jemně mleté a vhodně navlhčené rudy v otočném bubnu a následným vypálením vzniklého sbalku. Zavedení technologie peletizace rud výrazně zefektivnilo jejich dopravu z dolů do hutí, ale i samotnou výrobu oceli díky podstatnému zvýšení kovnatosti vsázky ve vysokých pecích. [1]

Postupně se výraz *pellet* začal používat především v angličtině také pro výrobky vznikající lisováním drobných sypkých materiálů do různých tvarových forem. V polovině minulého století se značně rozšířila technologie peletizace sypkých krmných směsí lisováním na protlačovacích matricích s válcovými kanálky. Výsledným produktem bylo koncentrované krmivo ve formě malých válečků. Když pak počátkem sedmdesátých let vypukla ropná krize, začali v Severní Americe místo šrotu a otrub na stejných zařízeních lisovat piliny, čímž vznikla dřevní peleta jako alternativa za drahá fosilní paliva. Z drobných pilin s nízkou výhřevností i objemovou hmotností lisováním vznikl produkt, který výhřevností i objemovou hmotností mohl konkurovat hnědému uhlí. Kanada a USA dnes patří spolu se Švédskem k největším světovým výrobcům dřevních pelet. [1]

Na konci 90. let se Evropská unie zavázala k boji za snižování emisí CO₂. Členské země se zavázaly, že v roce 2020 budou 20% energie vyrábět z obnovitelných zdrojů. To pomáhá dřevní peletě v jejím šíření a rozvíjení jejího potenciálu. V dnešní době je palivo i technologie topení peletami stále poměrně drahá, ale to se bude postupně měnit, protože fosilních paliv bude ubývat a jejich získávání bude stále obtížnější a nákladnější. Navíc technologie spalování pelet se neustále zdokonaluje a je snaha o snížení nákladů na její pořízení.

1.2.2 Norma pro pelety

Pro definici vlastností pelet pro malooběratele byl zaveden evropský standard, který platí i u nás, a to norma ČSN EN ISO 17225-2. Tato norma chrání koncové zákazníky a současně umožňuje výrobcům kotlů na pelety navrhnout optimální spalovací zařízení pro normou deklarované parametry. Výňatek z této normy obsahuje následující tabulka:

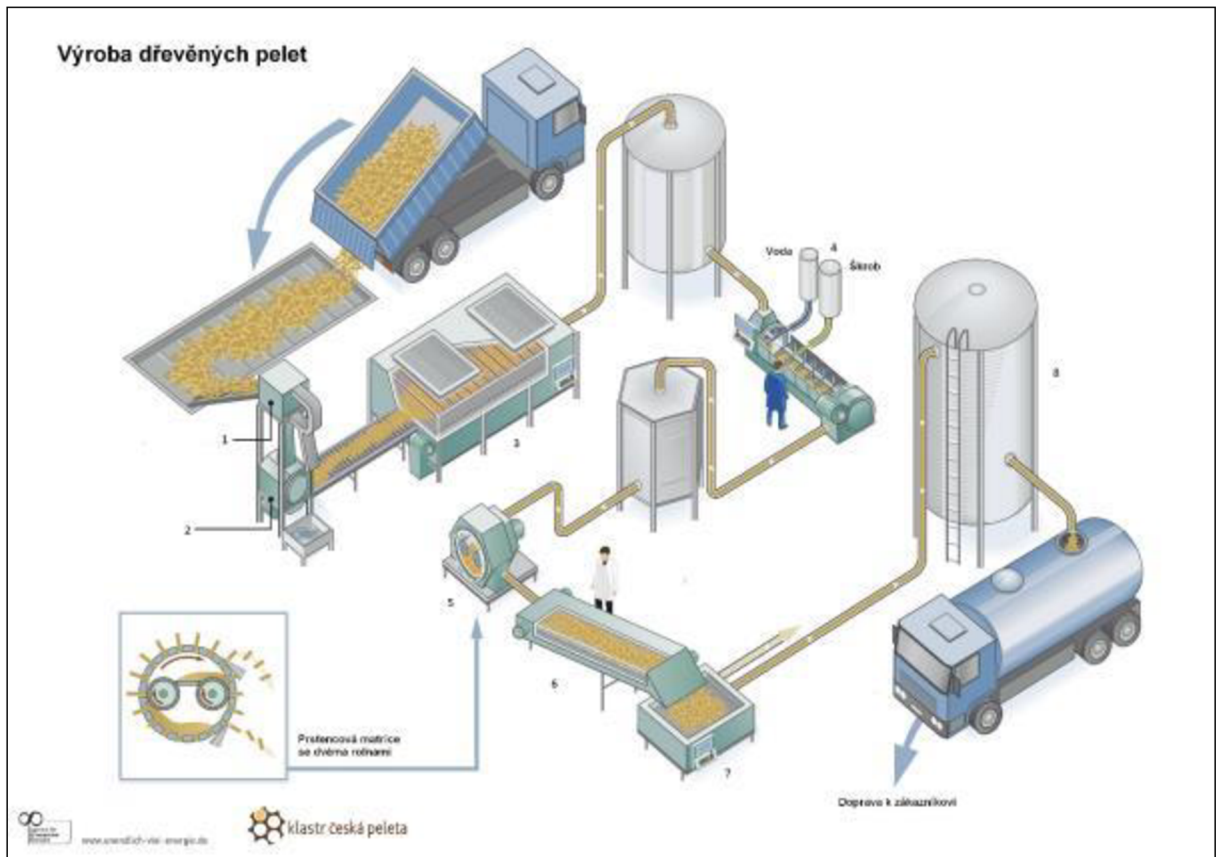
Normativní	Třída vlastnosti Zkušební metoda	Jednotka	A1	A2	B
	Původ a zdroj ISO 17225-1		Kmenové dřevo Chemicky neupravené dřevní zbytky	Celé stromy Kmenové dřevo Zbytky po těžbě dřeva Chemicky neupravené dřevní zbytky	Lesní, plantážové a jiné původní dřevo Vedlejší produkty a zbytky z dřevozpracujících o průmyslu Chemicky neupravené použité dřevo
	Průměr, D a délka, L	mm	D06, 6 ± 1 3,15 < L ≤ 40 D08, 8 ± 1 3,15 < L ≤ 40	D06, 6 ± 1 3,15 < L ≤ 40 D08, 8 ± 1 3,15 < L ≤ 40	D06, 6 ± 1 3,15 < L ≤ 40 D08, 8 ± 1 3,15 < L ≤ 40
	Voda, M ISO 18134-1 ISO 18134-2	w-%, původní	M10 ≤ 10	M10 ≤ 10	M10 ≤ 10
Popel, A	w-%,	A0.7 ≤ 0,7	A1.2 ≤ 1,2	A2 ≤ 2	

	ISO 18122	bezvodý			
	Mechanická odolnost, DU ISO 17831-1	w-%, původní	DU97.5 ≥ 97,5	DU97.5 ≥ 97,5	DU96.5 ≥ 96,5
	Jemné částice, F ISO 18846	w-%, původní	F1.0 ≤ 1,0	F1.0 ≤ 1,0	F1.0 ≤ 1,0
	Přísady	w-%, bezvodý	≤ 2 w-% Uvede se typ a množství	≤ 2 w-% Uvede se typ a množství	≤ 2 w-% Uvede se typ a množství
	Výhřevnost, Q ISO 18125	MJ/kg nebo kWh/kg, původní	Q16.5 ≥ 16,5 nebo Q4.6 ≥ 4,6	Q16.5 ≥ 16,5 nebo Q4.6 ≥ 4,6	Q16.5 ≥ 16,5 nebo Q4.6 ≥ 4,6
	Sypná hmotnost, BD ISO 17828	kg/m ³	BD600 ≥ 600	BD600 ≥ 600	BD600 ≥ 600
	Dusík, N ISO 16948	w-%, bezvodý	N0.3 ≤ 0,3	N0.5 ≤ 0,5	N1.0 ≤ 1,0
	Síra, S ISO 16994	w-%, bezvodý	S0.04 ≤ 0,04	S0.05 ≤ 0,05	S0.05 ≤ 0,05
	Chlor, Cl ISO 16994	w-%, bezvodý	Cl0.02 ≤ 0,02	Cl0.02 ≤ 0,02	Cl0.03 ≤ 0,03
	Arsen, As ISO 16968	mg/kg, bezvodý	≤ 1	≤ 1	≤ 1
	Kadmium, Cd ISO 16968	mg/kg, bezvodý	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,5
	Chrom, Cr ISO 16968	mg/kg, bezvodý	≤ 10	≤ 10	≤ 10
	Měď, Cu ISO 16968	mg/kg, bezvodý	≤ 10	≤ 10	≤ 10
	Olovo, Pb ISO 16968	mg/kg, bezvodý	≤ 10	≤ 10	≤ 10
	Rtuť, Hg ISO 16968	mg/kg, bezvodý	≤ 0,1	≤ 0,1	≤ 0,1
	Nikl, Ni ISO 16968	mg/kg, bezvodý	≤ 10	≤ 10	≤ 10
	Zinek, Zn ISO 16968	mg/kg, bezvodý	≤ 100	≤ 100	≤ 100
Informativní	Teplota tavitelnosti popela CEN/TS 15370-1	°C	Měla by se uvést.	Měla by se uvést.	Měla by se uvést.

Tab. 1- Specifikace tříděných dřevních pelet pro obchodní účely a vytápění v obytných domech [2]

1.2.3 Výroba pelet

Základní technologické uzly peletování jsou:



Obr. 2- Peletování [4]

- 1) **Příjem suroviny** – musí pojmout dostatečné množství suroviny pro zpracování a měl by umožňovat i hrubé před-třídění suroviny tak, aby do drtiče nešla nevhodná velikost suroviny nebo různé příměsi, které v surovině nemají co dělat jako např. kameny, atd.. K tomu může sloužit hrabicový dopravník s kotoučovým tříděčem.
- 2) **Drcení** – vstupní surovina, kterou jsme přijali má různou velikost (štěpky, hobliny, piliny), a proto je nutné před dalším zpracování upravit surovinu tak, aby výsledná frakce byla co možná nejjednodušší. K drcení biomasy se obvykle používají kladivové drtiče.
- 3) **Sušení** – nyní má surovina plus mínus stejnou velikost, ale stále vysokou vlhkost cca 40 – 60 % a je potřeba ji vysušit na vlhkost 10 – 16 % pro peletování. Existuje několik možností, jakou technologií surovinu usušit:
 - **Pásová sušárna** – sušený materiál je rozložen v tenké vrstvě na širokém pásu sušárny. Rychlost posunu pásu závisí na vstupní a požadované výstupní vlhkosti. Obě tyto veličiny se měří a podle toho automatika volí rychlost posuvu pásu. Teploty v sušárně se pohybují do 120°C. Díky tomu se nepoškozuje sušená surovina (napalování).
 - **Bubnová sušárna** – může být jednocestná nebo vícecestná. Teplý vzduch je do sušárny přiváděn z dohořovací komory kotle, kde se na základě požadované teploty míchají spaliny se vzduchem.

Nevýhodou těchto sušáren je teplota sušícího média. Za bubnem sušárny následuje brýdová komora a cyklonové odlučovače.

- 4) **Vlhčení a homogenizace** – před samotným lisováním je nutné surovinu upravit na požadované parametry pro lisování. To se provádí dovlhčováním na požadovanou vlhkost buď parou, nebo vodou. V některých případech je ještě potřeba přidat aditivum, které zlepšuje pojivost suroviny, aby výsledná peleta držela při sobě. Jako aditivum se využívá mouka, škrob, ... Na závěr projde surovina homogenizačním šnekovým dopravníkem.
- 5) **Lisování** – pelety se vyrábějí protlačováním materiálu přes matrici. Podle tvaru matrice rozeznáváme dva hlavní typy lisů:
 - Deskový
 - Prstencový

Lisy s deskovou matricí se využívají spíše pro menší výkony výrobních linek. Lisy s prstencovou matricí se používají pro větší výkony výrobních linek. Pro každý typ suroviny je potřeba vyzkoušet různé typy roln a matric. Z nich následně vybrat ty, které jsou nejvhodnější pro danou surovinu. Je také nutné nastavit správně polohu rolny vůči matrici.

- 6) **Chlazení** – po lisování se musí zahřáté pelety (90 – 125°C) co nejrychleji ochladit, aby získaly svoji mechanickou odolnost a pevnost. K tomuto účelu se používají protiproudé vzduchové chladiče pelet.
- 7) **Separace** – protože v peletách pro maloodběratele může být pouze určité procento oddrolu (max. 1% hmotnosti), je nutné před balením pelety prosit. Prosetí se dělá na vibračním třídíči, kde se oddrol oddělí od výsledného produktu. Oddrol je následně vrácen do výrobního procesu.
- 8) **Balení** – jsou čtyři možnosti balení:
 - Balení do sáčků – balení po 15 kg
 - Balení do bigbagů – balení po 1 t
 - Volně ložená peleta – nakládání do cisterny nebo do posuvky (kamion s přívěsem) a následná doprava přímo k zákazníkovi.
 - Skladování v zásobnících – poslední možností je pelety skladovat v zásobníku např. v síle. Odtud je možnost peletu expedovat všemi třemi předcházejícími způsoby.



Obr. 3- Možnosti balení pelet

2 Automatické kotle na pelety

2.1 Historie spalovacích zařízení pro vytápění budov

V historii se obydlí vytápěla různými způsoby. Za nejstarší asi můžeme považovat otevřená ohniště. V domech na vesnicích se ve středověku používalo dýmné vytápění, na hradech a v palácích se používaly otevřené krby, ty však rozlehlé místnosti nebyly schopny vytopit, protože téměř veškerá energie unikla komínem. V pozdější době se začala používat kachlová kamna, ty představují pokrok v obytné kultuře, protože obvykle byl příkladací otvor a komín v jiné místnosti než kachlová kamna. Obyvatelé dané budovy tak pobývali v naprosto čisté místnosti.

První kotle na pelety byly vyvinuty někdy mezi 70-80. léty dvacátého století ve Spojených státech amerických. První plně automatické kotle pro domácnosti přišly na trh v 90. letech jako alternativa k fosilním palivům, která byla stále dražší a jejich spalování bylo omezováno zákony. Kotle na plyn měly najednou v kotlech na pelety velkého konkurenta. Jejich komfort a čistota topení jsou srovnatelné. Na jejich vývoji intenzivně pracovali v Rakousku. Z Rakouska se tato technologie rozšířila do celé Evropy a následně do světa. Rakouské kotle na pelety jsou v dnešní době považovány za nejlepší na světě. V historii k intenzivnímu vývoji této technologie pomohly v 90. letech přijaté nové přísné zákony o emisích a energetická situace v Rakousku. Firmy v dnešní době investují nemalé finanční prostředky do dalšího vývoje technologie kotlů na pelety. [5]

2.2 Automatický kotel na pelety

Jedná se o kotel s automaticky řízeným spalováním pomocí řízení dávkování paliva do kotle a ventilátoru pro přívod spalovacího vzduchu (primárního, sekundárního a v některých případech i terciálního). Dřevní pelety jsou z integrovaného zásobníku paliva automaticky dopravníkem dákovány do kotle. Objem zásobníku každý výrobce dimenzuje individuálně. Do tohoto zásobníku jsou pelety dopravovány ručně nebo automaticky z celosezónního zásobníku. Kotle můžeme dělit například dle přívodu paliva, typu hořáku nebo roštu případně podle účinnosti a emisí, které kotle produkují. Dle evropské normy ČSN EN 303-5 se kotle podle emisí dělí na tři emisní třídy a to 3, 4 a 5. [6]

Kotel dovede pracovat bez zásahu obsluhy dny až měsíce v závislosti na velikosti zásobníku paliva a na rozměrech popelníku. Parametrem, který ovlivňuje dobu provozu kotle bez zásahu obsluhy, je i konstrukce samotného kotle. Některá konstrukční provedení kotlů vyžadují častější zásah obsluhy, např. při čištění roštu nebo spalínového výměníku. Důvodem čištění mohou být nánosy na ploše výměníku, zapečené otvory pro přívod vzduchu, nebo různé spečence v přívodu paliva. Tyto spečené nánosy se tvoří hlavně při spalování méně kvalitních pelet. [6]



Obr. 4- Kotel na pelety GUNTAMATIC BIOSTAR [5]

Pracovní cyklus automatického kotle na pelety pak probíhá následovně. Při požadavku na dodávku tepla dá automatická regulace kotle pokyn doplnění paliva do hořáku a jeho následnému zažehnutí obvykle pomocí elektrické energie. Po zapálení hořáku probíhá spalování pelet, přičemž potřebné množství je dodáváno šnekovým dopravníkem. Dodávka paliva do kotle neprobíhá kontinuálně, ale periodicky v určitých intervalech. Tento interval se může například řídit výstupní teplotou spalin z kotle. Spalovací proces kotle může být řízen pomocí tzv. lambda sondy. Lambda sonda měří množství kyslíku ve spalinách. Na základě údajů naměřených lambda sondou řídicí jednotka upraví poměr paliva a spalovacího vzduchu. Tento způsob řízení se používá u dražších provedení kotlů. Pokud již není dodávky tepla zapotřebí, řídicí jednotka zastavuje přísun paliva a spalovacího vzduchu. Pelety na hořáku dohoří. Vzduch pro spalování je dodáván s pomocí elektrického ventilátoru. Ten obvykle dodává jak primární, tak i sekundární vzduch pro spalování. Zařízení má minimální požadavky na obsluhu. [7]

Vývoj v oblasti automatických kotlů na pelety probíhá hlavně v automatizaci celého procesu, tak aby byl zajištěn co možná největší komfort pro uživatele a snižování nákladů na pořízení takového kotle, protože v dnešní době je jeho pořízení stále hodně nákladné.

2.3 Hořák a spalovací komora

U automatických kotlů na pelety se uplatňuje několik základních typů hořáků, které si jednotliví výrobci modifikují podle své potřeby.

Definice hořáku spalující pelety podle normy ČSN EN 15270 – je to zařízení spalující pelety, jehož řízení může být různého typu: dvupolohové, mechanické, spojitě nebo vícestupňové, pelety mohou být dávkovány vodorovně, shora nebo zdola.

Třídění hořáků spalujících pelety je poměrně komplikované a je provedeno v normě ČSN EN 15270 Hořáky spalující pelety pro kotle malých výkonů – Terminologie, požadavky, zkoušení, značení. Dle této normy se hořáky třídí podle [8]:

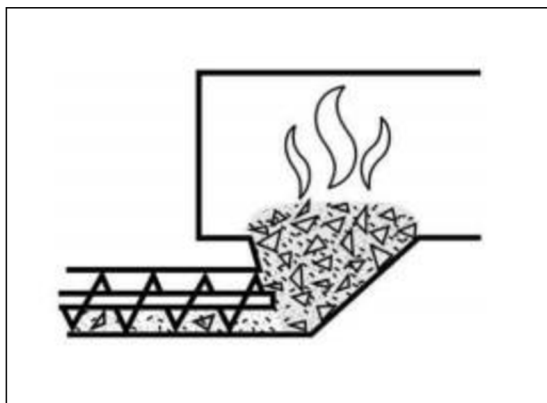
- Způsobu řízení a jsou řazeny do skupin: dvupolohové řízení, spojitě řízení, vícestupňové řízení
- Prostředků zapalování a jsou řazeny do skupin: ruční zapalování, samočinné elektrické zapalování, zapalovací plamínek, horkovzdušný prvek, samočinné zapalovací zařízení na kapalná nebo plynná paliva
- Vnějšího nebo vnitřního zásobníku paliva
- Spalovací komory
- Monoblokového nebo jiného hořáku

Tím rozhodujícím kritériem, podle kterého se peletové hořáky odlišují, je způsob, jakým je v nich vytvářena základní vrstva paliva (základní vrstva paliva je množství nahořelého paliva, které umožní bezpečné zapálení paliva nově přivedeného) a jak je k ní přiváděn primární spalovací vzduch. To rozhoduje, jak kvalitní (či spíše nekvalitní) peletu je hořák schopen dlouhodobě spalovat, jaký způsob zapalování je nutné zvolit, či jaký výkon je pro danou konstrukci limitní. [6]

Převedeno na spalování pelet, základní vrstvu v peletovém hořáku tvoří na roštu nahořelé pelety, které mají v sobě ještě tolik hořlaviny (většinou již jen pevný podíl), že jejich dohořením se uvolní dostatek tepla potřebného pro bezpečné zapálení nově přiložených pelet. Nové pelety se „zbaví“ prchavé hořlaviny a postupně se samy stávají základní vrstvou. Pro dohoření tuhého podílu je však nutné přivést k povrchu žhavých uhlíků ještě kyslík. Ten dodá primární spalovací vzduch. Původní základní vrstva postupně dohořívá na popel, v případě kvalitních dřevních pelet přesněji na jemný prášek. Právě způsoby přikládání nového paliva, přivedení primárního spalovacího vzduchu a odvedení tuhých zbytků spalování určují limity pro využití jednotlivých konstrukcí hořáků. Existuje mnoho možností, jak tyto jednotlivé „technologické uzly“ řešit a neustále se objevují způsoby nové. Proto je velice těžké provést nějaké přesné členění peletových hořáků, protože každý hořák představuje individuální kombinaci jednotlivých řešení. U některých spalovacích zařízení nelze dokonce ani mluvit o hořáku, protože tyto technologické uzly jsou přímo začleněny do konstrukce zařízení (peletová kamna). Způsob „nakládání“ se základní vrstvou paliva lze však popsat na obecných principech. [6]

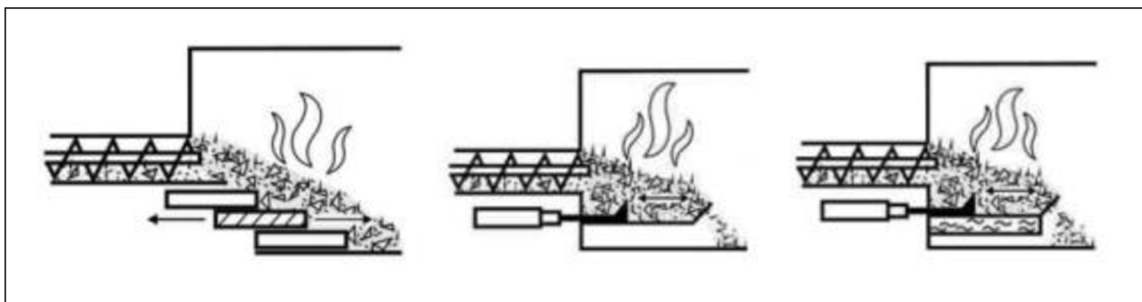
2.3.1 Rozdělení hořáků podle způsobu přívodu paliva

- **Hořáky se spodním přívodem paliva** – patří sem retortové hořáky (podrobněji budou představeny v následující kapitole) a různé hořáky založené na podobném principu. Palivo je do hořáku přiváděno spodem šnekovým dopravníkem, který je na konci zakončen kolenem (retortou). Na koleno navazuje spalovací pánev, do které se přivádí primární spalovací vzduch.



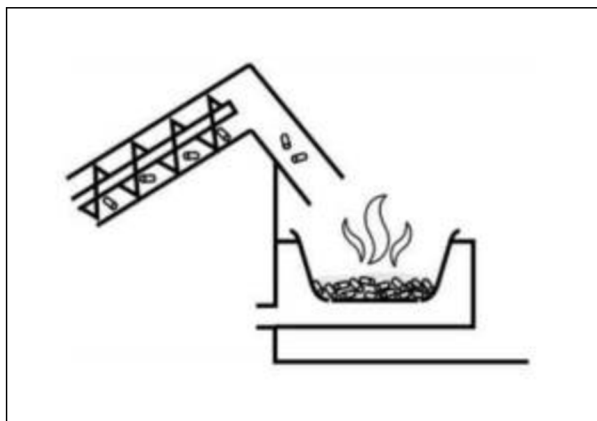
Obr. 5- Hořák se spodním přívodem paliva [7]

- Hořáky s vodorovným přívodem paliva** – palivo je do hořáku přiváděné vodorovně. Při tomto přívodu paliva se používá spalování roštové nebo bezroštové. Doprava paliva do topeniště se realizuje pomocí šnekového dopravníku. Při roštových topeništích převažují systémy s pevným roštem. Při vyšších výkonech lze použít topeniště s posuvným roštem, kde se palivo posouvá pohybem roštnic vpřed a vzad. Topeniště s posuvem paliva po pevném roštu mohou být realizována buď jako nechlazená, nebo chlazená vodou. Konstrukce s vodou chlazeným topeništěm (pevné podlahy) jsou vhodné kromě spalování štěpky a pelet i pro spalování paliva s vysokým obsahem popela a paliva se sklonek k tvorbě škváry (obilí, zrno). Primární spalovací vzduch je vhodným způsobem přiváděn do prostoru primární zóny spalování paliva, a to buď přes rošt přívodními vzduchovými kanály, nebo tryskami. Při roštových konstrukcích splňuje primární vzduch také funkci roštového chlazení, což zmenšuje riziko tvorby škváry a přehřívání materiálu. Sekundární vzduch se přivádí do prostoru před vstupem do dohořivací komory. [7]



Obr. 6- Hořák s vodorovným přívodem paliva [7]

- Hořáky s horním přívodem paliva** – topeniště s horním přívodem paliva byla speciálně vyvinuta pro spalování dřevních pelet. Tato konstrukce topeniště není vhodná pro spalování dřevní štěpky. Pelety se dopravují šnekovým dopravníkem do horní polohy tak, aby pelety padaly troubou nebo šachtou do místa spalování. To se může nacházet buď ve vyměnitelné pánvi ohniště na překlápěcím roštu, nebo ve spalovacím tunelu. Tento typ topeniště se používá pro malé tepelné výkony, přibližně do 30 kW. Topeniště s otočným válcovým roštem se oproti klasickým roštům liší v konstrukci otáčivého roštu, na kterém probíhá hoření. Palivo se automaticky sesouvá z násypky na rošt, nebo je podáváno dávkovacím šnekem. Na roštu tedy hoří jen optimální množství paliva. Otáčivý pohyb roštu zajišťuje přísun paliva ze zásobníku a odvod popela. [7]



Obr. 7- Hořák s horním přívodem paliva [7]

2.3.2 Nejpoužívanější hořáky a rošty

V této kapitole bude proveden rozbor pouze hořáků a roštů, které považuje autor této práce za důležité (obsáhnout veškeré typy hořáků není v možnostech této diplomové práce).

1) Retortový hořák (hořák se spodním přívodem paliva)

- Název „převzal“ tento typ hořáku od zařízení zvaného retorta, což je - velice zjednodušeně - uzavřená nádoba, ve které se „zplyňuje uhlí“ (díky retortám začala před více jak 200 léty plynofikace evropských měst). Retortové hořáky původně vznikly v počátcích průmyslové revoluce a byly využívány pro vytápění parních kotlů v lokomotivách. [6]



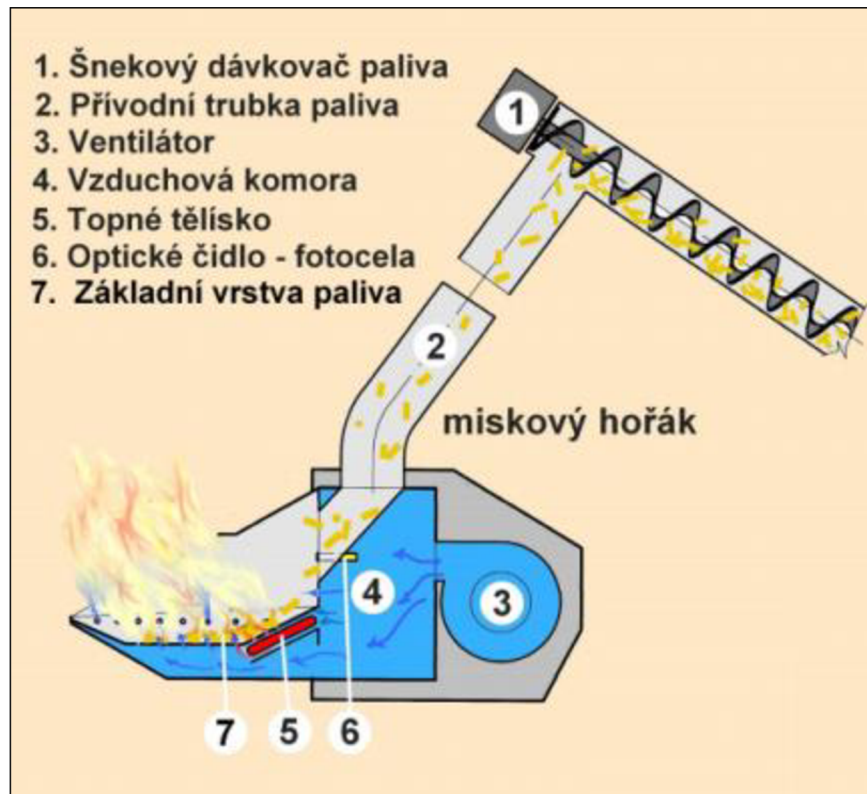
Obr. 8- Retortový hořák [6]

- Někdy se jim také říká hořáky se spodním příkládáním paliva. Palivo je v nich dodáváno zpočátku horizontálně šnekovým podavačem a v části hořáku zvané retorta (má tvar kolene) mění svůj směr pohybu a je vytlačováno vertikálně do spalovací části hořáku. Tím, jak se palivo ve vrstvě blíží k zóně spalování, se postupně zahřívá a začíná uvolňovat prchavou hořlavinu. Hořlavina prochází základní vrstvou paliva a po smísení se spalovacím vzduchem se nad roštem v dohořivací zóně zapálí. Vyhořelé zbytky jsou buď odfouknuty spalovacím

vzduchem, nebo jsou vytlačeny novým palivem na kruhový rošt, který je nad retortou. Spalovací vzduch je vháněn do základní vrstvy paliva po stranách v horní části retorty (rozdmychává ji podobně jako uhlí v kovářské výhni) a prochází jí. Kyslík nevyužitý pro vyhoření pevného podílu je již natolik přehřátý, že se bez problémů „zapojí“ do oxidace prchavého podílu hořlaviny v dohořivacím prostoru spalovací komory. Díky tomu, že palivo uvolňuje prchavou hořlavinu v zóně zahřívání bez přístupu vzduchu, „odplyňuje“ se podobně jako uhlí v retortách při výrobě svítiplynu, proto ten název celého hořáku. Po přechodu hořáku do útlumu ustane přísun spalovacího vzduchu, základní vrstva se pomalu posouvá níže do retorty. Proto je nutné po nějaké době šnekovým dávkovačem vrstvu paliva (a tím i základní vrstvu) „posunout“ o něco výše. Po opětovném přechodu do provozního režimu pak stačí obnovit přísun spalovacího vzduchu a řízené doplňování paliva. Proto je tento typ hořáků vhodný pro spalování méně kvalitních pelet s velkým podílem popelovin a s vysokou náklonností ke spékání. Popel a případná struska jsou totiž novým palivem (základní vrstvou) vytlačovány ze zóny hoření a neblokují tak přístup spalovacího vzduchu. Lze v nich proto celoročně spalovat pelety třídy A2 a B, popřípadě i pelety rostlinné. U příliš „spékavých“ pelet dochází časem k napékání popelovin na stěny retorty a tu je nutné po několika měsících provozu vyčistit. Neustálý kontakt základní vrstvy s peletami znamená zvýšené nebezpečí prohořívání do násypky paliva, což lze ale technicky vyřešit právě cyklickým posunem paliva v době útlumu. [6]

2) Miskový hořák

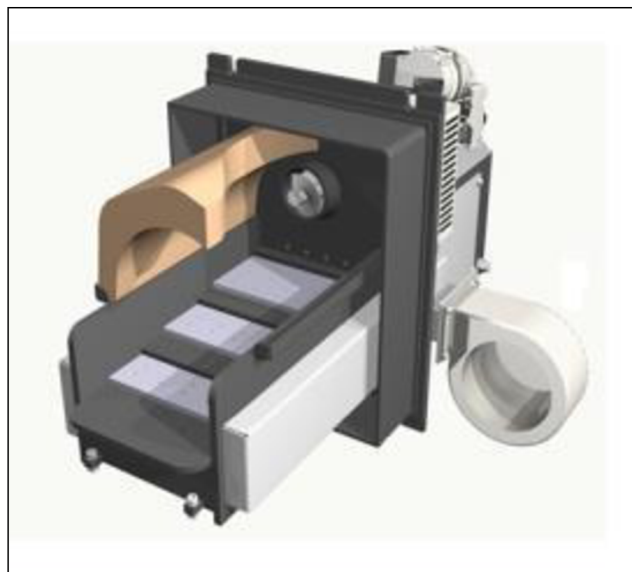
- Pravděpodobně nejrozšířenější typ hořáků. Jedna z jeho možných variant je zobrazena na níže uvedeném schématu. Spalovací komora má tvar misky, do které přepadávají pelety ze šnekového dávkovače. Dno „misky“ tvoří rošt, ve kterém jsou otvory pro přívod primárního vzduchu, v bočních stěnách je několik otvorů pro přívod sekundárního vzduchu. Pod roštem je umístěno tělísko elektrického zapalovače, které ve fázi zapalování ohřívá vzduch, který je obtéká. Na obrázku je pohled do spalovací komory kotle firmy Atmos s miskovým hořákem, který patří k absolutní špičce mezi hořáky této kategorie. Všimněte si množství žárobetonové vyzdívky ve spalovací komoře, která v ní zajišťuje vysokou teplotu a tím i podmínky pro ideální vyhoření plynné hořlaviny. [6]



Obr. 9- Miskový hořák [6]

3) Spalování na „roštu“

- Jeden z nejstarších způsobů spalování tuhého paliva. Existují různá konstrukční provedení, která se od sebe liší. Jako například kotle: s pevným roštem, odklápěcím roštem, přesuvným roštem apod., kde je využíván vodorovný a horní přísun paliva.
- Roštové kotle se používají převážně pro spalování méně kvalitních pelet (A2, B nebo rostlinné)



Obr. 10 - Roštový hořák firmy VERNER SK a PONAŠT [8]

2.4 Ostatní části kotle

2.4.1 Kotlové těleso

Je ta část kotle, v níž se ohřívá teplotonosná látka. Je to základní část (ocelový nebo litinový skelet kotle), ve které proudí otopná voda. Dimenzování a konstrukce kotlového tělesa do značné míry předurčuje jeho celkové užité vlastnosti. [9]

2.4.2 Zásobník paliva

Je to část kotle, ze které je dodáváno palivo pro spalování. Zásobník paliva zabezpečuje provoz kotle na jeden až několik dní. Zásobník paliva se nachází přímo u kotle, nebo je jeho součástí. Může být buď plněn manuálně ze sáčků s peletami, nebo může být doplňován automaticky z celosezónního zásobníku pelet buď pomocí šnekového dopravníku, nebo pneumaticky. V případě automatického doplňování paliva může být zásobník u kotle menších rozměrů. Palivo je ze zásobníku samočinně dle aktuální potřeby dávkováno na rošt pomocí šnekového dopravníku.

2.4.3 Spalovací prostor

Spalovací prostor je část vnitřního prostoru kotle, v níž probíhá spalování paliva. Je to celý prostor kotle nad roštem, ve kterém dochází k primárnímu hoření pevné hořlaviny i sekundárnímu vyhořívání prchavé hořlaviny. Proto se do části tohoto prostoru přivádí sekundární spalovací vzduch, který se směšuje s uvolněnou prchavou hořlavinou a podporuje tak její lepší vyhoření. Spalovací komora je konstrukční část kotle, která pevně vymezuje spalovací prostor stěnami kotlového tělesa. U kotlů s ručním přikládáním paliva se spalovací prostor často prolíná s násypkou paliva, protože je umístěna nad roštem a palivo postupně nahořívá do její hloubky. [7]

2.4.4 Popelník

Popelník (popelníkový prostor) je část určená k zachycování pevných zbytků spalování (popel/škvára). [7] Uvnitř popelníku je buď popelníková sběrná nádoba, nebo se používají různé odpopelňovací mechanismy, které popel transportují do externích sběrných nádob popele, které mohou být umístěny vedle kotle.

2.4.5 Žárovzdorná vyzdívka

Žárovzdorná vyzdívka (tvarovky, trysky). Jedná se o části vyrobené z keramických materiálů s vysokou akumulací schopností. Jako vyzdívky spalovací komory se zpravidla používá šamot, který udržuje v ohništi teplotu nutnou pro kvalitní průběh spalování. Pokud přijde do styku s vodou chlazenými stěnami kotlového tělesa, ihned se ochladí a spalovací proces se přeruší. Proto se vyzdívka používá k izolování relativně chladných stěn kotlového tělesa od spalovacího prostoru. U moderních konstrukcí se používá žárobetonových dílů různých tvarů k usměrnění plamene nebo přímo ke konstrukci roštů či spalovacích a dohořívacích komor. V tomto případě je nutné použít speciální hutné žárobetonu s vysokou pevností a vysokou pracovní teplotou (>1300 °C). [7]

2.4.6 Regulace teploty

Regulátor teploty je zařízení, které zajišťuje a reguluje teplotu vody v kotli. U elektronické regulace spalování je spalovací vzduch dopravován do ohniště pomocí ventilátoru, takže lze jeho množství regulovat škrcením sání ventilátoru, změnou otáček, popřípadě jeho vypínáním. Tuto regulaci zajišťuje provozní (regulační) termostat, který podle snímané teploty vody reguluje chod ventilátoru. Běžná je i kombinace mechanické a elektronické regulace, kdy regulátor tahu mechanicky škrtí sání ventilátoru a provozní

termostat ventilátor vypíná v případě dosažení požadované teploty vody v kotli. Běžná provozní teplota malých teplovodních kotlů se pohybuje v rozmezí 60 až 90 °C, a to je zpravidla i rozsah teplot, které lze nastavit na provozním termostatu. Po dosažení nastavené teploty se přívod vzduchu (i paliva u kotlů se samočinnou dodávkou paliva) přerušuje. Obnoví se automaticky v okamžiku, kdy teplota vody poklesne o určitou hodnotu, které se říká hystereze. [7]

2.4.7 Omezovač teploty

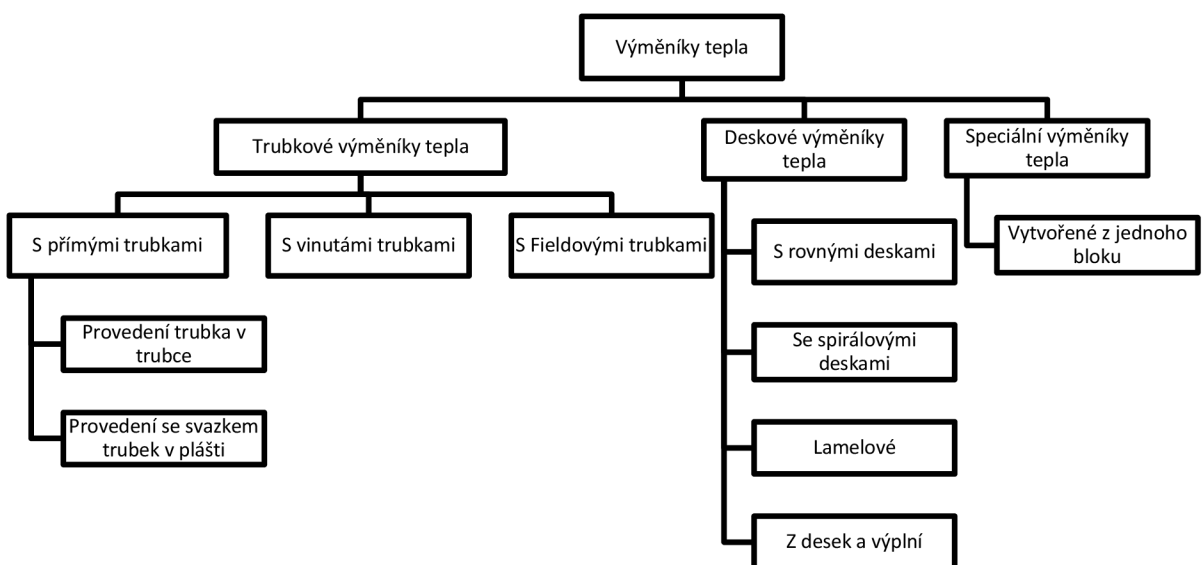
Omezovač teploty (s ručním obnovením provozu) je přístroj se samočinným řízením, který při dosažení nejvyšší mezní teploty vody vyvolá přerušení toku paliva nebo přívod spalovacího vzduchu; přívod může být obnoven po ručním zásahu obsluhy pouze tehdy, když teplota vody klesne pod mezní hodnotu. Je to součást kotlů s elektronickou regulací, jejíž běžnější označení je havarijní termostat. Provozní termostat dohlíží na to, aby teplota vody v kotli nepřekročila maximální provozní hodnotu (zpravidla 90 °C). Pokud teplota přesto vzrůstá, aktivuje se havarijní termostat, který v okamžiku, kdy je překročena maximální povolená teplota vody, která zpravidla bývá 95 °C. K tomuto havarijnímu stavu by v běžném provozu nemělo dojít. Jedná se zpravidla o vážnou závadu, proto lze tento termostat odblokovat pouze mechanicky obsluhou kotle, která musí přijít ke kotli a odstranit závadu (například pootevřená dvířka, která umožňují přísávání spalovacího vzduchu i po vypnutí ventilátoru). [7]

2.4.8 Bezpečnostní zařízení proti prošlehnutí plamene

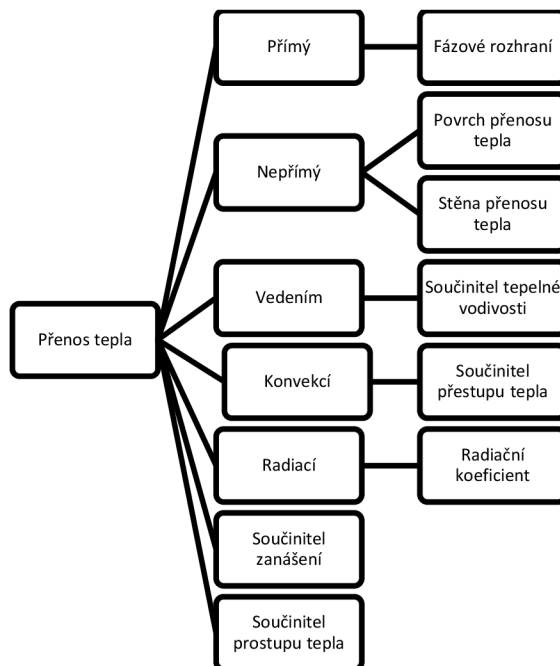
Jedno nebo více certifikovaných samočinných zařízení včetně hasicích zařízení, která zabrání prošlehnutí plamene. Hasicí zařízení se umísťuje do přívodu paliva nebo do zásobníku paliva. K tomuto účelu se využívá například turniketový podavač paliva

2.4.9 Výměník spaliny-voda

Výměníky tepla jsou zařízení sloužící k přenosu tepla mezi dvěma popř. i více látkami. Jsou základními jednotkami různých variant systémů pro výměnu tepla. Jejich úkolem je zabezpečit realizaci technologických procesů a operací vyžadujících ohřev nebo chlazení tekutin.

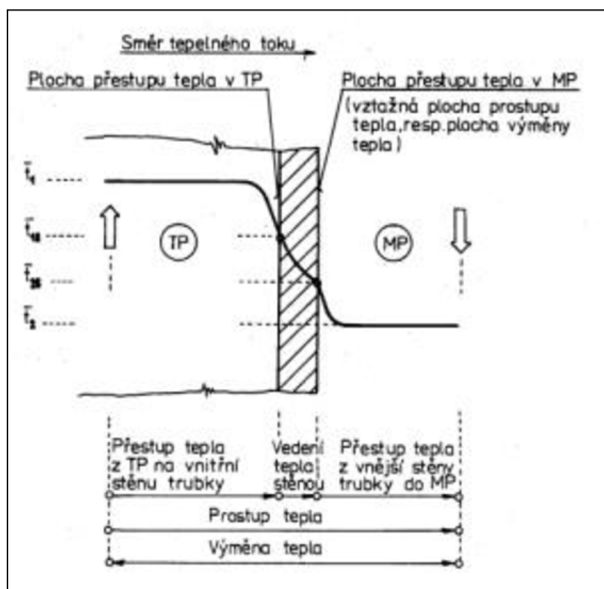


Přenos tepla ve výměnících představuje kombinovaný proces, na kterém se podílejí všechny druhy mechanismů přenosu tepla, tj. přirozená a nucená konvekce, radiace a vedení tepla. Nejčastěji používané výměníky jsou výměníky s konvektivní složkou přestupu tepla.



V této diplomové práci bude navržen trubkový výměník tepla. Proto zde bude uvedeno několik informací o trubkových výměnících tepla.

U trubkového výměníku tepla jde o celkový přenos tepla z trubkového prostoru do mezitrubkového a obráceně. V cestě tohoto celkového přenosu tepla se nachází vždy stěna trubky, tzn. V případě jednofázového toku pracovní látek se bude jednat o následující způsoby přenosu tepla (viz. obr.):



Tab. 2 - Prostu tepla stěnou trubky

1. Přestup tepla z pracovní látky TP na vnitřní stěnu trubky.
2. Vedení tepla trubkou z vnitřní na vnější stěnu trubky.
3. Přestup tepla z vnější stěny trubky do pracovní látky MP

Uvedené platí pro celkový přenos tepla z TP do MP, tzn. teplejší pracovní látka je v TP, jde tedy o jednoznačně definovaný směr tepelného toku.

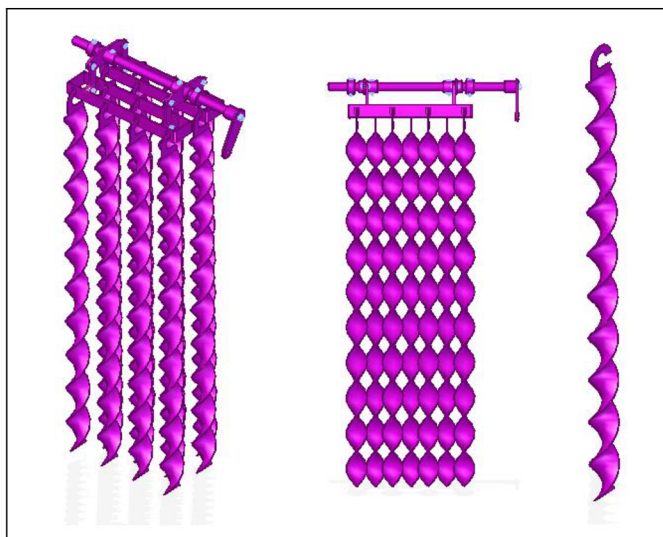
Tento celkový přenos tepla se nazývá prostup tepla a lze jej definovat součinitelem prostupu tepla, složeným z dílčích součinitelů jednotlivých přenosů tepla. Součinitel prostupu tepla není závislý na směru tepelného toku a je tak součinitelem, který obecně charakterizuje výměnu tepla.

U spalinových výměníků pro automatické kotle na pelety se uplatňuje i přenos tepla radiací, protože spaliny mají dostatečnou teplotu a obsahují víceatomové plynné složky. Jedná se tedy o kombinovaný přenos tepla radiací a konvekcí a je nutné uvažovat se superpozicí obou jevů.

Spalinový výměník u automatických kotlů na pelety může být souproudý, protiproudý nebo kombinovaný. Výměníky jsou obvykle dost tvarově složité, tvoří plášť kotle a ne vždy jsou trubkové. Proto je nelze jednoduchým obecným způsobem pojmenovat.

2.4.10 Turbulátory

Turbulátory nám podstatně zvyšují přestup tepla ve výměníku ze spalín do topné vody a umožňují snadné manuální, nebo automatické čištění výměníku.



Obr. 11 - Turbulátory

2.4.11 Bezpečnostní zařízení

Pojistný výměník tepla je zařízení pro odvedení přebytečného tepla z kotle, které omezí teplotu kotle na požadovanou nejvyšší hodnotu [2]. Jinak také tzv. dochlazovací smyčka má zabránit tomu, aby nemohlo dojít k přetopení kotle nad kritickou hranici 110 °C. Zpravidla jde o malý výměník tepla (nejčastěji trubkový) umístěný v horní části kotlového tělesa, přes termostatický ventil napojený na zdroj chladicí vody. Protože musí fungovat bez jakýchkoliv doplňkových zařízení a vnější energie, připadá jako zdroj chladicí vody prakticky jen vodovodní řád. Malé domácí vodárny jako zdroj chladicí vody jsou ohroženy možným přerušením činnosti při výpadku elektřiny. Termostatický ventil spustí ochlazování v okamžiku, kdy je překročena kritická teplota (> 95 °C). Smyčkou musí být vybaveny všechny kotle s ruční dodávkou paliva s uzavřenou otopnou soustavou. [7]

2.4.12 Vnější izolace kotle

Každý kotel musí mít tepelnou izolaci, která musí být odolná proti běžným mechanickým a tepelným namáháním. Musí být zhotovena z nehořlavého materiálu a nesmějí se z ní uvolňovat zdraví škodlivé látky. [10]









2.4.13 Zapalování

Zapalování kotlů na pelety může být provedeno dvěma způsoby:

- **Ruční zapalování** - Jak již název napovídá, u tohoto způsobu zapalování je nutná přítomnost obsluhy kotle. Po zapnutí regulace obsluha uvede do chodu dávkovač paliva do hořáku. Po nadávkování dostatečného množství pelet je dávkovač vypnut a na pelety je zpravidla přidán pevný podpalovač (nebo třísky) a je zapálen. Jakmile takovýmto způsobem vznikne na roštu základní vrstva nahořelých pelet, obsluha přepne regulaci do režimu „Provoz“ a spalování dále probíhá automaticky. Pokud hořák s ručním zapalováním přejde do režimu „Pohotovost“, nesmí dojít v průběhu tohoto režimu k úplnému vyhoření základní vrstvy paliva, protože v takovémto případě by se pro další přechod do režimu „Provoz“ musel hořák znovu ručně zapálit, což je nemyslitelné (ke střídání režimů dochází několikrát za den). Proto je regulace takovýchto hořáků opatřena funkcí, která zajistí, že po určité době trvání útlumu dávkovač přiloží na základní vrstvu minimální množství nového paliva, které se nechá rozhořet se zapnutým ventilátorem. Hořák po cca 2 minutách opět přejde do útlumu. Tato funkce se nazývá doba útlumového režimu, což je na regulaci nastavitelný časový úsek, po jehož uplynutí dojde k obnově základní vrstvy paliva. [6]
- **Automatické zapalování** - Zde název napovídá, že zapalování je plně pod kontrolou regulace hořáku a nevyžaduje zásah obsluhy. Regulace „nechá“ přiložit na rošt předem definované (nastavitelné) množství pelet a spustí zapalovač. U malých hořáků je to výhradně elektrické topné těleso. Výjimečně toto těleso zapaluje pelety přímým kontaktem, u většiny zapalovačů ohřívá topné těleso vzduch, který je poté vháněn na zapalovanou vrstvu pelet. Pro rychlé zapálení musí mít vzduch teplotu alespoň 500 °C, aby se rychle uvolnila prchavá hořlavina, ale především aby se vznal také pevný podíl hořlaviny. K ukončení zapalování slouží hlavně čidlo plamene, které zaregistruje plamen, u některých konstrukcí teplotní čidlo ve spalinovém hrdle, které měří zvýšení teploty a následně vyše signál řídicí jednotce pro ukončení spalování. [6]

2.5 Výrobci automatických kotlů na pelety

Výrobci je jak u nás v ČR, tak i ve světě mnoho, proto jsou v následující tabulce uvedeni pouze někteří. Tabulka také srovnává kotle na pelety o podobném výkonu jako bude mít kotel navržený.

Kotle na pelety 18,5 - 25 kW					
Výrobce		Viessmann	Guntamatic	Hargassnerr	Froling
Název		Vitoligno 300-P	Biostar-flex	Classic HSV22	P4 20
Jmenovitý výkon	kW	24	23	22	20
Účinnost	%	94,7	94,7	94,6	92
Třída kotle dle ČSN EN 303-5	-	3	5	5	5
Příkon	W	68	-	-	71
Hmotnost	kg	453	305	300	425
Obsah vodního prostoru	l	100	35	38	-
Teplosměnná plocha kotle	m ²	-	-	-	-
Doporučená provozní teplota topné vody	°C	75/60	-	75/60	75/60
Maximální provozní tlak	MPa	3	3	3	3
Teplota spalin	°C	125	-	-	-
Fotodokumentace					
Výrobce		Oko-fen	Ponast	Benekov	Atmos
Název		PE20	KP 12S	C 16 P	D21P
Jmenovitý výkon	kW	20	19,5	19	19,5
Účinnost	%	93	90,5	92,1	90,2
Příkon	W	-	173	42	42
Hmotnost	kg	350	310	336	231
Obsah vodního prostoru	l	64	103	62	56
Teplosměnná plocha kotle	m ²	-	-	1,9	1,7
Doporučená provozní teplota topné vody	°C	-	75/60	75/60	-
Maximální provozní tlak	MPa	3	3	3	3
Teplota spalin	°C	160	127	162	147
Fotodokumentace					

Tab. 3 - Výrobci kotlů

3 Vybrané legislativní části z normy ČSN EN 303-5

Tato evropská norma platí pro kotle pro ústřední vytápění, včetně bezpečnostních zařízení (součástí), do jmenovitého tepelného výkonu nejvýše 500 kW, které jsou navrženy pro spalování pouze pevných paliv a jsou provozovány v souladu s pokyny výrobce kotle.

Touto normou se musíme zabývat, protože cílem práce je konstrukční návrh automatického kotle na pelety a navržený kotel tuto normu musí plnit.

3.1 Obecné požadavky

Kotle musí odolávat provozním teplotám a jejich provoz musí být bezpečný. Musí být vyrobeny z nehořlavých materiálů podle EN 13501-1 a musí být odolné vůči deformacím. Musí být vyrobeny tak, aby:

- a) Odolávaly namáháním vznikajícím při běžném provozu
- b) Nenastalo přehřátí teplotosné látky (vody) v nebezpečném rozsahu ($\leq 110^{\circ}\text{C}$)
- c) Spaliny neunikaly v nebezpečném množství z kotle nebo ze zařízení pro dodávku paliva nebo ze zabudovaného zásobníku paliva do místa instalace nebo do přívodu paliva
- d) Plameny při náležitém provozu kotle nešlehaly ven a řeřavé uhlí nevypadávalo
- e) Se vyloučilo nebezpečné hromadění hořlavých plynů ($>5\%$ CO) ve spalovací komoře a v kouřovodu

Použití hořlavých materiálů je přípustné u:

- a) Vnitřních součástí řídicích přístrojů a bezpečnostních zařízení
- b) Ovládacích rukojetí
- c) Elektrického vybavení
- d) Součástí příslušenství
- e) Dodatečných nebo doplňujících vnějších optických krytů

Konstrukce kotle musí umožňovat snadnou manipulaci. Konstrukční části přístupné během používání a údržby musí být bez ostrých hran a rohů, které by mohly během používání nebo údržby způsobit poškození nebo zranění osob.

Motory a ventilátory musí být namontovány tak, aby byl minimalizovaný hluk a vibrace.

3.2 Požadavky na konstrukci

3.2.1 Výrobní dokumentace

Na výkresech nebo v příslušné dokumentaci musí být uvedeny alespoň dále uvedené informace:

- a) Specifikace materiálu
- b) Svařovací postup, typ svarového spoje a přídavné materiály pro svařování
- c) Nejvyšší dovolená provozní teplota, ve $^{\circ}\text{C}$
- d) Nejvyšší dovolený provozní tlak, v bar
- e) Zkušební tlak pro zkoušku typu, v bar
- f) Jmenovitý tepelný výkon nebo rozsah tepelného výkonu pro každou velikost kotle, v kW, v souladu s palivem doporučeným pro použití v daném kotli

3.2.2 Materiály ocelového kotlového tělesa

Vedle základních požadavků na provedení výkresů, svarových spojů a kontrolu výroby, je pro zákazníka asi nejdůležitější požadavek na použité materiály a nejmenší tloušťky stěn. Panuje totiž mylná představa, že ocelová kotlová tělesa musejí být vyrobené pouze z tzv. kotlové oceli. Tedy spíše panují mylné představy, že kotlovou ocelí jsou pouze vysoce legované oceli odolávající vysokým teplotám a tlakům. Ovšem tyto pracovní podmínky v řádech stovek °C a několika MPa panují ve velkých parních kotlech. Kotlová tělesa běžných teplovodních kotlů jsou namáhána nesrovnatelně méně, a proto na jejich výrobu stačí ocel s nižší odolností, a co je pro nabídku na trhu velmi významné, podstatně levnější. Jako o kotlových ocelích lze hovořit o všech materiálech uvedených v ČSN 42 0090 Materiály pro energetická zařízení. A zde je mezi plechy uveden materiál 11 373 (S235JR dle EN 100027), který je pravděpodobně nejpoužívanější „kotlovou“ ocelí pro výrobu malých teplovodních ocelových kotlů a je uveden také v normě ČSN EN 303-5 jako povolený materiál. [9]

3.2.3 Minimální tloušťky stěn

Minimální tloušťky stěn jsou uvedeny v následující tabulce a platí pro tlakem namáhané plechy, trubky a výkovky.

Jmenovitý tepelný výkon	Uhlíkové oceli					Korozivzdorná ocel a ocel chráněná proti korozi				
	a	b	c	d	e	a	b	c	d	e
kW	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
QN<100	5	4	3,2	3	4	3	2	1,5	2	3

Tab. 4 - Minimální tloušťky stěn kotle

Tloušťka stěny je důležitá nejen pro životnost kotlového tělesa z pohledu opaluvzdornosti a korozivzdornosti, ale také z hlediska tvarové stálosti stěn kotlového tělesa při vyšším provozním tlaku (vydutí stěn). Ovšem i zde jsou jisté limity. Čím menší je tloušťka stěny výměníku tepla, tím intenzivnější je také přenos tepla ze spalín do vody. Rozdíl v životnosti kotlových těles s vnitřními stěnami 6 mm a 8 mm není rozhodně tak velký, ovšem s rostoucí tloušťkou stěny se snižuje intenzita přenosu tepla, která by u správně navrženého kotle měla znamenat větší teplosměnnou plochu, a tím i těžší kotel.

3.2.4 Požadavky na návrh

- **Odvzdušnění vodních prostorů** - kotel a jeho součásti musí být navrženy tak, aby jejich jednotlivé vodní prostory mohly být řádně odzdušněny. Kotel musí být navržen tak, aby při běžném provozu v souladu s pokyny výrobce nenastal nepřijatelný var.
- **Kontrola plamene** – musí být zajištěno technické vybavení umožňující kontrolu plamene nebo vrstvy paliva. Jsou-li tímto technickým vybavením dvířka, pak kontrola musí být bezpečná. Doporučuje se průzor.
- **Přípojky kotle** – musí vyhovovat příslušným normám. Přípojky musí být uspořádány tak, aby byly snadno přístupné a aby funkce každé příslušné přípojky mohla být řádně plněna. Kolem přípojky musí být dostatečně velký prostor umožňující instalaci přípojovacích trubek s použitím nutného nářadí. Závitové trubkové přípojky větší jak 2 palce (DN50) se nedoporučují. Kotel musí mít alespoň jednu přípojku pro plnění a pro vypouštění. Tato přípojka může být společná. Rozměr přípojky musí být alespoň G ½ pro kotle do 70 kW.
- **Ponorné jímky pro regulační a indikační zařízení a pro bezpečnostní omezovače teploty** – kotel musí být vybaven alespoň jednou ponornou jímkou, která se používá

pro regulátor teplot, pro bezpečnostní omezovač teploty a pro teploměr. Požaduje-li se závitová trubková přípojka, musí být její minimální jmenovitý průměr $G \frac{1}{2}$. Ponorné jímký musí být navrženy tak, aby se vyloučila neúmyslná změna polohy snímače teploty. Poloha ponorné jímký musí být volena tak, aby nejvyšší teplota vody v kotli byla zaznamenána s dostatečnou přesností. Jestliže jsou na kotli doplňující přípojky pro bezpečnostní zařízení, např. hlídač tlaku, manometr, hlídač nízké hladiny vody nebo pojistný ventil, musí se jejich velikost (zejména velikost pojistného ventilu) stanovit podle výkonu kotle.

- **Zabudovaný zásobník paliva** – kotel se zabudovaným zásobníkem paliva musí být vyroben z nehořlavého materiálu podle EN 13501-2. Maximální objem zásobníku je 1,5 m³. Zásobník musí být navržen tak, aby se palivo volně pohybovalo až do vyprázdnění zásobníku.
- **Popelník** – objem popelníku musí při použití stanoveného paliva a při jmenovitém tepelném výkonu odpovídat době hoření nejméně 12 hodin. Popelník musí být navržen tak, aby se palivo volně pohybovalo až do vyprázdnění zásobníku.

3.3 Bezpečnostní požadavky

Případná nebezpečí vyvolaná kotlem, včetně provozu otopné soustavy a jakéhokoli zařízení pro dodávku paliva musí být vyloučena buď konstrukčními opatřeními, nebo použitím bezpečnostních zařízení. Bezpečnost musí být zajištěna i v případě možných poruch samotného bezpečnostního zařízení.

Výrobce musí provést posouzení rizika zahrnující všechna případná nebezpečí kotle a opatření, jak je vyloučit nebo řídit bezpečným způsobem. Posouzení rizik provádět dle normy EN ISO 12100.

3.3.1 Tepelná vodivost

Teplota povrchu zařízení pro dodávku paliva kotle (bez tepelné izolace) nebo zabudovaného zásobníku paliva nesmí v žádném provozním stavu ani v případě poruchy překročit 85°C.

Vyhovujícím řešením proti přehřátí v zařízení pro dodávku paliva vlivem tepelné vodivosti jsou:

- Hasicí zařízení, např. vodní sprinklerové zařízení pro dodávku paliva bez přeplnění kotle, které reaguje pod 95 °C.
- Nouzové zařízení pro vyprázdnění zařízení pro dodávku paliva bez přeplnění kotle, které reaguje pod 95 °C.
- Zařízení pro dodávku paliva, které je chlazeno vodním okruhem a teplota vody je omezena pojistkou.

Vyhovujícími řešeními proti přehřátí v zabudovaném zásobníku paliva vlivem tepelné vodivosti v kombinaci s vyhovujícím řešením u zařízení pro dodávku paliva jsou:

- Hasicí zařízení přímo v zásobníku paliva, např. vodní sprinklerové zařízení a bezpečnostní omezovač teploty nastavený na maximální hodnotu 95 °C.
- Dostatečná izolace zásobníku paliva od horkých částí kotle.
- Přirozeně větraný prostor mezi zásobníkem paliva a tělesem kotle.

3.3.2 Zpětné proudění hořlavých spalin do palivového potrubí nebo do zabudovaných zásobníků paliva

Množství hořlavých spalin nebo kritické množství energie, které vznítí dřevo (např. jiskry nebo horké plyny), nesmí proniknout přes konstrukční opatření nebo bezpečnostní zařízení do palivového potrubí nebo do zásobníku paliva.

Vyhovujícím řešením proti zpětnému proudění v palivovém potrubí jsou:

- Bezpečnostní zařízení pro trvalé utěšňování mezi zařízením pro dodávku paliva a přívodním potrubím, např. komorový podavač.
- Bezpečnostní zařízení pro utěšnění palivového potrubí nikoli v průběhu dodávky paliva, ale v průběhu všech ostatních fází provozu (např. víkem) v kombinaci s kotlem provozovaným s podtlakem (požadavky na těsnost v uzavřeném stavu identické s bezpečnostními zařízeními pro trvalé utěšňování).
- Těsné víko zásobníku paliva v kombinaci s vyrovnáváním tlaku při běžném provozu a v případě spouštění. Difuze horkých plynů do zásobníku paliva se musí vyloučit přípojkou pro vyrovnávání tlaku mezi přívodem spalovacího vzduchu a zásobníkem paliva. Rozměr přípojky musí být dostatečný pro vyrovnání tlaku mezi přívodem spalovacího vzduchu a zásobníkem paliva, nikoli však pro zrychlení šíření ohně. Víko zásobníku musí být vybaveno bezpečnostním spínačem, který v případě otevřeného víka zastaví přívod spalovacího vzduchu.
- Těsné víko zásobníku paliva v kombinaci s provozem kotle při podtlaku, difuze horkých plynů do zásobníku paliva se musí vyloučit přirozeným tahem. Víko zásobníku musí být vybaveno bezpečnostním spínačem, který v případě otevřeného víka zastaví přívod spalovacího vzduchu.

3.3.3 Šíření ohně (prošlehnutí plamene) do palivového potrubí nebo do zabudovaného zásobníku paliva.

Musí se zamezit šíření plamene do palivového potrubí nebo do zabudovaného zásobníku paliva v jakémkoli provozním stavu nebo v případě jakékoli poruchy. Nezahrnuje to tepelnou reakci malého množství paliva na konci zařízení pro dodávku paliva, jestliže v palivovém potrubí neexistuje žádná další reakce.

Vyhovujícím řešením pro zabránění šíření ohně do palivového potrubí jsou:

- Hasicí zařízení, např. vodní sprinklerové zařízení a bezpečnostní omezovač teploty nastavený na maximální hodnotu 95 °C.
- Bezpečnostní zařízení pro trvalé utěšnění přívodního potrubí a s dostatečnou vzdáleností a průřezem bez paliva (např. komorový podavač, rotační vzduchová uzávěra) v kombinaci s konstrukčním opatřením vylučujícím přeplnění.
- Bezpečnostní zařízení (např. víko) pro utěšnění palivového potrubí nikoli v průběhu dodávky paliva, ale v průběhu všech ostatních etap provozu v kombinaci s kotlem provozovaným při podtlaku. V kombinaci s konstrukčním opatřením vylučujícím přeplnění a s dostatečnou vzdáleností a průřezem paliva.
- Nouzové zařízení pro vyprázdnění zařízení pro dodávku paliva bez přeplnění kotle.

- Šikmý šnekový dopravník v kombinaci s palivovým skluzem do spalovací komory.

3.3.4 Bezpečnost proti přeplnění kotle palivem nebo přerušení dodávky paliva

V průběhu spouštění a nepřetržitého provozu kotle při rychlosti dodávky paliva ze zařízení pro dodávku paliva nastavené na maximální výkon nebo při zastavení zařízení pro dodávku paliva nesmí vzniknout nebezpečný stav.

V průběhu zapalování musí bezpečnostní zařízení v případě nevyhovujícího nebo žádného spalovacího procesu přerušit dodávku paliva, a to po uplynutí bezpečné doby, kterou musí stanovit výrobce pro funkci spouštění hořáku. Porucha bezpečnostního zařízení pro zjišťování nevyhovujícího spalovacího procesu nesmí vést ke vzniku nebezpečného stavu.

3.3.5 Teploty povrchu

Teplota povrchu na vnější straně kotle (včetně dna a dvířek, avšak vyjma vnějších součástí pro odvod spalin a otvorů pro údržbu kotlů s přirozeným tahem) nesmí při zkouškách překročit teplotu místnosti o více než 60 K. Požadavek týkající se dna není aplikovatelný, jestliže například výrobce stanoví, že se kotel musí instalovat na nehořlavé podlaze.

Při zkouškách nesmí teplota povrchu ovládacích rukojetí a všech částí, kterých se bude obsluha během provozu kotle dotýkat, překročit teplotu místnosti o více než tyto hodnoty:

- 35 K – u kovů a podobných materiálů
- 45 K – u porcelánu a podobných materiálů
- 60 K – u plastů a podobných materiálů

3.3.6 Příslušenství (výstroj) kotle pro ústřední vytápění

Jestliže výrobce vybaví kotel dodatečnými armaturami vyžadujícími údržbu, aby byl zajištěn spolehlivý provoz a bezpečnost kotle, má konstrukce zajišťovat snadný přístup bez rozsáhlé demontáže.

Elektrická bezpečnost kotle a rozhraní (např. konektory) mezi řídicími přístroji musí být v souladu s EN 60335-2-102.

Dokumentování elektrických přípojek pro jednotlivé komponenty musí být provedeno schématem elektrického zapojení a montážním schématem.

3.4 Požadavky na výkon kotle

Dále uvedené požadavky na výkon kotle musí být ověřovány při zkouškách s příslušným zkušebním palivem specifikovaným v normě ČSN EN 303-5. Tato paliva se volí tak, aby reprezentovala doporučené palivo, které je schváleno pro spalování v daném kotli.

Požadavky na účinnost kotle a na emisní limity jsou rozděleny do tří tříd. Aby byly splněny požadavky pro danou třídu, musí být dodrženy všechny mezní hodnoty účinnosti a emisí pro danou třídu.

3.4.1 Účinnost kotle

Účinnost kotle při zkouškách nesmí být při jmenovitém tepelném výkonu menší, než je dáno rovnicí na obrázku. U kotlů nad 100 kW je požadavek pro třídu 4 dán při 84 % a pro třídu 5 je dán při 89 %. U kotlů nad 300 kW je požadavek pro třídu 3 dán při 82%.

Třída 5 $Q < 100$ kW

$$\eta_K = 87 + \log Q \text{ [%]} \quad (1)$$

Třída 4 $Q < 100$ kW

$$\eta_K = 80 + \log Q \text{ [%]} \quad (2)$$

Třída 3 $Q < 300$ kW

$$\eta_K = 67 + \log Q \text{ [%]} \quad (3)$$

3.4.2 Teplota spalin

U kotlů, které jsou provozovány při jmenovitém tepelném výkonu s teplotou spalin méně než 160 K nad teplotou okolního prostředí, musí výrobce kotle uvést doporučení pro instalaci kouřovodu, aby byl zajištěn dostatečný tah a aby se zabránilo vzniku kondenzátu a sazení v celém komínu.

3.4.3 Minimální tepelný výkon

U kotlů se samočinnou dodávkou paliva nesmí minimální tepelný výkon překročit 30 % jmenovitého tepelného výkonu. Tento požadavek týkající se omezení maximálního tepelného výkonu musí být zajištěn samočinně řídicím přístrojem.

Regulace dodávky paliva a/nebo přívodu spalovacího vzduchu může být buď plynulá, nebo přerušovaná.

3.4.4 Mezní hodnoty emisí

Při spalování musí být hodnoty emisí nízké. Dle emisí se kotle řadí do tří tříd. Kotel musí danou emisní třídu splňovat jak při jmenovitém výkonu, tak i při částečném zatížení.

Dodávka paliva	Palivo	Jmenovitý tepelný výkon	Mezní hodnoty emisí								
			CO			OGC			prach		
		mg/m ³ při 10% O ₂									
		kW	Třída								
3	4		5	3	4	5	3	4	5		
samočinná	biopaliva	≤ 50	3000	1000	500	100	30	20	150	75	60

Tab. 5 - Mezní hodnoty emisí

4 Výpočet automatického kotle na pelety [11] [12]

4.1 Zadání

V této kapitole je proveden návrh automatického kotle spalujícího dřevní pelety s tepelným výkonem 20 kW. Kotel by měl být výrobně jednoduchý a levný. Měl by plnit emisní třídu 5 dle normy ČSN EN 303-5. Hořák kotle by měl umožnit spalování jak velmi kvalitních pelet typu A1, tak i pelety typu B. Tyto poslední dva požadavky nejsou podmínkou a budou ověřeny až v případě, že dojde k realizaci kotle a jeho zkušebnímu provozu. V následující tabulce jsou uvedeny základní parametry, které by měl kotel splňovat.

Název	Značka		Hodnota	Jednotka
Jmenovitý výkon kotle	P_N	=	20	kW
Minimální výkon kotle	P_{min}	=	6	kW
Součinitel přebytku vzduchu	α	=	1,7	-
Teplota spalin před výměníkem	t_{22}	=	950	°C
Teplota spalin za výměníkem	t_{21}	=	130	°C
Teplota topné vody	t_{12}	=	80	°C
Teplota vratné vody	t_{11}	=	65	°C

Tab. 6 - Parametry kotle

Název	Značka		Hodnota	Jednotka
Vlhkost okolí	φ	=	70	%
Teplota okolí	$t_{okolí}$	=	20	°C
Parciální tlak vodní páry	p^c	=	2,337	kPa
Tlak okolí	p_c	=	101,325	kPa

Tab. 7 - Vlastnosti okolí

4.2 Vstupní parametry paliva (pelet)

V následující tabulce jsou uvedeny vlastnosti pelet, které budou použity pro výpočet. Tyto vlastnosti byly zvoleny na základě zprůměrování několika rozborů pelet. Tyto rozborů byly provedeny autorizovanou firmou TUV NORD Czech, s.r.o. se sídlem v Brně. Pod následující tabulkou je zobrazen jeden ze zkušebních protokolů.

Průměr	D_{pel}	=	6	mm
Délka	L_{pel}	=	15	mm
Sypná hmotnost	m_{pel}	=	722	kg/m ³
Prchavá hořlavina	v_{daf}	=	80	%
Obsah vody	W_r	=	10	%
Obsah popele	A_r	=	1	%
Uhlík C	C_r	=	51	%
Kyslík O	O_r	=	42	%
Vodík H	H_r	=	6	%
Dusík N	N_r	=	1	%
Síra veškerá S	S_r	=	0,02	%
Celkový chlór	C_{lr}	=	0,01	%
Procento popílku v úletu	X_p	=	0,8	%
Teplota deformace popele	t_D	=	1260	°C
Výhřevnost	Q_{ir}	=	17,2	MJ/kg

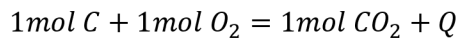
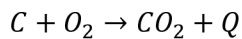
Spalné teplo	Q_{nr}	=		MJ/kg
Tepelná kapacita sušiny	C_{SU}	=	1,724	kJ/kgK

Tab. 8 - Složení výpočtového paliva

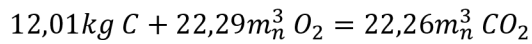
Vzorek / Probe / Sample: Dřevní pelety / Holzpellets / Wood pellets						
Vlastnost Eigenschaft Property	Jednotka Einheit Unit	Vzorek v původním stavu (r) Probe im gelieferten Zustand Sample as received	Vzorek bezvodý (d) Wasserfreie Probe Water-free sample	Nejistoty měření ± (%) Messunsicherheiten Uncertainty of measurement	Specifikace Spezifikation Specification EN 14981-2, ENplus- A1	
Voda celková Gesamtwasser Total water	% (m/m)	5,28	-	1,54	≤ 10	
Popel při 550 °C Aasche bei Ash at	% (m/m)	0,26	0,27	0,24	≤ 0,7	
Spalné teplo při 25 °C Verbrennungswärme bei Gross calorific value at	MJ/kg	18,830	19,880	-	-	
Výhřevnost při 25 °C Brennstoffwert bei Net calorific value at	MJ/kg	17,452	18,562	0,40	16,5≤Q≤19	
Vodík H Kohlenwasserstoff Hydrogen	% (m/m)	5,89	6,01	1,92	-	
Dusík N Stickstoff Nitrogen	% (m/m)	0,15	0,16	5,85	≤ 0,3	
Síra veškerá S _t Gesamtschwefel Total sulphur	% (m/m)	0,01	0,01	5,08	≤ 0,03	
*Celkový chlor Cl Gesamchlor Total chlorine	% (m/m)	-	0,001	20	≤ 0,02	
Sypná hmotnost Schüttmasse Bulk density	kg/m ³	722	-	3,01	≥ 600	
Rozměry Abmessung Dimension	Průměr D Durchmesser Diameter	mm	6	-	1,52	6 (± 1)
	Délka L Länge Length	mm	15	-	1,52	3,15≤L≤40
Mechanická odolnost DU Mechanische Widerstandsfestigkeit Mechanical durability	% (m/m)	97,89	-	0,33	≥ 97,5	
Jemné částice Feine Teilchen Amount of fines	% (m/m)	0,08	-	1,87	≤ 1	

Obr. 12 - Protokol o měření dřevních pelet

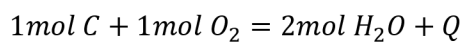
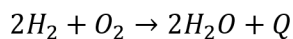
4.3 Základní spalovací rovnice



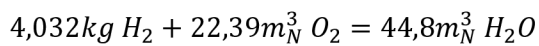
$$12,01 \text{ kg } C + 32 \text{ kg } O_2 = 44,01 \text{ kg } CO_2 + 407260 \text{ kJ} \quad (4)$$



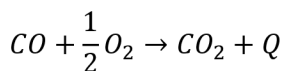
$$1 \text{ kg } C + 1,865 \text{ m}_N^3 O_2 = 1,854 \text{ m}_N^3 CO_2 + 33910 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$



$$4,032 \text{ kg } H_2 + 32 \text{ kg } O_2 = 36,032 \text{ kg } H_2O + 486179 \text{ kJ} \quad (5)$$

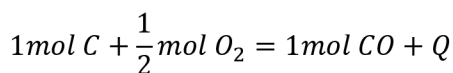
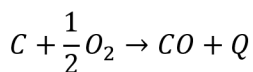


$$1 \text{ kg } H_2 + 5,553 \text{ m}_N^3 O_2 = 11,11 \text{ m}_N^3 H_2O + 120580 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

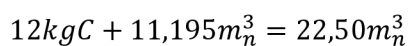


$$1 \text{ mol } CO + \frac{1}{2} \text{ mol } O_2 = 1 \text{ mol } CO_2 + Q \quad (6)$$

$$28,01 \text{ kg } CO + 16 \text{ kg } O_2 = 44,01 \text{ kg } CO_2 + 255349 \text{ kJ}$$



$$12 \text{ kg } C + 16 \text{ kg } O_2 = 28 \text{ kg } CO + 151866 \text{ kJ} \quad (7)$$



$$1 \text{ kg } C + 0,932 \text{ m}_N^3 = 1,873 \text{ m}_N^3 + 12654 \text{ kJ/kg}$$

4.4 Stechiometrické výpočty

4.4.1 Minimální objemy vzduchu a spalín z prvkového rozboru paliva

Minimální množství kyslíku pro spálení 1 kg paliva

$$O_{O_2min} = \frac{22,39}{100} \cdot \left(\frac{C^r}{12,01} \cdot \frac{H_2^r}{4,032} \cdot \frac{S_{prch}^r}{32,06} \cdot \frac{O_2^r}{32} \right)$$

$$O_{O_2min} = \frac{22,39}{100} \cdot \left(\frac{51}{12,01} \cdot \frac{6}{4,032} \cdot \frac{0,02}{32,06} \cdot \frac{42}{32} \right) \quad (8)$$

$$O_{O_2min} = 0,990 [m_N^3/kg]$$

Minimální objem suchého vzduchu potřebný pro dokonalé spálení 1 kg paliva

$$O_{VZmin}^S = \frac{100}{21} \cdot O_{O_2min}$$

$$O_{VZmin}^S = \frac{100}{21} \cdot 0,990 \quad (9)$$

$$O_{VZmin}^S = 4,715 [m_N^3/kg]$$

Součinitel vlhkosti

$$f = 1 + \varphi \cdot \frac{p'}{p_c - p'}$$

$$f = 1 + \frac{70}{100} \cdot \frac{2,3368}{101,325 - 2,3368} \quad (10)$$

$$f = 1,0164 [-]$$

Předpokládáme prostředí s běžnými klimatickými podmínkami:

Teplota prostředí	t _{PR}	=	20	°C
Vlhkost prostředí	φ	=	70	%
Parciální tlak vodní páry	p''	=	2,3368	kPa
Tlak okolí	p _c	=	101,325	kPa

Minimální objem vlhkého vzduchu potřebný pro dokonalé spálení 1 kg paliva

$$O_{VZmin} = f \cdot O_{VZmin}^S$$

$$O_{VZmin} = 1,0164 \cdot 4,715 \quad (11)$$

$$O_{VZmin} = 4,793 [m_N^3/kg]$$

Objem oxidu uhličitého ve spalínách

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

$$O_{CO_2} = \frac{22,26}{100} \cdot \frac{51}{12,01} + 0,0003 \cdot 4,715$$

$$O_{CO_2} = 0,947 [m_N^3/kg]$$

Objem oxidu siřičitého

$$O_{SO_2} = \frac{21,89}{100} \cdot \frac{S_{prch}^r}{32,06}$$

$$O_{SO_2} = \frac{21,89}{100} \cdot \frac{0,02}{32,06} \quad (13)$$

$$O_{SO_2} = 0,0001 [m_N^3/kg]$$

Objem dusíku

$$O_{N_2} = \frac{22,4}{100} \cdot \frac{N^r}{28,016} + 0,7805 \cdot O_{VZmin}^S$$

$$O_{N_2} = \frac{22,4}{100} \cdot \frac{1}{28,016} + 0,7805 \cdot 4,715 \quad (14)$$

$$O_{N_2} = 3,688 [m_N^3/kg]$$

Objem argonu

$$O_{Ar} = 0,0092 \cdot O_{VZmin}^S$$

$$O_{Ar} = 0,0092 \cdot 4,715 \quad (15)$$

$$O_{Ar} = 0,0424 [m_N^3/kg]$$

Minimální objem suchých spalín

$$O_{SPmin}^S = O_{CO_2} + O_{SO_2} + O_{N_2} + O_{Ar}$$

$$O_{SPmin}^S = 0,947 + 0,0001 + 3,688 + 0,0424 \quad (16)$$

$$O_{SPmin}^S = 4,679 [m_N^3/kg]$$

Vznikne dokonalým spálením paliva při minimálním množství vzduchu, tj bez přebytku vzduchu.

Objem vodní páry v minimálním objemu vlhkých spalín

$$O_{H_2Omin} = \frac{44,8}{100} \cdot \frac{H_2^r}{4,032} \cdot \frac{22,4}{100} \cdot \frac{W_t^r}{18,016} + (f - 1) \cdot O_{VZmin}^S$$

$$O_{H_2Omin} = \frac{44,8}{100} \cdot \frac{6}{4,032} \cdot \frac{22,4}{100} \cdot \frac{10}{18,016} + (1,016 - 1) \cdot 4,715 \quad (17)$$

$$O_{H_2Omin} = 0,868 [m_N^3/kg]$$

Minimální objem vlhkých spalin

$$O_{SPmin} = O_{SPmin}^S + O_{H_2Omin}$$

$$O_{SPmin} = 4,679 + 0,868 \quad (18)$$

$$O_{SPmin} = 5,547 [m_N^3/kg]$$

4.5 Objemy vzduchu a spalin

Skutečné hodnoty množství spalovacího vzduchu a vzniklých spalin závisí na součiniteli přebytku vzduchu α , který závisí na typu kotle a druhu paliva.

4.5.1 Množství vzduchu a spalin

Skutečné množství vzduchu potřebné pro spálení 1 kg paliva

$$O_{VZskut}^S = \alpha \cdot O_{VZmin}^S$$

$$O_{VZskut}^S = 1,7 \cdot 4,715 \quad (19)$$

$$O_{VZskut}^S = 8,148 [m_N^3/kg]$$

Skutečné množství vlhkých spalin po spálení 1 kg paliva

$$O_{SP} = O_{SPmin} + (\alpha - 1) \cdot O_{VZmin}$$

$$O_{SP} = 5,547 + (1,7 - 1) \cdot 4,7928 \quad (20)$$

$$O_{SP} = 8,902 [m_N^3/kg]$$

Skutečné množství vodní páry po spálení 1 kg paliva

$$O_{H_2O} = O_{H_2Omin} + (f - 1) \cdot (\alpha - 1) \cdot O_{VZmin}^S$$

$$O_{H_2O} = 0,868 + (1,016 - 1) \cdot (1,7 - 1) \cdot 4,7154 \quad (21)$$

$$O_{H_2O} = 0,9234 [m_N^3/kg]$$

Objemové části tříatomových plynů

$$r_{RO_2} = \frac{O_{SO_2} + O_{CO_2}}{O_{SP}}$$

$$r_{RO_2} = \frac{0,0001 + 0,9467}{8,902} \quad (22)$$

$$r_{RO_2} = 0,106 [-]$$

$$r_{H_2O} = \frac{O_{H_2O}}{O_{SP}}$$

$$r_{H_2O} = \frac{0,923}{8,902} \quad (23)$$

$$r_{H_2O} = 0,104 [-]$$

$$r_{SP} = r_{RO_2} + r_{H_2O}$$

$$r_{SP} = 0,106 + 0,104 \quad (24)$$

$$r_{SP} = 0,210 [-]$$

Stanovení koncentrace popílku ve spalinách

$$\mu = \frac{10 \cdot A^r}{O_{SP}} \cdot \frac{x_U}{100}$$

$$\mu = \frac{10 \cdot 1}{8,902} \cdot \frac{0,8}{100} \quad (25)$$

$$\mu = 0,09 [gNm^{-3}]$$

Podíly složek celkových spalin

$$\omega_{ss,CO_2} = \frac{O_{CO_2}}{O_{SVmin}}$$

$$\omega_{ss,CO_2} = \frac{0,947}{5,547} \quad (26)$$

$$\omega_{ss,CO_2} = 0,171 [-]$$

$$\omega_{ss,SO_2} = \frac{O_{SO_2}}{O_{SVmin}}$$

$$\omega_{ss,SO_2} = \frac{0,0001}{5,547} \quad (27)$$

$$\omega_{ss,SO_2} = 0,00003 [-]$$

$$\omega_{ss,N_2} = \frac{O_{N_2}}{O_{SVmin}}$$

$$\omega_{ss,N_2} = \frac{3,688}{5,547} \quad (28)$$

$$\omega_{ss,N_2} = 0,665 [-]$$

$$\omega_{ss,Ar} = \frac{O_{Ar}}{O_{SVmin}}$$

$$\omega_{ss,Ar} = \frac{0,043}{5,547} \quad (29)$$

$$\omega_{ss,Ar} = 0,008 [-]$$

$$\omega_{ss,H_2O} = \frac{O_{H_2O}}{O_{SVmin}}$$

$$\omega_{ss,H_2O} = \frac{0,868}{5,547} \quad (30)$$

$$\omega_{ss,H_2O} = 0,157[-]$$

Pro kontrolu musí platit, že součet všech podílů složek se rovná jedné.

$$\omega_{ss,CO_2} + \omega_{ss,SO_2} + \omega_{ss,N_2} + \omega_{ss,Ar} + \omega_{ss,H_2O} = 1$$

$$0,171 + 0,00003 + 0,665 + 0,008 + 0,157 = 1 = 1 \text{ **Kontrola je ověřena.**} \quad (31)$$

Hustota vzduchu

$$\rho_{VV} = \frac{O_{VSmin} \cdot \rho_{VS} + (f - 1) \cdot O_{VSmin} \cdot \rho_{H_2O}}{O_{VVmin}}$$

$$\rho_{VV} = \frac{4,715 \cdot 1,293 + (1,016 - 1) \cdot 4,715 \cdot 0,806}{4,793} \quad (32)$$

$$\rho_{VV} = 1,285 [kg/m^3]$$

Hustota stechiometrických spalín

Molární hmotnost M_i , hustota ρ_i , měrný objem v_i a měrná (hmotnostní) plynová konstanta R_i pro některé plynné složky spalín a vzduchu				
Plyn	M_i	ρ_i	v_i	R_i
	(kg/kmol)	(kg/m ³)	(m ³ /kg)	(J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)
Ar	39,944	1,783850	0,560585	208,14
H₂	2,016	0,089867	11,127555	4124,00
O₂	32,000	1,428910	0,699835	259,80
N₂	28,010	1,250470	0,799670	296,80
CO	28,000	1,250600	0,799616	296,90
suchý vzduch	28,960	1,292790	0,773521	287,12
vodní pára	18,016	0,805800	1,241003	461,50
CO₂	44,010	1,976800	0,505868	188,90
SO₂	64,060	2,926200	0,341740	129,80
NH₃	17,034	0,761000	1,314060	488,00
CH₄	16,032	0,716000	1,396648	518,60

Tab. 9 - Charakteristika plynných složek spalín a vzduchu

$$\rho_{SVmin} = \omega_{ss,CO_2} \cdot \rho_{CO_2} + \omega_{ss,SO_2} \cdot \rho_{SO_2} + \omega_{ss,N_2} \cdot \rho_{N_2} + \omega_{ss,Ar} \cdot \rho_{Ar} + \omega_{ss,H_2O} \cdot \rho_{H_2O}$$

$$\rho_{SVmin} = 0,171 \cdot 1,977 + 0,0003 \cdot 2,926 + 0,665 \cdot 1,251 + 0,008 \cdot 1,784 + 0,157 \cdot 0,806 \quad (33)$$

$$\rho_{SVmin} = 1,309 [kg/m^3]$$

Hustota spalin s přebytkem vzduchu

$$\rho_{SV} = \frac{O_{SVmin} \cdot \rho_{SVmin} + (\alpha - 1) \cdot O_{VVmin} \cdot \rho_{VV}}{O_{SVmin} + (\alpha - 1) \cdot O_{VVmin}}$$

$$\rho_{SV} = \frac{5,547 \cdot 1,309 + (1,7 - 1) \cdot 4,793 \cdot 1,285}{5,547 + (1,7 - 1) \cdot 4,793} \quad (34)$$

$$\rho_{SV} = 1,299 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

Tepelná kapacita spalin

Střední měrné tepelné kapacity spalin							
t	c _p						c _p spalin
°C	kJ/m ³ K						kJ/m ³ K
	O ₂	N ₂	CO ₂	CO	SO ₂	vodní pára	spaliny
0	1,304	1,295	1,601	1,301	1,779	1,493	1,368
100	1,319	1,295	1,700	1,302	1,863	1,506	1,387
200	1,337	1,299	1,786	1,311	1,943	1,523	1,407
300	1,357	1,307	1,863	1,319	2,001	1,543	1,428
400	1,377	1,317	1,930	1,331	2,073	1,565	1,450
500	1,397	1,328	1,989	1,344	2,123	1,589	1,471
600	1,416	1,340	2,042	1,361	2,169	1,615	1,493
700	1,434	1,353	2,089	1,373	2,206	1,641	1,513
800	1,450	1,366	2,131	1,390	2,224	1,668	1,534
900	1,465	1,379	2,169	1,403	2,274	1,696	1,553
1000	1,479	1,392	2,203	1,415	2,294	1,723	1,571
1100	1,491	1,404	2,235	1,440	2,340	1,750	1,589
1200	1,502	1,415	2,263	1,440	2,340	1,777	1,605

Tab. 10 - Tepelná kapacita spalin

$$c_{pstř} = c_{p0} + (t_{spstř} - t_0) \cdot \frac{c_{p1} - c_{p0}}{t_1 - t_0}$$

$$c_{pstř} = 1471,4 + (540 - 500) \cdot \frac{1492,6 - 1471,4}{600 - 500} \quad (35)$$

$$c_{pstř} = 1479,89 \text{ [J/m}^3 \cdot \text{K]}$$

Prandtlovo číslo spalin

Fyzikální charakteristiky spalin středního složení			
t	ϑ_{stř}	λ_{stř}	Pr_{stř}
(°C)	(m ² /s)	(W/mK)	(-)
0	0,0000119	0,0228	0,74
100	0,0000208	0,0319	0,70
200	0,0000316	0,0401	0,67
300	0,0000439	0,0484	0,65
400	0,0000578	0,0570	0,64
500	0,0000730	0,0656	0,62
600	0,0000894	0,0742	0,61
700	0,0001070	0,0827	0,60
800	0,0001260	0,0915	0,59
900	0,0001460	0,1000	0,58
1000	0,0001670	0,1090	0,58
1100	0,0001880	0,1180	0,57
1200	0,0002110	0,1260	0,56
1300	0,0002340	0,1350	0,55

Tab. 11 - Fyzikální charakteristiky spalin

$$Pr_{stř} = Pr_0 + (t_{spstř} - t_0) \cdot \frac{Pr_1 - Pr_0}{t_1 - t_0}$$

$$Pr_{stř} = 0,62 + (540 - 500) \cdot \frac{0,61 - 0,62}{600 - 500} \quad (36)$$

$$Pr_{stř} = 0,616 [-]$$

Tepelná vodivost spalin

$$\lambda_{stř} = \lambda_0 + (t_{spstř} - t_0) \cdot \frac{\lambda_1 - \lambda_0}{t_1 - t_0}$$

$$\lambda_{stř} = 0,0656 + (540 - 500) \cdot \frac{0,0742 - 0,0656}{600 - 500} \quad (37)$$

$$\lambda_{stř} = 0,069 [W/m \cdot K]$$

Kinematická viskozita spalin

Dynamická viskozita a tepelná vodivost plynů a vodní páry				
t	N2	CO2	Vodní pára	Spaliny
°C	Pa/s	Pa/s	Pa/s	Pa/s
0	0,00001660	0,00001384	0,00000817	0,00001468
100	0,00002100	0,00001844	0,00001208	0,00001900
200	0,00002477	0,00002260	0,00001604	0,00002284
300	0,00002810	0,00002640	0,00002000	0,00002632
400	0,00003120	0,00002990	0,00002390	0,00002959
500	0,00003405	0,00003315	0,00002771	0,00003264
600	0,00003665	0,00003620	0,00003145	0,00003547
700	0,00003910	0,00003906	0,00003510	0,00003816
800	0,00004140	0,00004135	0,00003865	0,00004064
900	0,00004361	0,00004475	0,00004210	0,00004323
1000	0,00004574	0,00004679	0,00004546	0,00004552
1100	0,00004775	0,00004915	0,00004875	0,00004777
1200	0,00004970	0,00005140	0,00005195	0,00004995

Tab. 12 - Dynamická viskozita spalin

$$\eta_{stř} = \vartheta_0 + (t_{spstř} - t_0) \cdot \frac{\eta_1 - \eta_0}{t_1 - t_0}$$

$$\eta_{stř} = 0,00003264 + (540 - 500) \cdot \frac{0,00003547 - 0,00003264}{600 - 500} \quad (38)$$

$$\eta_{stř} = 3,4 \cdot 10^{-5} [m^2/s]$$

Měrná tepelná kapacita vlhkého paliva

$$c_{pV} = c_{voda} \cdot w^r + c_{SU} \cdot (1 - w^r)$$

$$c_{pV} = 4,19 \cdot 10 + 1,724 \cdot (1 - 10) \quad (39)$$

$$c_{pV} = 1,971 [kJ/kgK]$$

Fyzické teplo paliva

$$i_{pV} = c_{pv} \cdot t_p$$

$$i_{pV} = 1,971 \cdot 15 \quad (40)$$

$$i_{pV} = 29,559 [kJ/kg]$$

Teplo přivedené do kotle

$$Q_P^P = Q_i^r + i_{pV}$$

$$Q_P^P = 17\,200 + 29,559 \quad (41)$$

$$Q_P^P = 17229,559 [kJ/kg]$$

4.6 Entalpie vzduchu a spalin

Výpočet entalpií byl proveden v programu MS Excel 2013, proto zde budou uvedeny pouze obecné vztahy, které byly do výpočtu dosazeny.

Entalpie minimálního množství spalin

$$I_{SPmin} = O_{CO_2} \cdot i_{CO_2} + O_{SO_2} \cdot i_{SO_2} + O_{N_2} \cdot i_{N_2} + O_{H_2O} \cdot i_{H_2O} + O_{Ar} \cdot i_{Ar} \quad (42)$$

[kJ/kg]

Entalpie minimálního množství vzduchu

$$I_{VZmin} = O_{VZmin}^S \cdot i_{VS} + O_{H_2O} \cdot i_{H_2O} \quad [kJ/kg] \quad (43)$$

Entalpie spalin v závislosti na teplotě a přebytku vzduchu

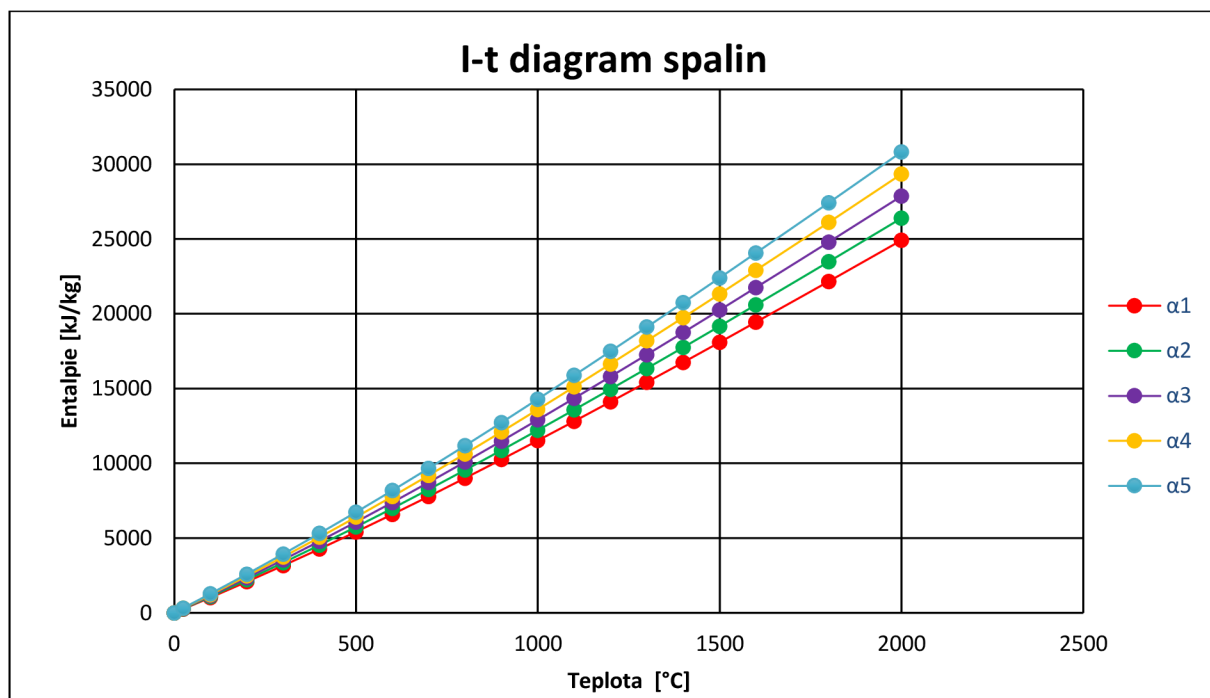
$$I_{SP} = I_{SPmin} + (\alpha - 1) \cdot I_{VZmin} \quad [kJ/kg] \quad (44)$$

Teplota					Entalpie složek spalin				
t	CO ₂	SO ₂	N ₂	Ar	H ₂ O	vzduch suchý	CO	O ₂	popílek
(°C)	(kJ/m ³)	(kJ/m ³)	(kJ/m ³)	(kJ/m ³)	(kJ/m ³)	(kJ/m ³)	(kJ/m ³)	(kJ/m ³)	(kJ/m ³)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	41,62	46,81	32,53	23,32	39,1	32,57	32,49	32,78	20,2
100	170	191,2	129,5	93,07	150,6	132,3	132,3	131,7	80,4
200	357,5	394,1	259,9	186	304,5	266,2	261,4	267	170
300	558,8	610,4	392,1	278,8	462,8	402,5	395	406,8	264,6
400	771,9	836,5	526,7	371,7	625,9	541,7	531,7	550,9	361,6
500	994,4	1070	664	464,7	794,5	684,1	671,6	698,7	459,5
600	1225	1310	804,3	557,3	968,8	829,6	814,3	849,9	558
700	1462	1554	947,3	650,2	1149	978,1	960,4	1003	658,3
800	1705	1801	1093	743,1	1335	1129	1109	1159	760,8
900	1952	2052	1241	835,7	1526	1283	1260	1318	868,4
1000	2203	2304	1392	928,2	1723	1439	1413	1477	982,8
1100	2458	2540	1544	1020	1925	1597	1567	1638	1106
1200	2716	2803	1698	1114	2132	1756	1723	1802	1240
1300	2976	3063	1853	1207	2344	1916	1881	1965	1386
1400	3239	3323	2009	1300	2559	2077	2040	2129	1543
1500	3503	3587	2166	1393	2779	2240	2199	2293	1710
1600	3769	3838	2325	1577	3002	2403	2359	2465	2061
1800	4305	4363	2643	1742	3458	2732	2682	2804	2381

Tab. 13 - Entalpie spalin

t	I _{tSmin}	I _{tVmin}	I _{SP} =I _{SPmin} + (α - 1) * I _{VZmin} [kJ/kg]				
			α ₁ = 1,4	α ₂ = 1,5	α ₃ = 1,6	α ₄ = 1,7	α ₅ = 1,8
(°C)	(kJ/kg)	(kJ/kg)					
0	0	0	0	0	0	0	0
25	194,3551901	156,6065183	256,9978	272,6584	288,3191	303,9798	319,6404
100	773,4211285	635,5024554	1027,622	1091,172	1154,723	1218,273	1281,823
200	1569,589804	1278,804914	2081,112	2208,992	2336,873	2464,753	2592,634
300	2389,278741	1933,764824	3162,785	3356,161	3549,538	3742,914	3936,291
400	3233,16445	2602,770842	4274,273	4534,55	4794,827	5055,104	5315,381
500	4100,688956	3287,291757	5415,606	5744,335	6073,064	6401,793	6730,522
600	4991,879952	3986,871502	6586,629	6985,316	7384,003	7782,69	8181,377
700	5904,225275	4701,054008	7784,647	8254,752	8724,858	9194,963	9665,068
800	6837,246266	5427,002288	9008,047	9550,747	10093,45	10636,15	11178,85
900	7786,866641	6167,955235	10254,05	10870,84	11487,64	12104,44	12721,23
1000	8756,544907	6918,803262	11524,07	12215,95	12907,83	13599,71	14291,59
1100	9738,007579	7679,468996	12809,8	13577,74	14345,69	15113,64	15881,58
1200	10734,12804	8445,237016	14112,22	14956,75	15801,27	16645,79	17490,32
1300	11740,12831	9216,107322	15426,57	16348,18	17269,79	18191,4	19113,01
1400	12755,26212	9991,925169	16752,03	17751,22	18750,42	19749,61	20748,8
1500	13779,3734	10777,56072	18090,4	19168,15	20245,91	21323,67	22401,42
1600	14819,30589	11563,42839	19444,68	20601,02	21757,36	22913,71	24070,05
1800	16902,83795	13150,08373	22162,87	23477,88	24792,89	26107,9	27422,9

Tab. 14 - Entalpie spalin s přebytkem vzduchu



Graf 1 - I-t diagram spalin

4.7 Ztráty kotle a tepelná účinnost

Tepelnou účinnost vypočteme pomocí tepelných ztrát kotle.

Spalovací zařízení slouží k transformaci chemicky vázané energie paliv na tepelnou energii média vhodného k žádoucí distribuci tepla pro vytápění (kotle pro vytápění, lokální topeniště). Pracovní médium je ve většině případů voda nebo vzduch. [11]

Účinnost transformace energie je nejvýznamnějším technicko-ekonomickým parametrem uvedených zařízení, neboť udává míru využití energie. Obecně je definována účinnost jako poměr výkonu k příkonu, lze tedy napsat

$$\eta = \frac{\text{výkon}}{\text{příkon}} \quad (45)$$

Příkonem bude množství energie dodané do zařízení v palivu a výkonem bude množství tepla obsaženého v horké vodě nebo v ohřátém vzduchu.

Stanovení účinnosti kotle či kamen není jednoduchou záležitostí. Vyžaduje provedení náročných měření a analýz, a protože musí být získané výsledky navzájem srovnatelné, také použití jednotné metodiky výpočtu. Celý postup je podrobně stanoven v příslušných normách, a přestože mají normy obecně charakter doporučení, je výhodné a užitečné normativní metodiku používat. [11]

Ztráta citelným teplem spalin

Citelné teplo spalin je teplo, které zahřáté spaliny odvedou kouřovým hrdlem z kotle do komína. Ztrátě způsobené únikem této energie do okolí se říká ztráta citelným teplem spalin nebo také komínová ztráta. I když se jedná o ztrátu, je to ztráta do jisté výše „tolerovaná“, protože je nutná pro bezproblémové odvedení spalin ze spalovacího zařízení. Ve spalinách ochlazených na teplotu prostředí by již došlo ke kondenzaci vody a tím ke vzniku zpravidla nežádoucího kondenzátu. Zvláště u tuhých paliv obsahuje kondenzát různé agresivní roztoky kyselin, které narušují kovové těleso i stěny komínového průduchu, navíc je nelze jen tak odvést do kanalizace. Do vlhkosti vysrážené na stěnách se „nalepují“ saze a vzniklý povlak omezuje přestup tepla ze spalin do topného média, „zalepuje“ komín, v horším případě prostupuje dehtový kondenzát stěnou komínového průduchu do místnosti. Teplota spalin je také důležitým faktorem, který určuje velikost komínového tahu. Studený, spalinami neprohřátý komín netáhne a nedostatečný odvod spalin může způsobit nestabilitu spalovacího procesu. Komínová ztráta je ztrátou největší a předurčuje tak hlavně účinnost celého zařízení. Někteří výrobci kotlů ve snaze o maximální účinnost dimenzují výměníky tak, že „srážejí“ teplotu spalin na minimum. Papírově vysoká účinnost ale „funguje“ pouze při certifikaci při laboratorních podmínkách, kdy se během několikahodinového nepřetržitého provozu ověřují vlastnosti kotle, a lze nastavit optimální podmínky (během této krátké doby se vliv kondenzace neprojeví, požadovaný komínový tah zajistí odtahový ventilátor na zkušebním zařízení). V běžných provozních podmínkách pak tyto kotle vykazují daleko nižší účinnost a často mívají problémy se samotným spalováním. Je proto nutné najít kompromis, kdy je teplota spalin ještě přijatelná pro optimální průběh hoření.

$$\xi_K = \frac{O_{SP} \cdot c_{SP} \cdot (T_{12} - t_{in})}{Q_{ired}} \cdot 100 \quad (46)$$

$$\xi_K = \frac{8,9 \cdot 1,3 \cdot (130 - 20)}{17696} \cdot 100$$

$$\xi_K = 7,193 \text{ [%]}$$

Ztráta hořlavinou ve spalinách (chemickým nedopalem)

Tato ztráta přímo souvisí se ztrátou komínovou. Spalinami se odvádí, vedle citelného tepla, také energie chemicky vázaná ve spalinách – plynný nedopal. Jejím nositelem je oxid uhelnatý CO, který v sobě má ještě potenciál dohořet na oxid uhličitý CO₂ (a tím uvolnit ještě další teplo), ale „díky“ špatným reakčním podmínkám ve spalovacím zařízení (nízká teplota, málo kyslíku) mu to nebylo umožněno. Pokud bude snižován přebytek vzduchu pro snížení komínové ztráty, pravděpodobně se zvýší koncentrace CO ve spalinách, a tím vzroste i ztráta chemickým nedopalem. Ovšem přílišný přebytek vzduchu zvyšuje objem spalin VS, a tím tuto ztrátu také navyšuje. U automatických kotlů na všechny druhy paliv a zplyňovacích kotlů spalujících suché dřevo, se velikost této ztráty pohybuje do 1 %. Čím tmavší kouř z komína vychází, tím více nevyhořelého uhlíku se nachází ve spalinách, a tím je i vyšší ztráta plynným nedopalem. U klasických jednoduchých (zvláště prohořivacích litinových) kotlů dosahuje běžně výše 5 až 10 %.

$$\text{Ztráta odhadnuta: } \xi_{CO} = 0,08 \text{ \%}$$

Ztráta hořlavinou v tuhých zbytcích

Výše této ztráty popisuje míru nevyhořelého uhlíku obsaženého v popelu a sazích – tzv. mechanický nedopal. Velikost ztráty je do značné míry závislá na obsahu popelovin v palivu. Proto u dřevní biomasy je relativně zanedbatelná, zpravidla do 1 %. U paliv s větším podílem popelovin (uhlí, ...) se pohybuje v rozsahu 2 až 5 %. U kotlů s ručním přikládáním zpravidla palivo vyhoří na roštu kvalitně vždy. U kotlů se samočinnou dodávkou paliva může někdy zvýšenou ztrátou mechanickým nedopalem zapříčinit špatné nastavení dávkování paliva.

$$\text{Ztráta odhadnuta: } \xi_C = 0,5 \text{ \%}$$

Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků

Je to ztráta fyzického tepla, které je ze spalovacího procesu odvedeno spolu se struskou, škvárou nebo v úletu (popílkem).

$$\text{Ztráta odhadnuta: } \xi_{FYZ} = 0,5 \text{ \%}$$

Ztráta sdílením tepla do okolí

Energie odvedená plochou kotle do okolí. Všechny plochy kotle, jejichž teplota je vyšší jak teplota okolí, do okolí „předají“ část tepla vytvořeného spalováním, čemuž se odborně říká sdílení tepla do okolí. Velikost této ztráty se stanovuje z poměru tepla uvolněného povrchem kotle k tepelnému příkonu. Závisí tedy na povrchové teplotě jednotlivých ploch. Kvalitně zaizolovaný kotel vykazuje při ustáleném provozu na jmenovitý výkon ztrátu sdílením tepla do okolí na hranici 2 % a u špičkově zaizolovaného kotle se tato ztráta pohybuje do 1 %.

$$\text{Ztráta odhadnuta: } \xi_{SV} = 1 \text{ \%}$$

Tepelné ztráty celkem

$$Z_C = \xi_K + \xi_{CO} + \xi_C + \xi_{FYZ} + \xi_{SV}$$

$$Z_C = 7,193 + 0,08 + 0,5 + 0,5 + 1 \quad (47)$$

$$Z_C = 9,27 [\%]$$

Tepelná účinnost kotle

$$\eta = 100 - Z_C$$

$$\eta = 100 - 9,27 \quad (48)$$

$$\eta = 90,727 [\%]$$

Skutečné množství paliva přivedeného do kotle

$$M_{PP} = \frac{P_{NN}}{Q_P^P \cdot \frac{n_k}{100}}$$

$$M_{PP} = \frac{20}{17229,559 \cdot \frac{90,727}{100}} \quad (49)$$

$$M_{PP} = 0,0013 [kg/s] = 4,606 [kg/h]$$

Příkon dodaný v palivu

$$P_{pal} = \frac{Q_P^P \cdot M_{PV1h}}{3600}$$

$$P_{pal} = \frac{17229,559 \cdot 4,606}{3600} \quad (50)$$

$$P_{pal} = 22,044 [kW]$$

Množství vlhkých spalin s přebytkem vzduchu pro skutečné množství paliva

$$V_{SP} = O_{SV} \cdot M_{PV1h}$$

$$V_{SP} = 8,902 \cdot 4,606 \quad (51)$$

$$V_{SP} = 41,002 [m_N^3/hod]$$

Skutečné množství vlhkých spalin s přebytkem vzduchu pro skutečné množství paliva

$$V_{SP}^R = V_{SP} \cdot \left(\frac{t_{stř} + 273,15}{273,15} \right)$$

$$V_{SP}^R = 41,002 \cdot \left(\frac{540 + 273,15}{273,15} \right) \quad (52)$$

$$V_{SP}^R = 122,061 [m^3/h]$$

4.8 Výpočet rozměrů spalovací komory

Výpočet rozměrů spalovací komory běžným postupem není příliš aplikovatelný na malá ohniště, protože zde dochází k častým změnám procesu spalování. Z tohoto důvodu bylo přistoupeno ke změření rozměrů spalovací komory u kotlů stejného výkonu již fungujících. Z měření vyšly tyto výsledky:

Plocha spalovacího roštu by měla být maximálně 0,045 m².

4.9 Výpočet výměníku spaliny-voda

V následujícím výpočtu bude uvažován žárotrubný výměník se svazkem trubek v plášti s jednofázovou výměnou tepla, podélně obtékaný. Uvnitř trubek budou proudit spaliny, které jsou teplotnějším médiem na teplé straně výměníku. V mezi-trubkovém prostoru bude protékat chladící médium, kterým je voda.

Trubkový svazek bude mít pouze jeden tah. Uvnitř trubek trubkového svazku budou umístěny turbulátory (pasivní víříče). Turbulátory uvnitř výměníku mají dva úkoly. Za prvé zintenzivňují přestup tepla ze spalin do vody, narušují mezní vrstvu. Za druhé umožňují automatické nebo manuální čištění spalínového výměníku vertikálními pohyby uvnitř trubek.

Pro výpočet výměníku spaliny-voda jsou známy všechny potřebné vstupní údaje. V následujících tabulkách bude provedeno shrnutí již známých informací. Po konzultaci s výrobcem kotlů by na konci měla vyjít teplosměnná plocha cca 1,6 – 1,8 m². Ta by nám měla s jistotou zajistit požadovaný tepelný výkon.

Všechny termo-fyzikální vlastnosti pracovních látek jsou vztaženy ke středním teplotám.

Střední teplota spalin

$$T_{SP} = \frac{T_{11} + T_{12}}{2}$$

$$T_{SP} = \frac{950 + 130}{2} \quad (53)$$

$$T_{SP} = 540 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Střední teplota vody

$$T_{SP} = \frac{T_{11} + T_{12}}{2}$$

$$T_{SP} = \frac{80 + 65}{2} \quad (54)$$

$$T_{SP} = 72,5 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Vlastnosti spalin				
Název	Značka		Hodnota	Jednotka
Teplota spalin na vstupu	T_{11}	=	950	°C
Teplota spalin na výstupu	T_{12}	=	130	°C
Střední teplota spalin	T_{SP}	=	540	°C
Rychlost spalin	w_{sp}	=	2	m/s
Tlak na vstupu	p	=	101,325	kPa
Hustota	ρ_{sp}	=	1,309	kg/m ³
Dynamická viskozita	η_{sp}	=	3,377E-05	N*s/m ²
Kinematická viskozita	ν_{sp}	=	2,579E-05	m ² /s
Tepelná vodivost	λ_{sp}	=	0,069	W/m ² K
Tepelná kapacita	c_{sp}	=	1479,892	J/m ³ K
Průtok	V_{SPR}	=	122,061	m ³ /h
Průtok	V_{SPR}	=	0,0339	m ³ /s
Entalpie za teploty 21	i_{21}	=	1592,217	kJ/kg
Entalpie za teploty 22	i_{22}	=	9194,963	kJ/kg

Tab. 15 - Vlastnosti spalin

Vlastnosti vody				
Název	Značka		Hodnota	Jednotka
Teplota látky na výstupu	T_{21}	=	80	°C
Teplota látky na vstupu	T_{22}	=	65	°C
Střední teplota látky	T_{vody}	=	72,5	°C
Tlak na vstupu	p	=		kPa
Entalpie	i_{stf}	=	271870	J/kg
Hustota	ρ_{stf}	=	980,45	kg/m ³
Kinematická viskozita	ν_{stf}	=	0,000000446	m ² /s
Tepelná vodivost	λ_{stf}	=	0,664	W/mK
Tepelná kapacita	c_{pstf}	=	4185	J/kgK
Prandtlovo číslo	P_{rstf}	=	2,78	-
Prandtlovo číslo při stěně trubky	P_{r2s}	=	0,9	-
Průtok vody	m	=	0,000194738	m ³ /s
Entalpie vody	i_{12}	=	334,94	kJ/kg
Entalpie vody	i_{11}	=	230,19	kJ/kg

Tab. 16 - Vlastnosti vody

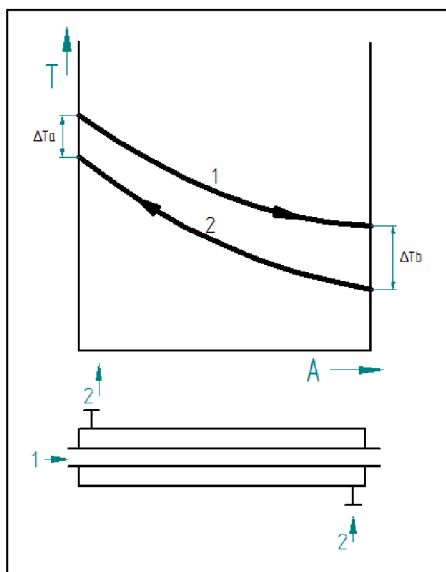
Přijatá zjednodušení:

- Teploty před a za výměníkem jsou zadány na základě zkušeností z již fungujících zařízení.
- Jedinou teplosměnnou plochou jsou pouze trubky výměníku nikoli první tah kotle.
- Tlak ve spalínovodech je volen jako atmosférický, tím bude dopuštěna pouze minimální chyba.

Následující výpočet bude proveden dle [12]

4.9.1 Střední logaritmický teplotní spád – protiproudé uspořádání

Výměník je konstruovaný jako protiproudý.



Obr. 13 - Střední logaritmický teplotní spád

$$\Delta T_{ln} = \frac{\Delta T_a - \Delta T_b}{\ln \frac{\Delta T_a}{\Delta T_b}} = \frac{(t_{11} - t_{21}) - (t_{12} - t_{22})}{\ln \frac{(t_{11} - t_{21})}{(t_{12} - t_{22})}}$$

$$\Delta T_{ln} = \frac{(950 - 80) - (130 - 65)}{\ln \frac{(950 - 80)}{(130 - 65)}} \quad (55)$$

$$\Delta T_{ln} = 310,319 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Volené geometrické rozměry výměníku. Tyto hodnoty jsou voleny po konzultaci na základě doporučení a zkušeností.

Vnější průměr trubek	D	=	0,051	m
Tloušťka stěny trubek	t	=	0,0032	m
Vnitřní průměr trubek	d	=	0,0446	m

Tab. 17 - Geometrické rozměry výměníku

Určení počtu žárových trubek

Počet žárových trubek je stanoven pomocí rovnice kontinuity a zvolené optimální rychlosti spalin. Po konzultaci volím rychlost spalin $w_{sp} = 2$ m/s.

$$z = \frac{4 \cdot V_{SPR}}{w_{SP} \cdot \pi \cdot d^2}$$

$$z = \frac{4 \cdot 0,034}{2 \cdot \pi \cdot 0,0446^2} \quad (56)$$

$$z = 10,85 [ks]$$

Nakonec je počet trubek volen: $z = 14$ ks. Tato hodnota se optimalizací výpočtu ukázala z pohledu přestupu tepla a velikosti výměníku jako nejvhodnější.

Skutečná rychlost spalin

$$w_{sp} = \frac{4 \cdot V_{SPR}}{z \cdot \pi \cdot d^2}$$

$$w_{sp} = \frac{4 \cdot 0,034}{14 \cdot \pi \cdot 0,0446^2} \quad (57)$$

$$w_{sp} = 1,55 [m/s]$$

Celkový obvod trubek

$$O_{trubek} = z \cdot \pi \cdot d$$

$$O_{trubek} = 14 \cdot \pi \cdot 0,0446 \quad (58)$$

$$O_{trubek} = 1,962 [m]$$

Výpočet Reynoldsova kritéria

$$Re_1 = \frac{w_{SP} \cdot d \cdot \rho_{SP}}{\eta_{SP}}$$

$$Re_1 = \frac{1,55 \cdot 0,0446 \cdot 1,309}{3,377 \cdot 10^{-5}} \quad (59)$$

$$Re_1 = 2679,969 [-]$$

Po konzultaci s výrobcem kotlů, který na základě praktických zkušeností doporučil navýšení Reynoldsova kritéria o 4600. K tomuto navýšení se přistoupilo z důvodu použití turbulátorů.

$$Re = 4600 + Re_1$$

$$Re = 4600 + 2679,969 \quad (60)$$

$$Re = 7279,969 [-]$$

Teplota při stěně trubky

$$t_{tw} = \frac{T_{SP} + T_{VODY}}{2}$$

$$t_{tw} = \frac{540 + 72,5}{2} \quad (61)$$

$$t_{tw} = 306,25 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Prandtlovo číslo při stěně trubky

Nejprve je nutné dopočítat dynamickou viskozitu pro teplotu při stěně trubky.

$$\eta_{tw} = \eta_0 + (t_{tw} + t_0) \cdot \frac{\eta_1 - \eta_0}{t_1 - t_0}$$

$$\eta_{tw} = 2,632 \cdot 10^{-5} + (306,25 + 300) \cdot \frac{2,959 \cdot 10^{-5} - 2,653 \cdot 10^{-5}}{400 - 300} \quad (62)$$

$$\eta_{tw} = 2,653 \cdot 10^{-5} \text{ [m}^2\text{/s]}$$

$$P_{r1s} = \frac{\eta_{tw} \cdot c_{sp}}{\lambda_{SP}}$$

$$P_{r1s} = \frac{2,653 \cdot 10^{-5} \cdot 1479,892}{0,069} \quad (63)$$

$$P_{r1s} = 0,569 \text{ [-]}$$

Prandtlovo číslo

$$P_{r1s} = \frac{\eta_{tw} \cdot c_{sp}}{\lambda_{SP}}$$

$$P_{r1s} = \frac{3,377 \cdot 10^{-5} \cdot 1479,892}{0,069} \quad (64)$$

$$P_{r1s} = 0,724 \text{ [-]}$$

Korekční faktor zohledňující změnu látkových vlastností v mezní vrstvě (bez ohledu na směr tepelného toku)

$$y_2 = \left(\frac{P_{r1}}{P_{r1s}} \right)^{0,11}$$

$$y_2 = \left(\frac{0,724}{0,569} \right)^{0,11} \quad (65)$$

$$y_2 = 1,027 \text{ [-]}$$

Součinitel zohledňující vliv nátoky pracovní látky do trubky

$$y_1 = \left(\frac{d}{l_t}\right)$$

$$y_1 = \left(\frac{0,0446}{0,7}\right) \quad (66)$$

$$y_1 = 0,064 [-]$$

l_t – je předpokládané délka trubky výměníku [m]

Korelační faktor

$$x_5 = \frac{1}{8} \cdot (1,82 \cdot \log(R_e) - 1,64)^{-2}$$

$$x_5 = \frac{1}{8} \cdot (1,82 \cdot \log(7279,969) - 1,64)^{-2} \quad (67)$$

$$x_5 = 0,0043 [-]$$

Nuseltovo číslo

Pro výpočet Nuseltova čísla byl zvolen Gnielinského vztah, který jej nejlépe vystihuje pro trubku kruhového průřezu.

$$Nu_1 = \frac{x_5 \cdot (R_e - 1000) \cdot P_{r1}}{1 + 12,7 \cdot \sqrt{x_5} \cdot (P_{r1}^{\frac{2}{3}} - 1)} \cdot (1 + y_1^{\frac{2}{3}}) \cdot y_2$$

$$Nu_1 = \frac{0,0043 \cdot (7279,969 - 1000) \cdot 0,724}{1 + 12,7 \cdot \sqrt{0,0043} \cdot (0,724^{\frac{2}{3}} - 1)} \cdot (1 + 0,064^{\frac{2}{3}}) \cdot 1,027 \quad (68)$$

$$Nu_1 = 27,785 [-]$$

Součinitel přestupu tepla

Předpokládaná hodnota součinitele přestupu tepla je okolo 35 W/m²K.

$$Nu_1 = \frac{\alpha_1 \cdot d}{\lambda_{sp}} \rightarrow \alpha_1 = \frac{Nu_1 \cdot \lambda_{sp}}{d}$$

$$\alpha_1 = \frac{27,785 \cdot 0,069}{0,0446} \quad (69)$$

$$\alpha_1 = 43,010 \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$$

Výsledek přibližně odpovídá předpokladu a byl ještě kontrolován dle výpočtových vztahů uvedených v *Návrh kotlů a spalinových výměníků, T. Dlouhý*. Podle těchto vztahů vyšel součinitel přestupu tepla 47 W/m²K. Z tohoto důvodu je výsledek $\alpha_1 = 43$ W/m²K považován za správný a použitelný pro další výpočty.

Součinitel prostupu tepla

Pro stěnu složenou z několika vrstev platí [13]

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_Z}{\lambda_Z} + \frac{\delta_M}{\lambda_M} + \frac{\delta_K}{\lambda_K} + \frac{1}{\alpha_2}} \text{ [W/m}^2\text{K]} \quad (70)$$

Tento vzorec lze použít u všech vyskytujících se výhřevných ploch kotle. [13]

- α_1, α_2 – součinitele přestupu tepla ze spalin do stěny a ze stěny do média [W/m²K]
- $\delta_z, \delta_m, \delta_k$ – tloušťky vrstvy a sice znečištění na vnějším povrchu, vlastního materiálu trubky a vnitřního zanešení [m]
- $\lambda_z, \lambda_m, \lambda_k$ – součinitelé tepelné vodivosti odpovídajících vrstev [W/m.K]

Součinitel prostupu tepla pro kotelní svazky kotlů malých výkonů při spalování tuhých paliv lze počítat podle následujícího vztahu.

$$k = \Psi \cdot \alpha_1$$

$$k = 0,85 \cdot 43,010 \quad (71)$$

$$k = 36,559 \text{ [W/m}^2\text{K]}$$

Ψ – součinitel tepelné efektivity, který je volen $\Psi = 0,85$ [-]

Délka trubek výměníku

$$L = \frac{P_N}{k \cdot O_{trub} \cdot \Delta t_{LN}}$$

$$L = \frac{20000}{36,559 \cdot 1,962 \cdot 310,319} \quad (72)$$

$$L = 0,899 \text{ [m]}$$

Tato délka však může být zkrácena, protože část tepla se předá již v prvním tahu výměníku. Délka je volena $L = 0,8$ m.

První tah kotle má tyto parametry:

Průměr prvního tahu kotle	D_{tah1}	=	0,244	m
Délka prvního tahu kotle	L_{tah1}	=	0,5	m
Plocha prvního tahu kotle	S_{tah1}	=	0,383	m ²

Tab. 18 - Geometrické rozměry prvního tahu výměníku

Celková plocha výměníku

$$S = O_{trub} \cdot L$$

$$S = 1,962 \cdot 0,8 \tag{73}$$

$$S = 1,569 [m]$$

$$S_{celk} = S_{tah1} + S$$

$$S_{celk} = 1,569 + 0,383 \tag{74}$$

$$S_{celk} = 1,953 [m]$$

Tato plocha by nám měla bezpečně zabezpečit dostatečný tepelný výkon.

Výkon výměníku teoretický

$$P_{výměníku} = k \cdot S_{celk} \cdot \Delta t_{LN}$$

$$P_{výměníku} = 36,559 \cdot 1,953 \cdot 310,319 \tag{75}$$

$$P_{výměníku} = 22151,425 [W]$$

5 Konstrukční studie automatického kotle na pelety

Následující kapitola je věnována samotné konstrukční studii návrhu kotle na pelety. Kotel bude nutné vyrobit, důkladně proměřit, naměřené údaje vyhodnotit a provést k tomu odpovídající konstrukční změny na modelu. Když byla možnost promluvit si se zavedenými výrobci kotlů o problematice návrhu kotle, tak většina řekla, že používá metodu „pokus omyl“.

Konstrukční návrh byl vytvořen v programu Solid Edge ST7 Premium. Následná vizualizace byla provedena v programu KeyShot 5.

Navržený kotel se skládá z celkem 1116 dílů; z tohoto počtu je 297 unikátních.

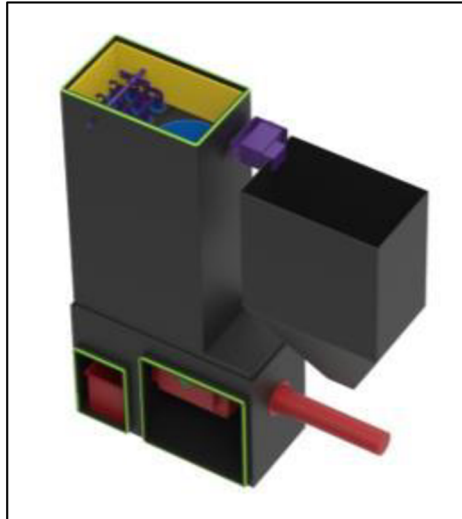
Na začátku bylo nakresleno a diskutováno větší množství variant konstrukce kotle na pelety. Z nich pak byla vybrána koncepce podle konzultace s odborníky nejvhodnější. Ta byla následně rozpracována do větších detailů.

Na následujících obrázcích jsou zobrazeny pouze dvě z uvažovaných koncepcí. U první bylo hlavní myšlenkou vytvořit symetrický výměník spalin s jednoduchým tvarem. Od této koncepce nakonec bylo ustoupeno z důvodu složité konstrukce při zvoleném typu roštu a obtížné rozšiřitelnosti na jiné výkony.



Obr. 14 - První koncepce kotle na pelety

Druhý zde zobrazený koncept byl vybrán z důvodu, že se stal předobrazem pro nakonec zvolenou konstrukci. Hlavním problémem je nevhodně navržený rozměr spalovací komory a výměníku (nedosedají přesně na sebe) kdy vzniklo spousta nevyužitého volného prostoru a i zbytečné sváry a těsnící plochy. Výroba by byla zbytečně složitá = drahá.



Obr. 15 Studie kotle na pelety č.14

5.1 Kotel na pelety SC-20

Studie teplovodního peletového kotle, která bude, v následující části detailně představena dostala pracovní název **SC-20**.



Obr. 16 - Automatický kotel na pelety SC-20

Navržený kotel je určen pro široké spektrum objektů (počínaje domem s malou energetickou ztrátou až po objekty s větší potřebou tepla), jejichž náročnost na tepelný výkon nepřekročí 20 kW. Kotel by měl poskytovat komfortní, úsporné a ekologické vytápění. Díky možnosti dvojité regulace spalování pomocí teplotního čidla a lambdasondy by měl mít kotel

vysokou účinnost a nízké emise. Trvalou vysokou účinnost výměníku kotle zaručuje automatické čištění výhřevných ploch. V kombinaci s nově navrženým spalovacím roštem snižuje náročnost údržby a čištění na minimum a tím zvyšuje komfort vytápění na maximum. Hořák by měl také umožňovat spalování méně kvalitních pelet (bude muset ověřit experiment). Kotel by měl mít dlouhou životnost díky použití jakostní žáruvzdorné oceli. Navíc jednotlivé komponenty kotle jsou vyměnitelné.



Obr. 17 - Kotel na pelety SC-20

5.2 Stručný přehled výhod

- Plně automatický provoz kotel
- Účinnost přes 90 %
- Samočisticí rošt – snadná údržba a čištění kotle
- Automatické čištění výhřevných ploch výměníku pro trvale vysokou účinnost
- Dvojnásobná ochrana proti prohoření do zásobníku paliva (zhášecí systém, turniketový podavač)
- Automatické zapalování
- Spalování čistého a ekologického paliva
- Dvojnásobná regulace výkonu kotle
- Odtahový ventilátor spalin
- Variabilní zásobník paliva (levé, pravé nebo automatické plnění)
- Dotykový display řídicí jednotky

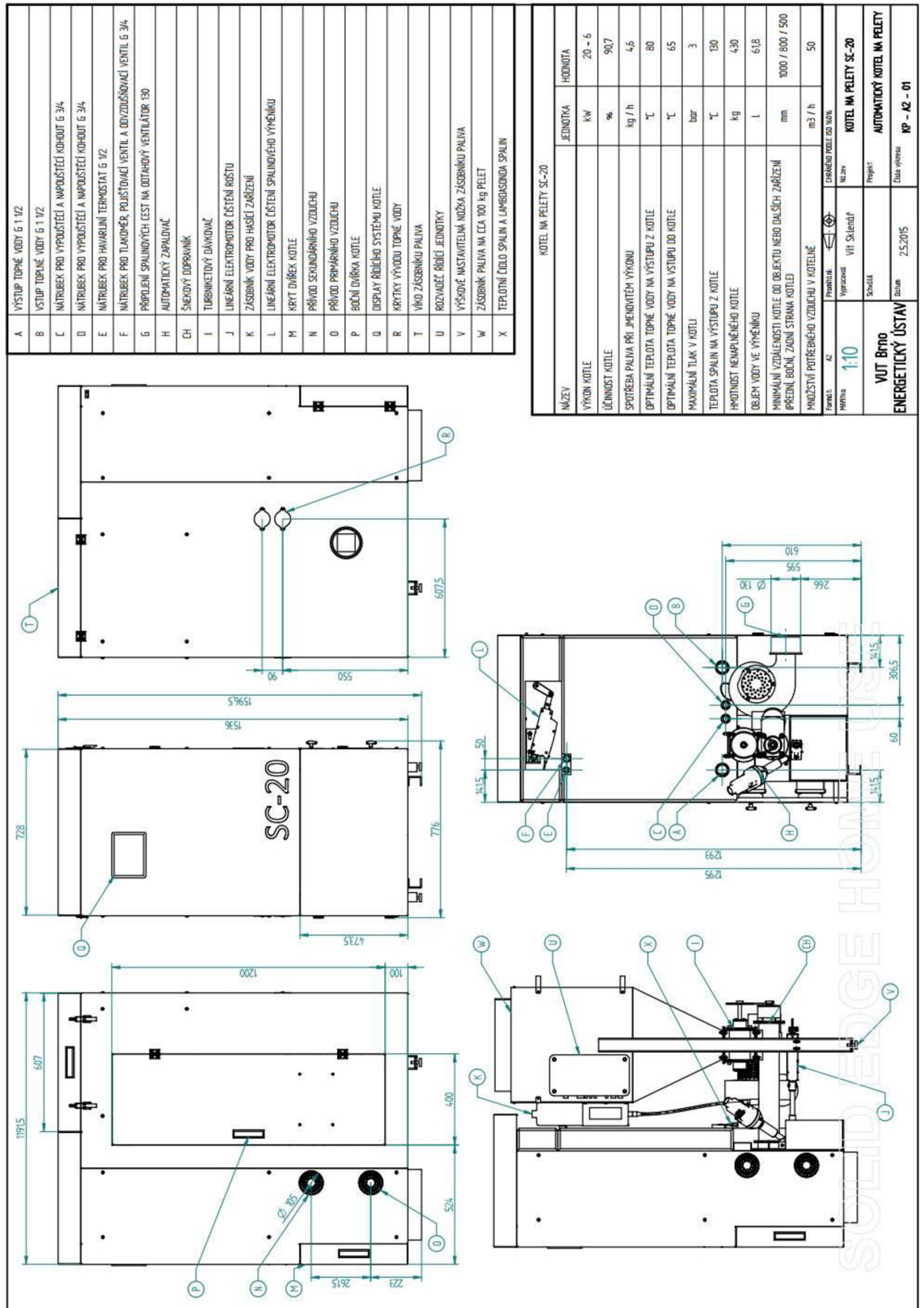


Obr. 18 - Kotel na pelety SC-20

5.3 Parametry kotle

Automatický kotel na pelety SC-20		
Palivo	Pelety dle EN 14961-2 A1, A2, B	
Jmenovitý výkon	20	kW
Minimální výkon	6	kW
Regulovatelnost	30 - 100	%
Účinnost	90,73	%
Spotřeba paliva při jmenovitém výkonu	4,61	kg/h
Maximální provozní přetlak	3	bar
Objem vodní náplně	61,8	l
Množství paliva v zásobníku	100	kg
Objem popelníku	16,74	dm ³
Teplota spalin na výstupu při jmenovitém výkonu	130	°C
Minimální teplota vratné vody v provozu	55	°C
Přípojovací nátrubky topné vody	G1 1/2	
Celková hmotnost	410	kg
Přívod napětí	230 / 50	V / Hz
Doba hoření násypky při jmenovitém výkonu	21,5	hod
Množství spotřeby vzduchu při jmenovitém výkonu	40	m ³
Rozměry šířka / výška / hloubka	776 / 1596,5 / 1191,5	mm
Spalinové hrdlo	130	mm

Tab. 19 - Parametry kotle na pelety SC-20



5.4 Popis kotle

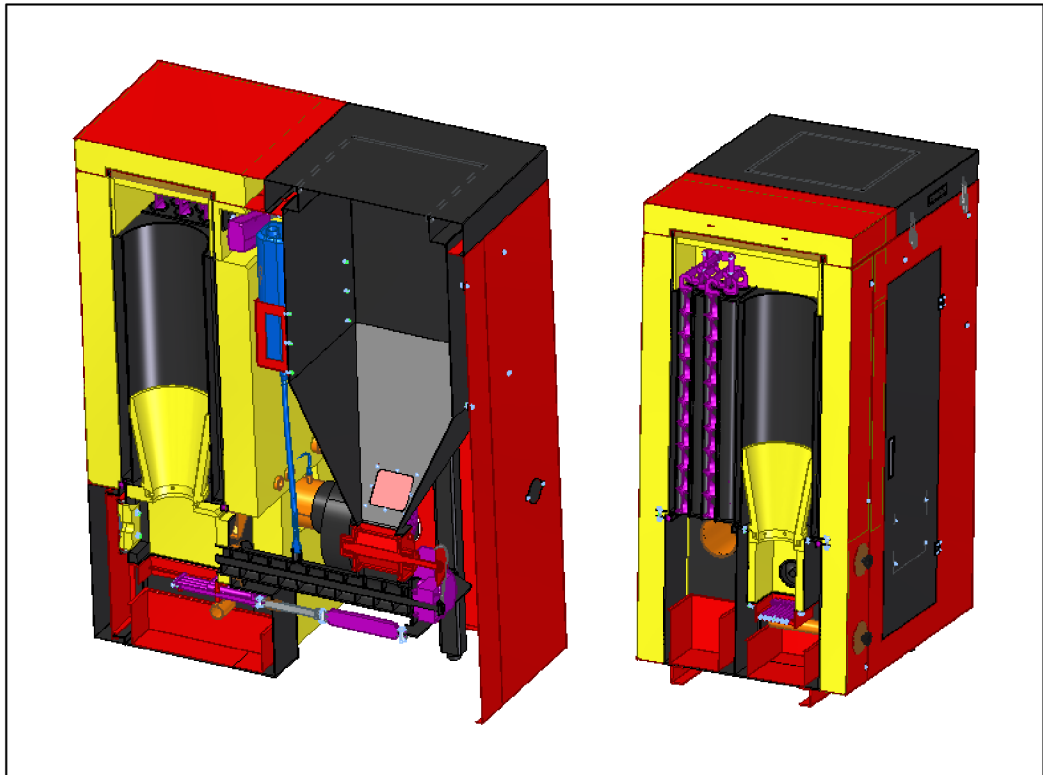
Konstrukce kotle odpovídá požadavkům normy ČSN EN 303-5 – Kotle pro ústřední vytápění – Část 5: Kotle pro ústřední vytápění na pevná paliva, s ruční nebo samočinnou dodávkou, o jmenovitém tepelném výkonu nejvýše 300 kW – Terminologie, požadavky, zkoušení a značení.



Obr. 19 - Automatický kotel na pelety SC-20

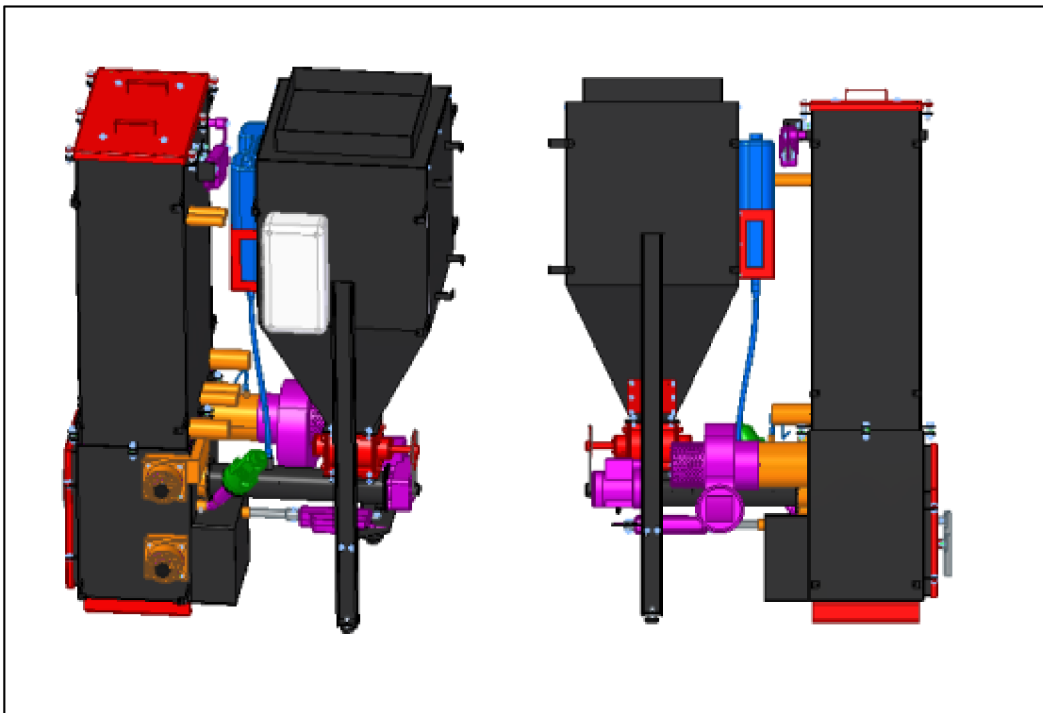
Kotel vychází z principu vodorovného přívodu paliva a je konstrukčně navržen z několika částí, tak aby byl jednoduchý na výrobu, montáž a servis. Jednotlivé části, ze kterých je kotel poskládán, lze rozdělit následovně:

- Podstavec + spalovací komora
- Pohyblivý rošt
- Výměník spaliny - voda
- Šnekový podavač paliva
- Turniketový podavač paliva
- Zásobník paliva
- Vnější opláštění a izolace kotle
- Čištění výměníku
- Hasicí zařízení



Obr. 20 - Řez automatickým kotlem na pelety SC-20

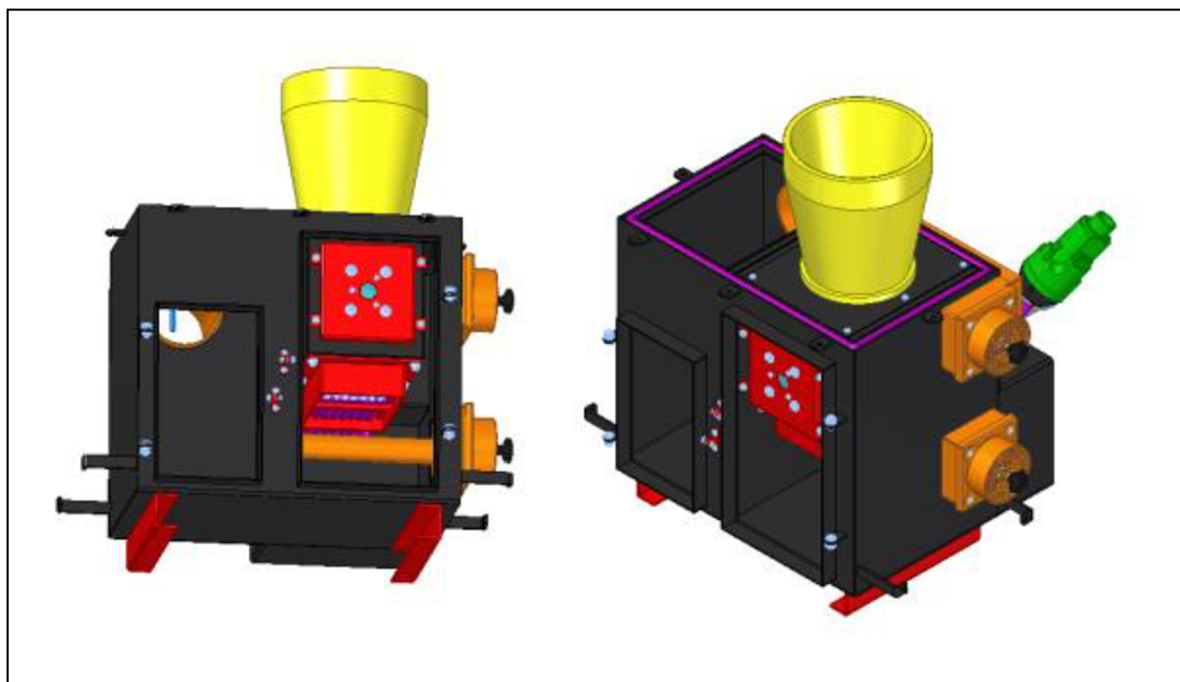
Jednotlivé části kotle jsou k sobě spojeny šroubovými spoji a lze je v případě poruchy vyměnit v krátkém čase. Veškerá těsnění kotle, kde může dojít ke kontaktu s horkými spalinami, je provedeno z pletené izolační šňůry. Šňůra je vyrobena ze skelné příze. Vnější opláštění kotle je upraveno komaxitovým nátěrem, ostatní části žáruvzdornou barvou.



Obr. 21 - Nezaizolovaný a nezakrytovaný kotel SC-20

5.4.1 Podstavec + spalovací komora

Podstavec je svařen z ocelových plechů. Nosné části podstavce jsou navrženy z ocelového plechu o síle 5 mm. Ostatní části z plechu o síle 3 mm. Podstavec je v přímém kontaktu pouze se spalinami a popelem, nikoli s vodou. Součástí podstavce je spalovací komora, která je vyložena 30 mm tlustými šamotovými deskami. Dvířka do spalovací komory jsou vyložena keramikou a materiálem Sibrál. Na podstavci je nasazen dohořivací kus. Ten je odlit z žáropevného betonu. V jeho nejužším místě je 6 kruhovými dírami zaveden sekundární spalovací vzduch. Ten musí projít soustavou kanálů v šamotové vyzdívce kotle, takže dojde k jeho předehřevu. Předehřátí spalovacího vzduchu zajistí stabilitu spalovacího procesu. Primární vzduch je zaveden pod rošt děrovanou trubkou. Díry na trubce jsou rozmístěny tak, aby bylo zajištěno rovnoměrné rozptření spalovacího vzduchu. Množství spalovacího vzduchu lze řídit klapkami umístěnými na boku podstavce (vybarveny oranžovou barvou). Tyto klapky jsou momentálně navrženy jako manuální. Je to z důvodu snadné změny množství vzduchu při případném testování. V případě sériové výroby by bylo manuální nastavování přívodu vzduchu nahrazeno automatickým nastavováním vzduchu za pomoci servopohonu (např. od firmy BELIMO). V levé části podstavce je umístěn popelník pro druhý tah výměníku. Ze zadní strany můžeme vidět automatické zapalování Leister Igniter BM4. Horký vzduch je trubkou zaveden na rošt, kde dojde k zapálení základní vrstvy paliva. A také je zde umístěna příruba pro napojení odtahového ventilátoru spalin od firmy EBM PAPS. Na přírubě jsou dva připojovací návarky. Jeden slouží pro čidlo teploty spalin a druhý je určen pro lambdasondu.



Obr. 22 - Podstavec a spalovací komora

Spalinový ventilátor R3G 150-AA03		
Materiál	Nerezová ocel	
Směr otáčení	Po směru hodinových ručiček	
Krytí	IP 54	
Maximální teplota spalin	250	°C
Průtok vzduchu	145	m ³ /h
Otáčky	2530	rpm
Hmotnost	1,25	kg

Tab. 20 - Parametry spalinového ventilátoru

Automatické zapalovací zařízení Leister Igniter BM4		
Elektrické napětí	230	V
Frekvence sítě	50	Hz
Výkon	1600	W
Minimální průtok vzduchu	230	l/min
Tlak vzduchu	2,48	kPa
Maximální teplota na výstupu	600	°C
Hmotnost	1	kg

Tab. 21 - Automatické zapalovací zařízení

Lineární pohon LA 12		
Elektrické napětí	12/24	V DC
Maximální síla	750	N
Pístnice	Vysokopevnostní plast	
Třída krytí	IPX1	
Vestavěné koncové spínače, nastavitelný zdvih		
Rychlost zdvihu	14	mm/s
Zdvih	19-130	mm

Tab. 22 - Lineární pohon roštu a odpopelňovače

Odporový snímač teploty Sensit TR 011		
Rozsah měřených teplot	-50 až 200	°C
Typ čidla	Pt 100	
Třída krytí	IP 67	
Průměr pouzdra	6	mm
Materiál pouzdra	nerezová ocel DIN 1.4301	
Délka pouzdra	80	mm
Kalibrace dle normy	ČSN EN ISO/IEC 17025	

Tab. 23 - Odporový snímač teploty

Lambda sonda BOSCH BO 0258986502		
Počet vodičů	3	-
Typ lambda sondy	Univerzální, vyhřívaná	
Příkon	18	W

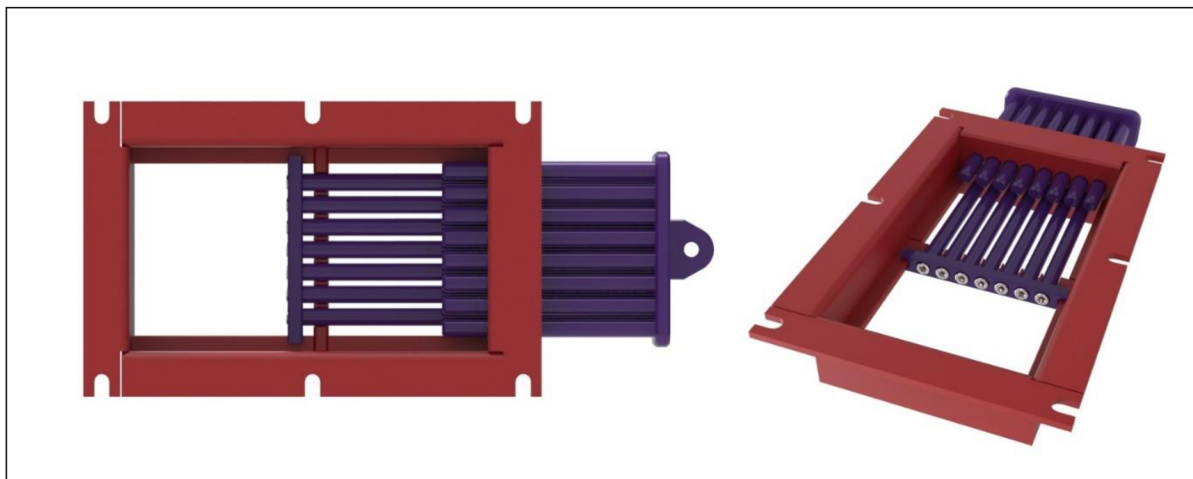
Tab. 24 - Lambda sonda

5.4.2 Rošt

Rošt kotle je navržen jako samočistící pro spalování i méně kvalitních pelet. Tyto pelety nejsou běžné hořáky schopné spalovat.

Rošt je tvořený dvěma svařenci: rámu roštu a dvou řad nad sebou uspořádaných ocelových tyčí. Spodní řada tyčí je na konci mezi sebou provázána ocelovou destičkou. Tato destička nám zajišťuje jak potřebnou tuhost roštu, tak i jeho vedení, protože má po stranách vyfrézované drážky, které se pohybují v protikusech. Ty jsou přivařeny na rámu roštu. Rám roštu je navržen z tlustostěnného plechu, který má v sobě čistící otvory.

Rošt se pohybuje lineárním pohybem vpřed a vzad. Je poháněn lineárním elektromotorem. Při zasouvání roštu dochází průchodem roštu otvory k seškrabování popele k případně různých spečenců do druhé zóny spalování. Zde mohou dohořet případné nespálené kousky paliva. Uprostřed rámu je vidět ještě jedna ocelová destička, která je navařena napříč rámem. Tato destička slouží k narušování a stírání popele v druhé zóně spalování.



Obr. 23 - Rošt kotle

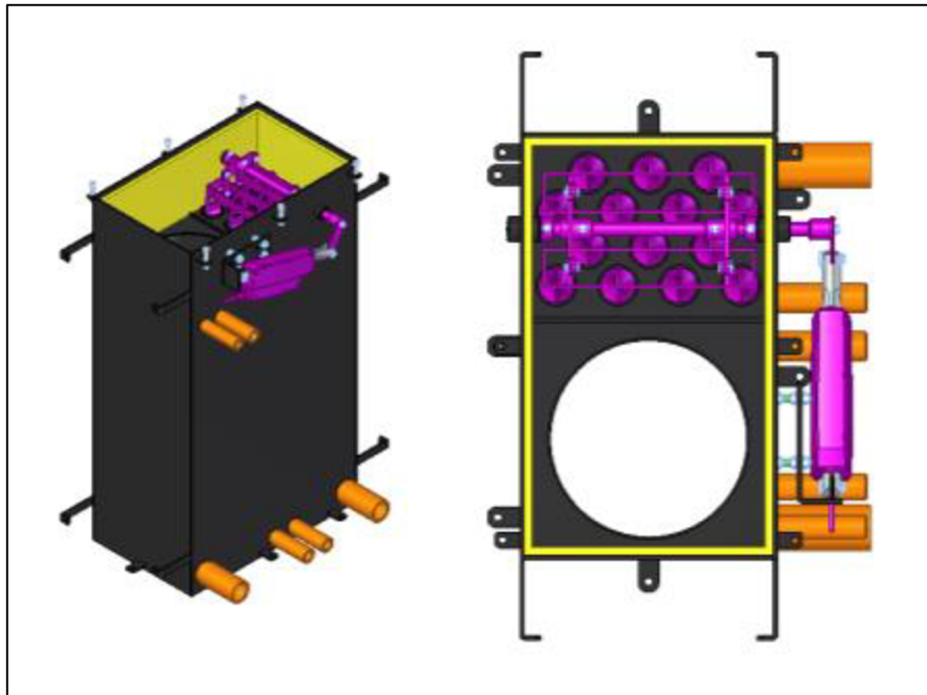


Obr. 24 - Rošt kotle

5.4.3 Spalinový výměník

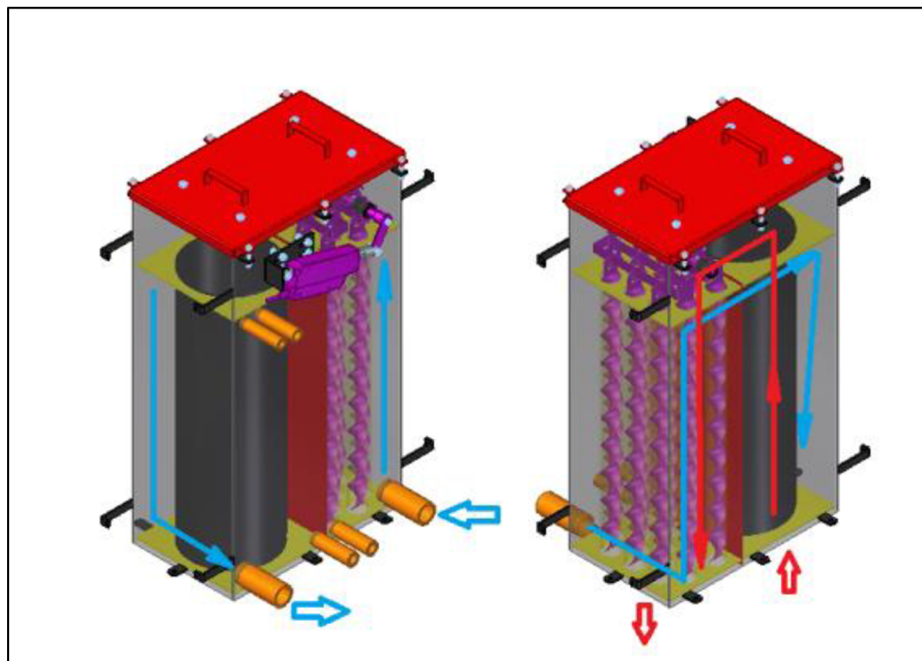
Spalinový výměník je svařenec z 5 mm ocelových plechů. Je proveden jako dvou tahový žárotrubý výměník. První tah je proveden z trubky o průměru 250 mm. Druhý tah tvoří sestava trubek o průměru 51 mm. V druhém tahu je umístěn čistící mechanismus výměníku, který je složen z turbulátorů a lineárního elektromotoru. Tento mechanismus bude čistit výměník ve zvolených intervalech, tak aby byla zachována vysoká účinnost kotle. Vývody (oranžová barva) pro vstup a výstup vody a další přípojná místa jsou umístěny na zadní straně kotle. Při pohledu na zadní stranu kotle můžeme v horní části kotle vidět

připojení pro jímku havarijního termostatu G $\frac{1}{2}$ ". Vedle se nachází nátrubek G $\frac{3}{4}$ pro připojení tlakoměru, odvzdušňovacího ventilu a pojišťovacího ventilu. Ve spodní části se po stranách nachází připojení pro vstup a výstup topné vody G $1\frac{1}{2}$. Ve středu jsou umístěny dva nátrubky pro vypouštěcí a napouštěcí kohout G $\frac{3}{4}$.



Obr. 25 - Spalinový výměník kotle

Jak je vidět z následujícího obrázku, tak je výměník navržen jako protiproudý. Tok vody je rozdělen do dvou oddělených částí výměníku dělicím plechem, který má v horní části otvor. Voda se předeheje v trubkovém výměníku, pak se dohřeje na požadovanou teplotu ve výměníku tvořeného jedinou trubkou

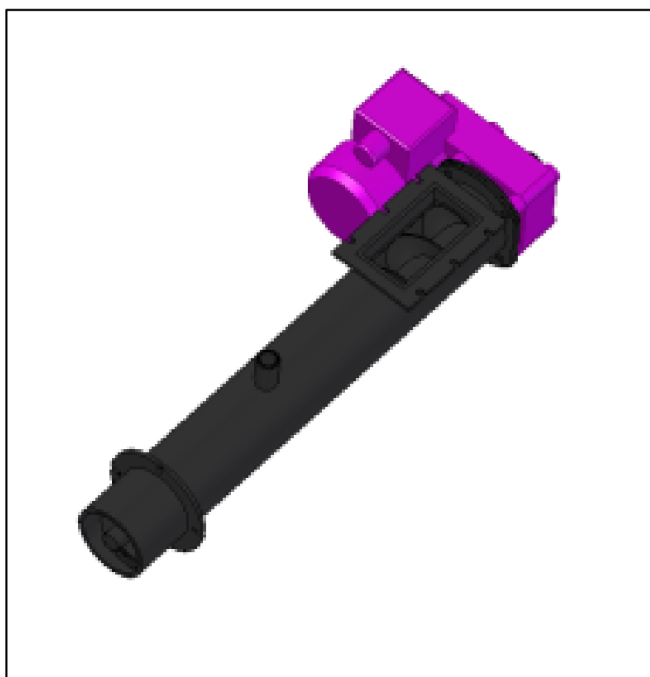


Obr. 26 - Spalinový výměník kotle

Výměník je také navržen s ohledem do budoucnosti, kdy by přidáním/ubráním řad trubkovic a lehkou konstrukční úpravou mohl být modifikovaný i pro jiné výkony.

5.4.4 Šnekový podavač paliva

Šnekový dopravník paliva má průměr 80 mm, protože tento průměr šneku nám již nerozdrťí pelety na malé kusy a současně zajistí dostatečné zásobování kotle peletami i při méně kvalitním palivu. Těleso dopravníku je tvořeno ocelovou trubkou o síle stěny 5 mm. Pohon šnekového dopravníku zajišťuje převodovka s elektromotorem. V převodovce je uložena hřídel samotného dopravníku, která je prodloužena až na druhou stranu za převodovku. Na této straně je hřídel osazena řetězovým kolem s nábojem. Řetězové kolo přenáší otáčky šnekového dopravníku na turniketový podavač paliva. Na něm je osazeno velké řetězové kolo, tak aby otáčky byly 3x menší. Na dopravníku je navařen nátrubek G ½ pro připojení vody aktivního hasicího zařízení kotle.



Obr. 27 - Šnekový dopravník

Motor s převodovkou Cantoni SSKh 71-6P2		
Výkon motoru	0,09	kW
Účinnost	87	%
Otáčky	660	rmp
Napětí	230	V
Frekvence sítě	50	Hz
IEC 60034-1		
Převodový poměr	1:56	
Typ	Long life lubrication	

Tab. 25 - Motor s převodovkou

5.4.5 Turniketový podavač paliva

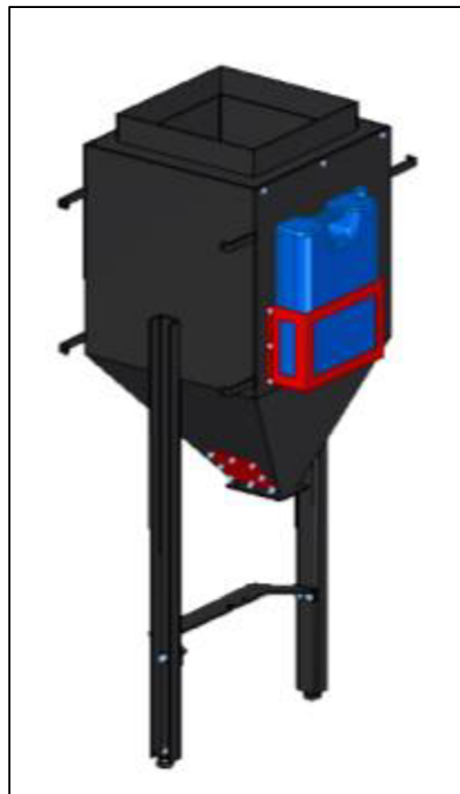
Slouží jako bezpečnostní zařízení proti prohoření ohně do zásobníku paliva. Jedná se o jedno z nejučinnějších opatření. Podavač je navržen jako bezúdržbový s uzavřenými kuličkovými ložisky. Je zpřevodován tak, aby dávkoval 3x pomaleji než jsou otáčky šnekového dopravníku.



Obr. 28 - Turniketový podavač

5.4.6 Zásobník paliva

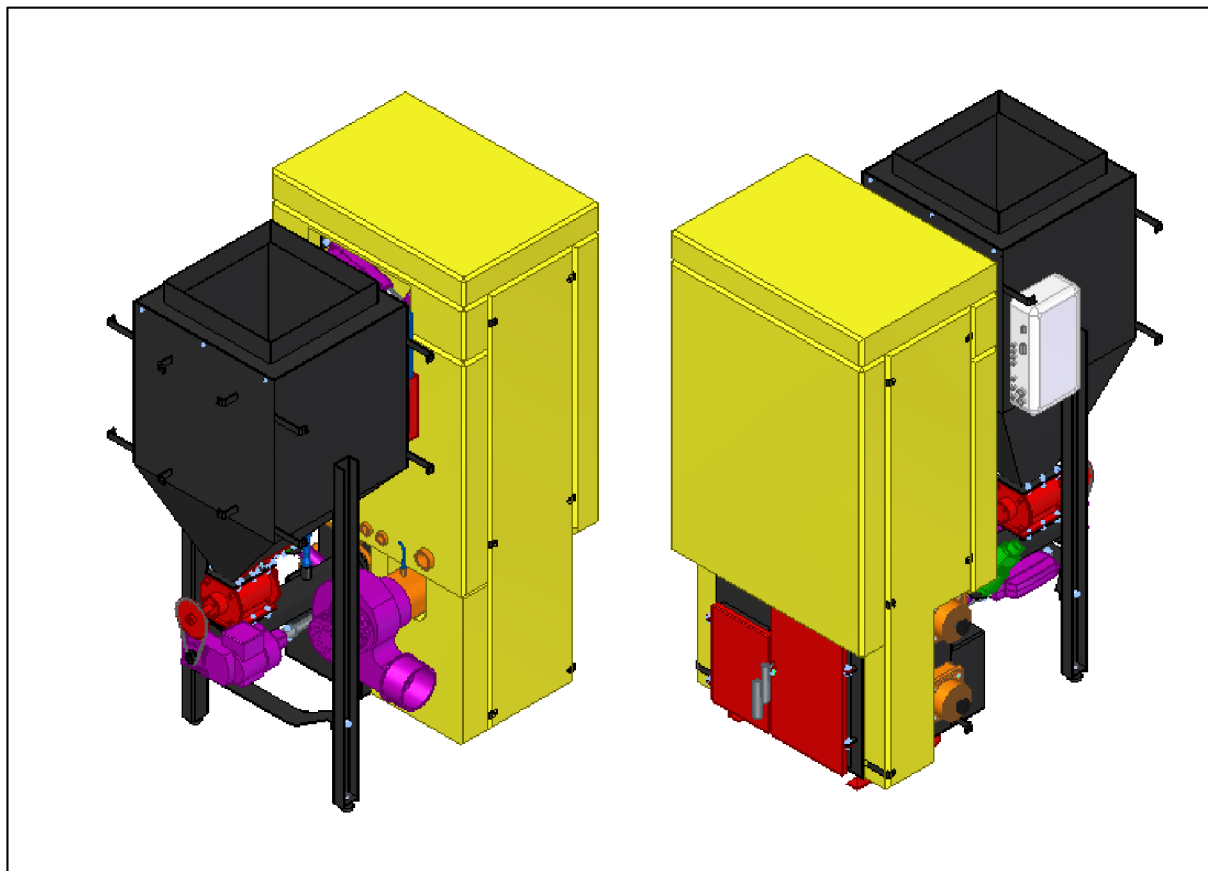
Zásobník je svařenec z plechu o síle 3 mm. Vejde se do něj přibližně 100 kg pelet. To znamená, že vystačí na cca 20 hodin provozu kotle. V horní části je zásobník opatřen vzduchotěsným víkem. Víko je možné otočit a tím je možné jej otevírat i z druhé strany. Zásobník je momentálně řešen pro ruční doplňování, ale horní příruba zásobníku je demontovatelná s možností předělat zásobník na plně automatický s funkcí nasávání pelet z celosezonního zásobníku pelet. Ve spodní části je navržen otvor pro vyprázdnění zásobníku v případě poruchy šnekového podavače. Na zásobníku je uchycena nádoba s vodou pro hasicí zařízení.



Obr. 29 - Zásobník paliva

5.4.7 Vnější izolace a opláštění kotle

Vnější izolace je nehořlavá o tloušťce 100 mm. Jedná se o izolaci ISOVER Orstech DP 100. Opláštění kotle je zhotoveno z tenkého plechu vhodně ohýbaného pro zvýšení tuhosti.



Obr. 30 - Izolace kotle

5.5 Řídící, regulační a zabezpečovací prvky kotle

5.5.1 Zabezpečení kotle

Havarijní termostat – slouží k zajištění topného systému proti přehřátí. Výrobce je nastaven na teplotu 95 °C Havarijní termostat je umístěn na zadní stěně kotle v rozvaděči řídicí jednotky.

Havarijní termostat Regulus 95H110R09/04756		
Teplotní rozsah nastavitelný	90-110	°C
Ovládání	Manuální	
Kapilára	1,5	m
Kontakty	Přepínací	
Hmotnost	0,07	kg
Rozměry	5 x 6 x 14	cm

Teplná ochrana motoru podavače paliva - slouží k jeho ochraně před poškozením v případě zablokování podavače paliva a je součástí motoru. Ochrana zároveň vypíná chod ventilátoru, aby v případě této poruchy nedošlo k prohoření paliva do zásobníku. Při běžném provozu je pracovní teplota motoru do 85°C.

Ochrana proti nízkoteplotní korozi - je nutné udržovat teplotu vratné vody nad hodnotou 50 °C. Tato ochrana může být zajištěna termostatickou směšovací armaturou.

Havarijní hasicí zařízení - je dalším zabezpečovacím prvkem proti prohoření paliva do zásobníku. V případě zvýšení teploty nad 95°C dojde k natavení parafínové zátky umístěné na šnekovém podavači a ochlazení tohoto prostoru chladicí vodou z plastové nádoby. Je-li kotel vybaven havarijním hasicím zařízením v podobě termostatického ventilu s tlakovou nádobou, při zvýšení teploty nad 95°C na šnekovém podavači dojde k otevření termostatického ventilu a ochlazení tohoto prostoru chladicí vodou z vodovodního řádu, popř. z instalované tlakové nádoby. Šnekový podavač paliva je také vybaven příložným snímačem teploty, který v případě prohoření paliva do zásobníku paliva dá informaci o zvýšení teploty řídicímu systému. Řídicí systém vypne spalovací vzduch a ukončí spalování.

Příložný snímač teploty Sensit S 150A		
Typ snímače	PTS 150A	
Měřicí rozsah	-30 až 130	°C
Max. ss měřicí proud	3	mA
Kalibrace provedena dle	ČSN EN ISO/IEC 17025	

Tab. 26 - Příložný snímač teploty

5.6 Voda pro kotel

Topný systém musí být napuštěn vodou, která splňuje požadavky ČSN 07 7401: 1992 a zejména její tvrdost nesmí přesáhnout požadované parametry

Název	Jednotka	Hodnota
Tvrdost	mmol/l	1
Ca ²⁺	mmol/l	0.3
Fe + Mn	mg/l	0.3

5.7 Možnosti umístění kotle

5.7.1 Umístění vzhledem k elektrické síti

Kotel musí být umístěn tak, aby vidlice v zásuvce (230V/50Hz) byla vždy přístupná. Kotel se připojuje k elektrické síti pohyblivým přívodem ukončeným normalizovanou vidlicí.

5.7.2 Umístění kotle s ohledem na požární předpisy

- Umístění na podlaze z nehořlavého materiálů - kotel postavit na nehořlavou tepelně izolující podložku přesahující půdorys kotle na všech stranách o 20 mm. Je-li kotel umístěn ve sklepě, doporučuje se umístit jej na podezdívku vysokou minimálně 50 mm. Kotel musí stát vodorovně, případné nerovnosti podezdívky se eliminují pomocí většího našroubování nebo vyšroubování nohy pod zásobníkem paliva
- Bezpečná vzdálenost od hořlavých hmot - nejmenší přípustná vzdálenost vnějších obrysů kotle a kouřovodu od hořlavých hmot (viz bližší specifikace v ČSN EN 13 501-1+A1:2010) při instalaci i při provozu kotle musí být nejméně 400 mm.

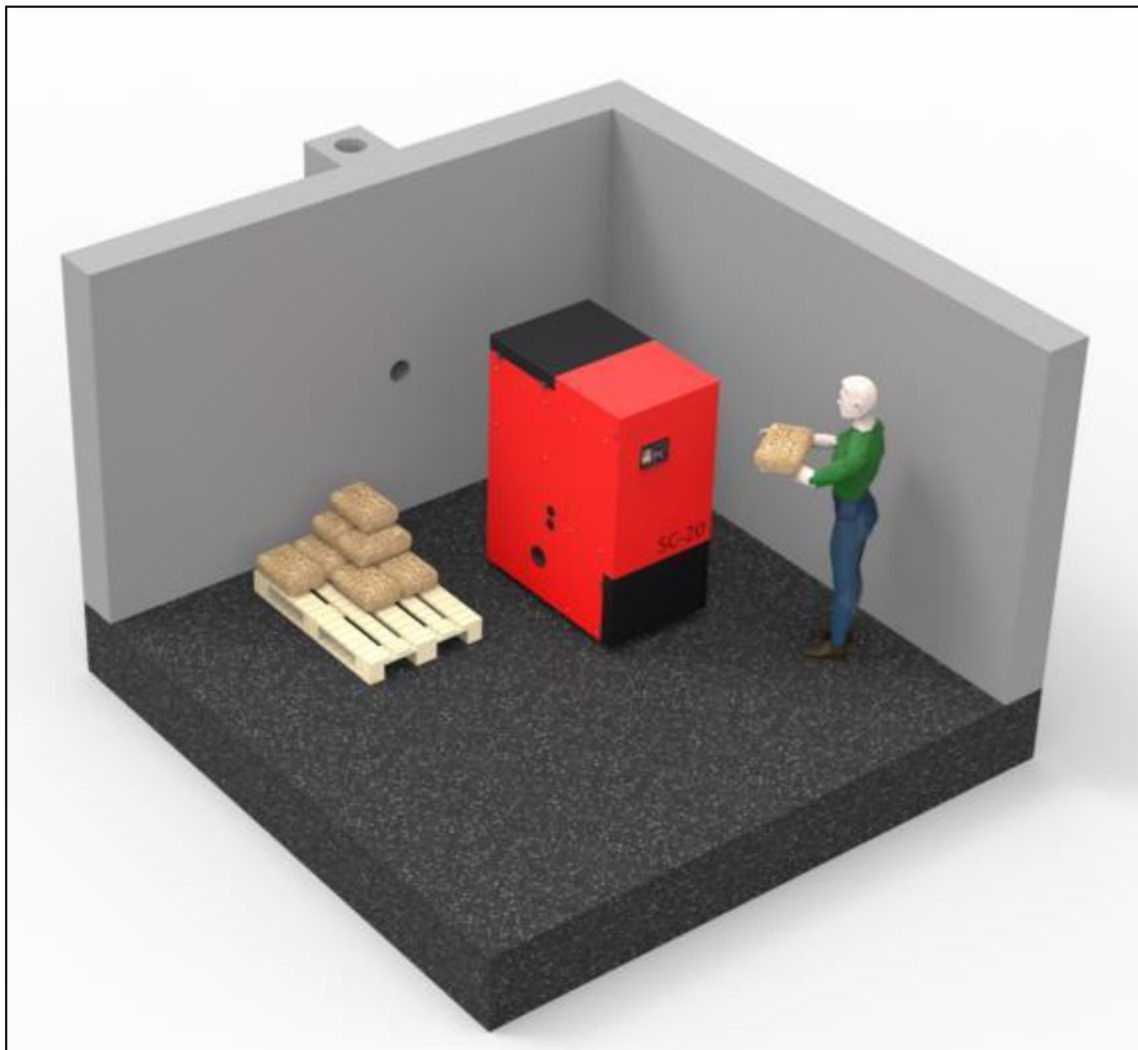
5.7.3 Umístění kotle

Kotel je určen pro instalaci a provoz v prostoru s prostředím základním (AA5/AB5) dle ČSN 33 2000-3. Kotel je nutno instalovat mimo obytné prostory.

Kotel v kotelně musí být umístěn tak aby před kotlem byl ponechán manipulační prostor min. 1000 mm, z bočních stran kotle musí být ponechán manipulační prostor min 800mm, ze zadní strany kotle je minimální prostor stanoven na 500 mm.

Kotel a násypka kotle musí být správně ustaveny - to se provede za pomoci stavitelných nožiček násypky paliva.

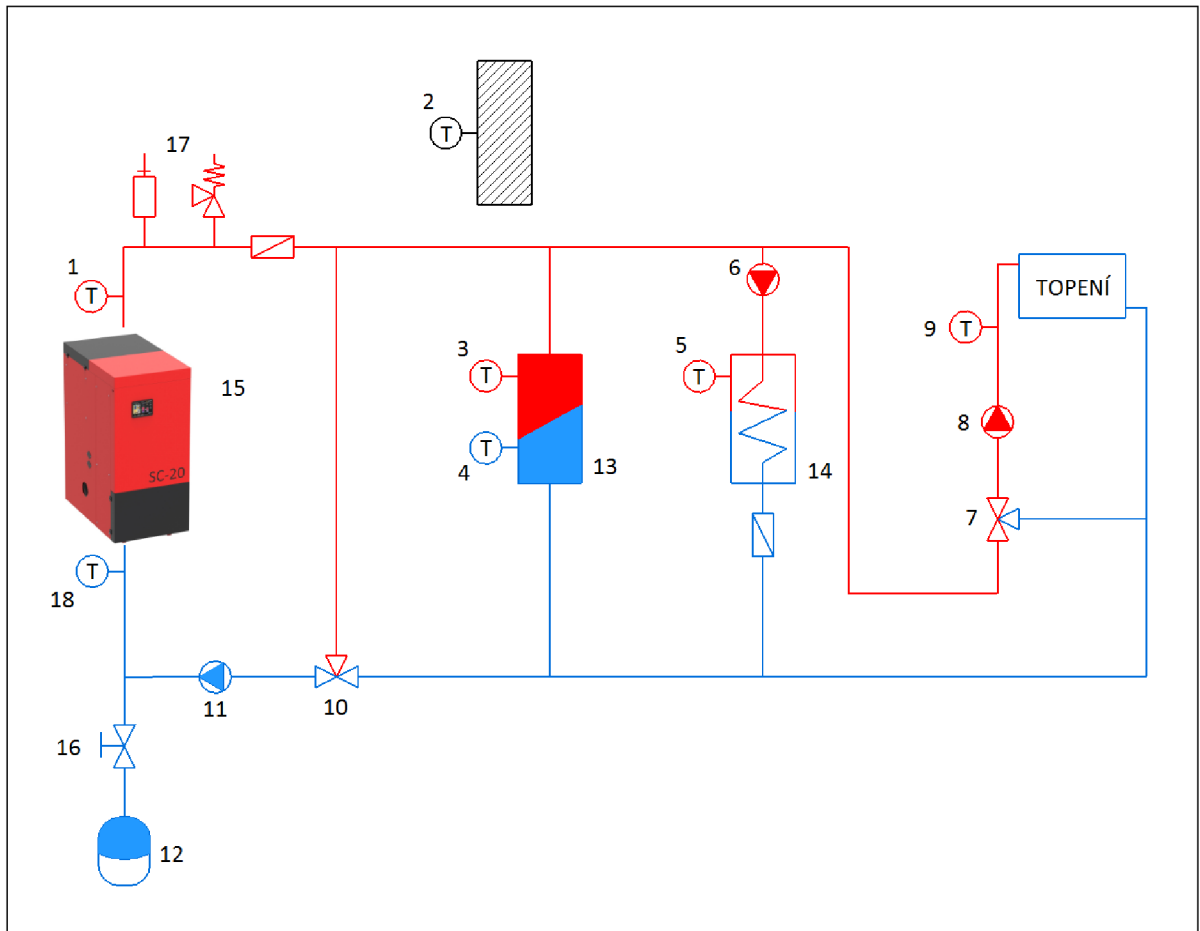
Kouřovod kotle musí být co možná nejkratší se stoupáním směrem ke komínu. Kouřovod delší jak 2 metry musí být pevně ukotven. Doporučuje se izolace kouřovodu, aby nedošlo k ochlazení kouřovodu. V případě poklesu teploty v kouřovodu pod teplotu rosného bodu spalin by začalo docházet k dehtování.



Obr. 31 - Umístění kotle v kotelně

5.8 Hydraulické schéma zapojení kotle

Na následujícím obrázku je nakresleno jedno z mnoha možných zapojení kotle.



Obr. 32 - Schéma zapojení kotle SC-20

Označení na hydraulickém schématu	Definice
1	Čidlo teploty kotle
2	Čidlo venkovní teploty
3	Čidlo teploty akumulární nádoby horní
4	Čidlo teploty akumulární nádoby spodní
5	Čidlo teploty teploty teplé vody
6	Čerpadlo teplé vody
7	Třicestný termostatický ventil
8	Čerpadlo topného okruhu
9	Čidlo teploty topného okruhu
10	Třicestný termostatický ventil zpátečky
11	Čerpadlo kotle
12	Expanzní nádoba
13	Akumulární nádoba
14	Boiler
15	Kotel SC-20

16	Kohout kulový
17	Pojišťovací ventil, ovzdušňovací ventil
18	Čidlo teploty zpátečky

Tab. 27 - Popis hydraulického schéma

5.9 Odhad ceny kotle

Předpokládaná cena kotle byla stanovena na základě poptávek jednotlivých komponent kotle u firem, které tyto součásti nabízí. Ostatní ceny byly stanoveny odhadem.

Nakupovaná součást	Předpokládaná cena (Kč bez DPH)
Ocelová konstrukce kotle (opláštění, výměník, podstavec, zásobník paliva, šnekový podavač, turniketový podavač,...)	31.000
Keramická vyzdívka kotle + tvarovky ze žárobetonu	3.000
Tepelná izolace kotle	2.000
Čidlo teploty spalin	600
Lambda sonda spalin	1.500
Lineární pohon čištění roštu a spalinového výměníku	5.000
Spalinový odtahový ventilátor	1.900
Řídicí systém kotle	12.000
Motor s převodovkou pro šnekový dopravník	5.000
Automatické zapalování kotle	10.000
Havarijní termostat kotle	500
Bezpečnostní zařízení proti prohoření do zásobníku paliva	1.000
Spojovací materiál	1.000
Řetězová kola	500
Montáž	Zahrnuta v ceně
Cena celého kotle	75.000

Cena 75.000 Kč bez DPH je u takto vybaveného kotle na pelety konkurenceschopná. Tuto cenu lze ještě určitě ovlivnit optimalizací konstrukce nebo výběrem jiných výrobců jednotlivých součástí.

6 Technicko-ekonomické zhodnocení užití kotle na pelety pro rodinný domek

Pro technicko-ekonomické zhodnocení užití kotle na pelety v rodinném domě je použit částečně zrekonstruovaný rodinný dům v okolí Olomouce, u kterého je známa jeho tepelná ztráta. Peletový kotel bude srovnán s různými palivy (uhlí, zemní plyn).

Jednotlivá ekonomická hodnocení jsou zjednodušená, protože se neuvažují ostatní náklady na pořízení kotleny (zásobníky paliva, odkouření, náklady na práci, ...). Současně se také neuvažuje údržba a servis kotlen v průběhu let. Tady tím se nedopustíme přílišné chyby, protože všechny tři způsoby vytápění mají zhruba stejné náklady na servis a revize.

6.1 Výpočet energie potřebné pro ohřev a vytápění RD

6.1.1 Energie potřebná pro ohřev TV

Teplota vstupní vody je volena $t_1 = 10 \text{ °C}$ a výstupní vody $t_2 = 55 \text{ °C}$. Objem teplé vody spotřebované jednou osobou za den je 50 l na osobu. Objekt obývají 4 osoby. Součinitel energetických ztrát systému je volen $z_e = 0,5$. Tato hodnota je zvolena nízká, protože dům před nedávem prošel kompletní rekonstrukcí vodovodních rozvodů.

Vstupní teplota vody	t_1	=	10	°C
Teplota výstupní vody	t_2	=	55	°C
Počet osob v domě	n_{osob}	=	4	-
Objem teplé vody spotřebované za den jednou osobou	V_{10S}	=	0,05	m^3
Celková spotřeba teplé vody	V_{2P}	=	0,2	m^3
Hustota vody	ρ	=	1000	kg/m^3
Měrná tepelná kapacita vody	c	=	4186	J/kgK
Součinitel energetických ztrát systému	z_e	=	0,5	-

Tab. 28 - Vstupní parametry výpočtu energie pro ohřev TV

Skutečné teplo potřebné k ohřátí TV za den

$$Q_{TVd} = (1 + z_c) \cdot \frac{\rho \cdot c \cdot V_{2p} \cdot (t_2 - t_1)}{3600}$$

$$Q_{TVd} = (1 + 0,5) \cdot \frac{1000 \cdot 4186 \cdot 0,2 \cdot (55 - 10)}{3600} \quad (76)$$

$$Q_{TVd} = 15,698 \text{ [kWh]}$$

Celková energie potřebná k ohřevu TV za rok

$$Q_{TVrok} = Q_{TVd} \cdot 365$$

$$Q_{TVrok} = 15,698 \cdot 365 \quad (77)$$

$$Q_{TVrok} = 5729,588 \text{ [kWh/rok]}$$

6.1.2 Energie potřebná pro vytápění

Výpočet energie potřebné pro vytápění bude proveden na základě znalosti tepelné ztráty objektu, průměrné vnitřní teploty a vnější výpočtové teploty.

Tepelná ztráta objektu	Q_c	=	14	kW
Průměrná vnitřní teplota	t_i	=	20	°C
Hodnoty dle ČSN EN 12831 - pro Olomouc a okolí				
Vnější výpočtová teplota	t_e	=	-15	°C
Průměrná teplota v otopném období	t_m	=	3,8	°C
Počet dnů otopného období	m	=	231	dní

Tab. 29 - Vstupní parametry pro výpočet energie potřebné pro vytápění

Teplo potřebné pro vytápění za den

$$Q_{vyt/den} = \frac{24 \cdot Q_c \cdot (t_i - t_m)}{(t_i - t_e) \cdot 1000}$$

$$Q_{vyt/den} = \frac{24 \cdot 14 \cdot (20 - 3,8)}{(20 - (-15)) \cdot 1000} \quad (78)$$

$$Q_{vyt/den} = 155,520 \text{ [kWh]}$$

Celkové teplo potřebné pro vytápění rodinného domu za rok

$$Q_{vyt/rok} = Q_{vyt/den} \cdot m$$

$$Q_{vyt/rok} = 155,520 \cdot 231 \quad (79)$$

$$Q_{vyt/rok} = 35925,120 \text{ [kWh/rok]}$$

Celkové teplo potřebné pro vytápění RD a ohřev TV

$$Q_{celk,rok} = Q_{TV,rok} + Q_{vyt,rok}$$

$$Q_{celk,rok} = 5729,588 + 35925,120 \quad (80)$$

$$Q_{celk,rok} = 41654,708 \text{ [kWh/rok]} = 149\,956,947 \text{ [MJ]}$$

6.2 Ekonomické zhodnocení

6.2.1 Plynový kotel

Pro výpočet byl vybrán kotel THERM 20 CXE.A od české firmy Thermona. Jedná se o plynový kotel s odtahem spalin do komínu. Kotel je kombinovaný kdy umožňuje topení a průtokový ohřev TUV. Kotli lze plynule regulovat výkon, dá se k němu připojit ekvitermální regulace.

Provedení odtahu spalin	komín	-
Maximální tepelný výkon	20	kW
Tepelný výkon na vytápění	8-20	kW
Maximální přetlak topného systému	3	bar

Maximální výstupní teplota topné vody	80	°C
Maximální hlučnost	52	dB
Účinnost kotle	92	%
Rozměry (výška, šířka, hloubka)	830, 430, 367	mm
Průměr kouřovodu	120	mm
Hmotnost kotle	35	kg

Tab. 30 - Technické parametry kotle na plyn

Pro výpočet uvažujeme jako dodavatele zemního plynu společnost RWE Energie, s.r.o. Ceny jsou uvažovány pro množství dodané energie v rozmezí nad 25 000 do 45 000 kWh/rok.

Pořizovací náklady na plynový kotel THERM 20 CXE.A	$N_{\text{pořizovací}}$	=	25000	Kč
Účinnost kondenzačního kotle	η_K	=	92	%
Cena plynu při odběru 25 000 až 45 000 kWh/rok	C_p	=	1,1468	Kč/kWh
Měsíční paušál při odběru 25 000 až 45 000 kWh/rok	C_m	=	299,56	Kč/měsíc
Meziroční průměrné navýšení cen	Z	=	2	%

Tab. 31 - Vstupní hodnoty pro výpočet ekonomiky kotle na plyn

Energie potřebná pro vytápění s uvážením účinnosti kotle

$$Q_{\text{celk},r,n} = \frac{Q_{\text{celk},r}}{\eta}$$

$$Q_{\text{celk},r,n} = \frac{41654,708}{92} \quad (81)$$

$$Q_{\text{celk},r,n} = 45276,856 \text{ [kWh]}$$

Celková cena za vytápění ZP v prvním roce

$$N_{\text{celk},ZP,1} = Q_{\text{celk},r,n} \cdot C_p + 12 \cdot C_m$$

$$N_{\text{celk},ZP,1} = 45276,856 \cdot 1,1468 + 12 \cdot 299,56 \quad (82)$$

$$N_{\text{celk},ZP,1} = 55518,218 \text{ [Kč]}$$

Celková cena za plyn pro 20 let

$$N_{\text{celk},ZP,20} = N_{\text{celk},ZP,1} + \sum_{i=2}^{20} (N_{\text{celk},ZP,i-1} + N_{\text{celk},ZP,i-1} \cdot Z) \quad (83)$$

$$N_{\text{celk},ZP,20} = 1348947 \text{ [Kč]}$$

i (rok)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$N_{\text{celk},ZP,i}$ (Kč)	55518	56629	57761	58916	60095	61297	62523	63773	65048	66349
i (rok)	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$N_{\text{celk},ZP,i}$ (Kč)	67676	69030	70411	71819	73255	74720	76215	77739	79294	80880

Tab. 32 – Provoz kotle na plyn v jednotlivých letech

Celková cena za plyn a pořízení kotle

$$N = N_{celk,ZP,20} + N_{pořizovací}$$

$$N = 1348947 + 25000 \quad (84)$$

$$N = 1373946 \text{ [Kč]}$$

6.2.2 Kotel na pelety

Pro výpočet bude použit kotel, který je vypočten v této diplomové práci. Parametry kotle SC-20 jsou uvedeny v předchozích kapitolách.

Pořizovací náklady na peletový kotel SC-20	$N_{pořizovací}$	=	85000	Kč
Účinnost kondenzačního kotle	η_K	=	91	%
Cena za tunu pelet	N_{pelet}	=	5500	Kč/tuna
Výhřevnost pelet	Q_r^i	=	17,2	MJ/kg
Meziroční průměrné navýšení cen	Z	=	1	%

Tab. 33 - Vstupní hodnoty pro výpočet ekonomiky kotle na pelety

Energie potřebná potřební pro vytápění s uvážením účinnosti kotle

$$Q_{celk,r,n} = \frac{Q_{celk,r}}{\eta}$$

$$Q_{celk,r,n} = \frac{149\,956,947}{91} \quad (85)$$

$$Q_{celk,r,n} = 164787,854 \text{ [MJ]}$$

Množství paliva spotřebovaného za rok

$$m_{pal,r} = \frac{Q_{celk,r,n}}{Q_r^i}$$

$$m_{pal,r} = \frac{149956,947}{17,2} \quad (86)$$

$$m_{pal,r} = 9580,6 \text{ [kg]} = 9,6 \text{ [tun]}$$

Celková cena za vytápění peletami v prvním roce

$$N_{celk,pelet,r} = m_{pal,r} \cdot N_{pelet}$$

$$N_{celk,pelet,r} = 9,6 \cdot 5500 \quad (87)$$

$$N_{celk,pelet,r} = 52693 \text{ [Kč]}$$

Celková cena za pelety pro 20 let

$$N_{celk,pelet,20} = N_{celk,pelet,1} + \sum_{i=2}^{20} (N_{celk,pelet,i-1} + N_{celk,pelet,i-1} \cdot Z) \quad (88)$$

$$N_{celk,pelet,20} = 1160265 \text{ [Kč]}$$

i (rok)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$N_{celk,ZP,i}$ (Kč)	52694	53221	53753	54290	54833	55382	55936	56495	57060	57630
i (rok)	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$N_{celk,ZP,i}$ (Kč)	58207	58789	59377	59970	60570	61176	61788	62405	63030	63660

Tab. 34 - Provoz kotle na pelety v jednotlivých letech

Celková cena za pelety a pořízení kotle

$$N = N_{celk,pelet,20} + N_{pořizovací}$$

$$N = 1160265 + 85000$$

$$N = 1245264 \text{ [Kč]}$$

(89)

6.2.3 Kotel na uhlí

Pro výpočet byl vybrán automatický kotel na uhlí C 16 Premium od firmy BENEKOV. Tento kotel umožňuje spoustu nastavení. Má poměrně velký popelník a násypku paliva.

Hmotnost	340	kg
Obsah vodního prostoru	62	dm ³
Výkon	19	kW
Účinnost	91	%
Teplosměnná plocha kotle	1,90	m ²
Třída kotle dle ČSN EN 305-5	4	-
Doporučená provozní teplota topné vody	65-80	°C
Rozměry kotle (šířka, výška, hloubka)	1279, 1399, 1036	mm

Tab. 35 - Technické parametry kotle na uhlí

Pro výpočet uvažujeme běžného malo-dodavatele pytlovaného uhlí pro kotle.

Pořizovací náklady na automatický kotel na uhlí Benekov C16 Premium	$N_{pořizovací}$	=	75800	Kč
Účinnost kondenzačního kotle	η_K	=	91	%
Cena za tunu pelet	$N_{uhlí}$	=	4400	Kč/tuna
Výhřevnost pelet	Q_{ir}	=	16,5	MJ/kg
Meziroční průměrné navýšení cen	Z	=	2	%

Tab. 36 - Vstupní hodnoty pro výpočet ekonomiky kotle na uhlí

Energie potřebná potřební pro vytápění s uvažáním účinnosti kotle

$$Q_{celk,r,n} = \frac{Q_{celk,r}}{\eta}$$

$$Q_{celk,r,n} = \frac{149\,956,947}{91} \quad (90)$$

$$Q_{celk,r,n} = 164787,854 [MJ]$$

Množství paliva spotřebovaného za rok

$$m_{pal,r} = \frac{Q_{celk,r,n}}{Q_r^i}$$

$$m_{pal,r} = \frac{149956,947}{16,5} \quad (91)$$

$$m_{pal,r} = 9987 [kg] = 10 [tun]$$

Celková cena za vytápění uhlím v prvním roce

$$N_{celk,uhlí,r} = m_{pal,r} \cdot N_{pelet}$$

$$N_{celk,uhlí,r} = 10 \cdot 4400 \quad (92)$$

$$N_{celk,uhlí,r} = 43943 [Kč]$$

Celková cena za pelety pro 20 let

$$N_{celk,ZP,20} = N_{celk,uhlí,1} + \sum_{i=2}^{20} (N_{celk,uhlí,i-1} + N_{celk,uhlí,i-1} \cdot Z)$$

$$N_{celk,ZP,20} = 1067709 [Kč] \quad (93)$$

i (rok)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$N_{celk,ZP,i}$ (Kč)	43943	44822	45719	46633	47566	48517	49487	50477	51487	52516
i (rok)	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$N_{celk,ZP,i}$ (Kč)	53567	54638	55731	56846	57982	59142	60325	61531	62762	64017

Tab. 37 - Provoz kolte na uhlí v jednotlivých letech

Celková cena za pelety a pořízení kotle

$$N = N_{celk,pel,20} + N_{pořizovací}$$

$$N = 1067709 + 75800 \quad (94)$$

$$N = 1143509 [Kč]$$

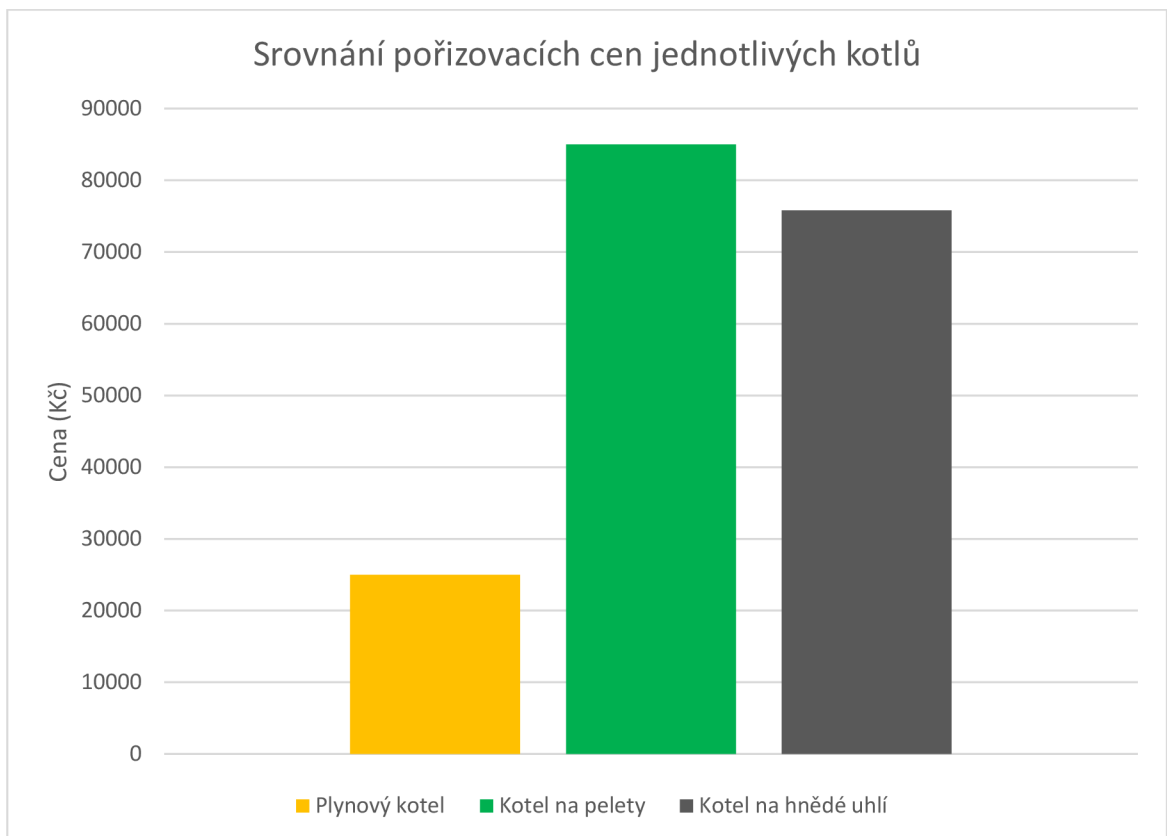
6.3 Ekonomické vyhodnocení jednotlivých variant

Z pohledu ekonomiky provozu a pořízení jsou srovnávány tři různé způsoby vytápění. Do této ekonomiky nejsou zahrnuty náklady na provoz jednotlivých zařízení (servis, údržba a revize jsou pro všechny tři druhy zhruba stejně drahé). Také zde nejsou zahrnuty aktuálně vypsané dotační programy jako např. *Nová zelená úsporám*, ve které jsou kotle na pelety finančně podpořeny.

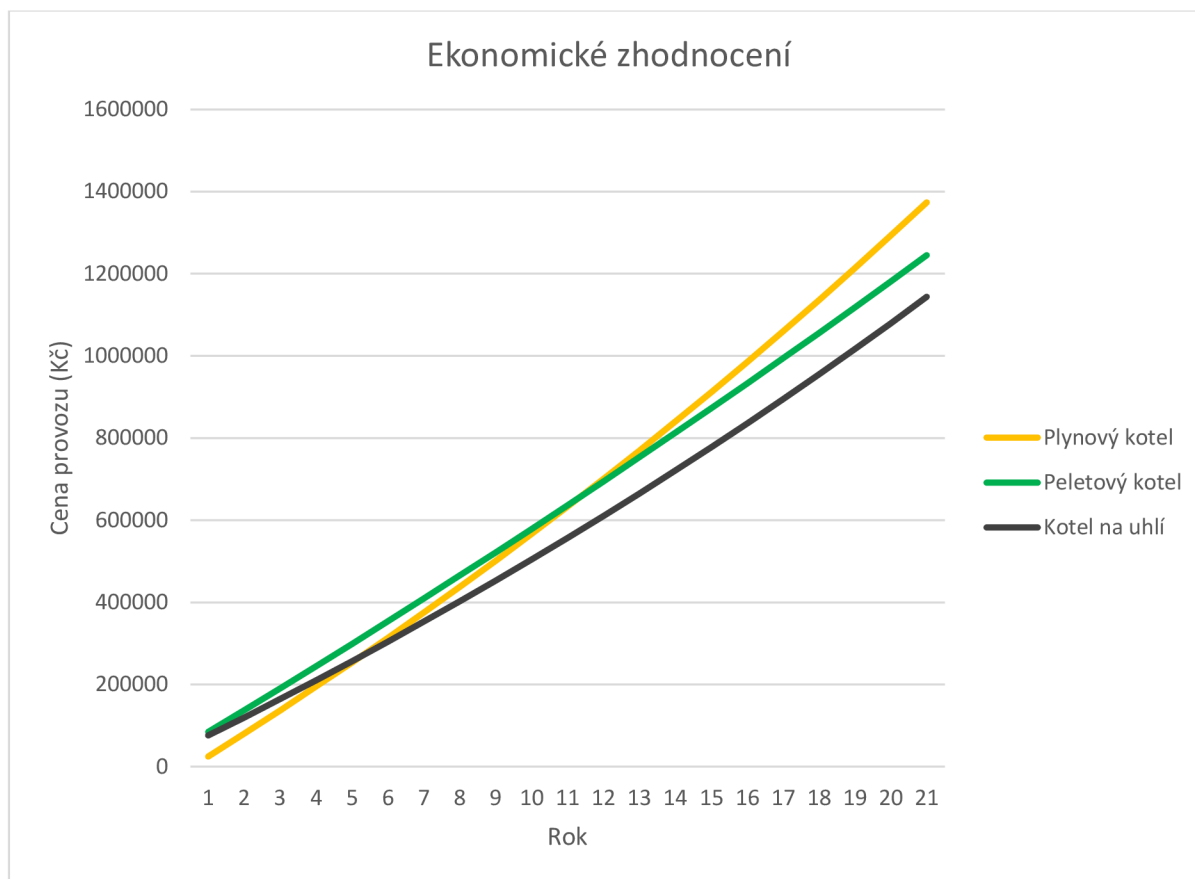
V následujících grafech je vidět, že pořízení kotle na plyn je nejlevnější variantou, avšak s přibývajícím rokem provozu se stane variantou nejdražší. Nejlevnější variantou je vytápět zvolený objekt uhlím. Tento způsob vytápění však není tak komfortní jako zbylé dva způsoby, protože spalováním uhlí nám vzniká velké množství popela, manipulace s uhlím je špinavá a prašná. Je potřebné častější čištění kotle a komína.

Jako optimální varianta se tedy jeví topení peletami. Je sice o něco dražší než topení uhlím, ale zachovává nám komfort topení plynem. V případě odpopelnění a celosezónního zásobníku paliva prakticky o kotli celou topnou sezónu nevíme. Pelety jsou čistým a ekologickým zdrojem tepla.

Z těchto uvedených důvodů bych pro vytápění zvoleného objektu volil vytápění peletami.



Graf 2 - Srovnání pořizovacích cen jednotlivých kotlů



Graf 3 - Ekonomické zhodnocení

7 Závěr

V rámci této diplomové práce měl být proveden výpočet a návrh automatického kotle na pelety.

První část práce je teoretická a je zaměřena na seznámení se s dřevními peletami a způsoby jejich spalování. Při zpracování této části byl kladen důraz na konstrukční části peletového kotle, které se následně promítly do vlastní konstrukce zařízení.

V praktické části byl proveden návrh a konstrukční studie peletového kotle s názvem SC-20 a výkonem 20 kW. Podařilo se navrhnout plně automatický kotel, který dokáže spalovat i pelety horší kvality s vysokou účinností spalování. Kotel je konstrukčně a výrobně jednoduchý. Skládá se z několika částí, tak aby v případě poruchy mohlo dojít k rychlé výměně. Konstrukce kotle je také navržena s ohledem na jiné výkony tohoto kotle, kdy do budoucna by bylo velice snadné přidáním řad trubkovnic vytvořit další výkonové řady kotle. Všechny zde popsané vlastnosti kotle je však nyní nutné ověřit na prototypu.

Postup návrhu kotle byl následující:

1. Výpočet vlastností spalin
2. Výpočet spalínového výměníku
3. Rozměrový náčrt
4. Náčrt a 3D model možných řešení
5. Výběr nejvhodnějšího technického řešení
6. Detailní 3D rozkreslení kotle na pelety (finální sestava kotle má 1116 součástí z tohoto počtu je 297 unikátních součástí)
7. Rozměrový výkres všech hlavních přípojení kotle
8. Vizualizace

Odhadovaná výrobní cena v této práci navrženého kotle je 75 000 Kč bez DPH. V případě, že dojde k definitivnímu rozhodnutí o realizaci této studie, tak finální výrobní verze kotle by se na českém trhu mohla objevit na podzim příštího roku.

Kromě návrhu automatického kotle na pelety bylo cílem diplomové práce technicko-ekonomické posouzení užití kotle na pelety pro zvolený objekt. Jako objekt byl zvolen starší dům po částečné rekonstrukci v okolí Olomouce. Topení peletami bylo porovnáváno ještě s topením plynem a uhlím. Toto srovnání bylo provedeno pro časový úsek 20 let a byla do něj zahrnuta i rostoucí cena paliva. Srovnávací výpočet nám zobrazil následující informace:

- **Plynový kotel** – nejlevnější na pořízení, ale nejdražší na provoz.
 - Plusy: čisté, na zařízení nenáročné a téměř bezúdržbové topení
 - Mínusy: ne všude je plynová přípojka, drahý na provoz
- **Automatický kotel na uhlí** – na pořízení zhruba stejně drahý jako kotel na pelety, ale provozně všech kotlů nejlevnější. Je to díky momentálně hodně levnému uhlí.
 - Plusy: levné palivo
 - Mínusy: špinavý provoz kotle, obsluha kotle (popel), neekologické
- **Automatický kotel na pelety** – pořizovací cena je nevyšší, ale provozně je levnější než kotel na plyn.
 - Plusy: čisté, bezúdržbové a ekologické topení
 - Mínusy: vysoká pořizovací cena

Pro vybraný objekt bych volil kotel na pelety a to kvůli čistotě topení oproti uhlí.

Použité informační zdroje

1. Lyčka, Zdeněk. *Dřevní peleta*. Krnov : Lyng vydavatelství s.r.o., 2011. str. 66. ISBN 978-80-904914-0-3.
2. ČSN EN ISO 17225-2. *Tuhá biopaliva - Specifikace a třídy paliv - Část 2: Tříděné dřevní pelety*.
3. Stupavský, Vladimír. Pelety z biomasy - dřevěné, rostlinné, kůrové pelety. *Biom.cz*. [Online] 2010. [Citace: 2. Květen 2015.] <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/pelety-z-biomasy-drevene-rostlinne-kurove-pelety>. 1801-2655.
4. Česká peleta. *Česká peleta*. [Online] [Citace: 11. Květen 2015.] <http://www.ceska-peleta.cz/clanky-klastru/ceske-peletarny-lisuji-od-rana-do-noci-vyrobi-az-200-tisic-tun-drevenych-pelet-rocne/>.
5. Vladimír, Stupavský. Kotel na pelety - peletový kotel pro ústřední vytápění. *Biom.cz*. [Online] 01. 01 2010. [Citace: 11. Květen 2015.] <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/kotel-na-pelety-peletovy-kotel-pro-ustredni-vytapeni>. 1801-2655.
6. Lyčka, Zdeněk. *Dřevní peleta II*. 1. Krnov : LING Vydavatelství s.r.o., 2011. str. 72. ISBN 978-80-904914-1-0.
7. Jan Kolonický, Jiří Horák, Silvie Petránková Ševčíková. *Kotle malých výkonů na pevná paliva*. Ostrava : Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2011. str. 107. ISBN 978-80-248-2542-7.
8. ČSN EN 15270. *Hořáky spalující pelety pro kotle malých výkonů - Terminologie, požadavky, zkoušení, značení*.
9. *Verner expert na teplo*. [Online] [Citace: 20. Květen 2015.] <http://www.kotle-verner.cz/>.
10. Lyčka, Zdeněk. *Teplovodní kotle na pevná paliva*. Krnov : Ling vydavatelství s.r.o., 2012. str. 96. ISBN 978-80-904914-2-7.
11. ČSN EN 303-5. *Kotle pro ústřední vytápění - Část 5: Kotle pro střední vytápění na pevná paliva, s ruční samočinnou dodávkou, o jmenovitém tepelném výkonu nejvýše 500 kW*.
12. Budaj, Florian. *PARNÍ KOTLE Podklady pro tepelný výpočet*. Brno : Nakladatelství VUT Brno, 1992. str. 200. ISBN 9788021404267.
13. Dlouhý, Tomáš. *Výpočty kotlů a spalinových výměníků*. Praha : Nakladatelství ČVUT, 2007. str. 212. ISBN: 9788001037577.
14. Noskiewič, Pavel. Účinnost spalovacích zařízení. [Online] [Citace:] <http://vec.vsb.cz/userfiles/pdf/studijni-materialy/ucinnost.pdf>.
15. Petr, Stehlík, Kohoutek, Josef a Němčanský, Jan. *Tepelné pochody - Výpočet výměníku tepla*. Brno : VUT Brno, 1991. str. 127. ISBN 80-214-0363-2.
16. ČSN EN 14785.
17. ČSN EN ISO 17225-1. *Tuhá biopaliva - Specifikace a třídy paliv - Část 1: Obecné požadavky*.

Seznam obrázků

Obr. 1- Dřevní peleta [3]	14
Obr. 2- Peletování [4]	17
Obr. 3- Možnosti balení pelet	18
Obr. 4- Kotel na pelety GUNTAMATIC BIOSTAR [5]	20
Obr. 5- Hořák se spodním přívodem paliva [7]	22
Obr. 6- Hořák s vodorovným přívodem paliva [7]	22
Obr. 7- Hořák s horním přívodem paliva [7]	23
Obr. 8- Retortový hořák [6]	23
Obr. 9- Miskový hořák [6]	25
Obr. 10 - Roštový hořák firmy VERNER SK a PONAŠT [8]	25
Obr. 11 - Turbulátory	29
Obr. 12 - Protokol o měření dřevních pelet	39
Obr. 13 - Střední logaritmický teplotní spád	56
Obr. 14 - První koncepce kotle na pelety	62
Obr. 15 Studie kotle na pelety č.14	63
Obr. 16 - Automatický kotel na pelety SC-20	63
Obr. 17 - Kotel na pelety SC-20	64
Obr. 18 - Kotel na pelety SC-20	65
Obr. 19 - Automatický kotel na pelety SC-20	68
Obr. 20 - Řez automatickým kotlem na pelety SC-20	69
Obr. 21 - Nezaizolovaný a nezakrytovaný kotel SC-20	69
Obr. 22 - Podstavec a spalovací komora	70
Obr. 23 - Rošt kotle	72
Obr. 24 - Rošt kotle	72
Obr. 25 - Spalinový výměník kotle	73
Obr. 26 - Spalinový výměník kotle	73
Obr. 27 - Šnekový dopraník	74
Obr. 28 - Turniketový podavač	75
Obr. 29 - Zásobník paliva	75
Obr. 30 - Izolace kotle	76
Obr. 31 - Umístění kotle v kotelně	78

Obr. 32 - Schéma zapojení kotle SC-2079

Seznam tabulek

Tab. 1- Specifikace tříděných dřevních pelet pro obchodní účely a vytápění v obytných domech [2]	16
Tab. 2 - Prostu tepla stěnou trubky	28
Tab. 3 - Výrobci kotlů	31
Tab. 4 - Minimální tloušťky stěn kotle	33
Tab. 5 - Mezní hodnoty emisí	37
Tab. 6 - Parametry kotle	38
Tab. 7 - Vlastnosti okolí	38
Tab. 8 - Složení výpočtového paliva	39
Tab. 9 - Charakteristika plynných složek spalin a vzduchu	45
Tab. 10 - Tepelná kapacita spalin	46
Tab. 11 - Fyzikální charakteristiky spalin	47
Tab. 12 - Dynamická viskozita spalin	48
Tab. 13 - Entalpie spalin	49
Tab. 14 - Entalpie spalin s přebytkem vzduchu	50
Tab. 15 - Vlastnosti spalin	55
Tab. 16 - Vlastnosti vody	55
Tab. 17 - Geometrické rozměry výměníku	56
Tab. 18 - Geometrické rozměry prvního tahu výměníku	60
Tab. 19 - Parametry kotle na pelety SC-20	66
Tab. 20 - Parametry spalinového ventilátoru	71
Tab. 21 - Automatické zapalovací zařízení	71
Tab. 22 - Lineární pohon roštu a odpopelňovače	71
Tab. 23 - Odporový snímač teploty	71
Tab. 24 - Lambda sonda	71
Tab. 25 - Motor s převodovkou	74
Tab. 26 - Příložný snímač teploty	77
Tab. 27 - Popis hydraulického schéma	80
Tab. 28 - Vstupní parametry výpočtu energie pro ohřev TV	81
Tab. 29 - Vstupní parametry pro výpočet energie potřebné pro vytápění	82
Tab. 30 - Technické parametry kotle na plyn	83

Tab. 31 - Vstupní hodnoty pro výpočet ekonomiky kotle na plyn.....	83
Tab. 32 – Provoz kotle na plyn v jednotlivých letech	84
Tab. 33 - Vstupní hodnoty pro výpočet ekonomiky kotle na pelety	84
Tab. 34 - Provoz kotle na pelety v jednotlivých letech	85
Tab. 35 - Technické parametry kotle na uhlí.....	85
Tab. 36 - Vstupní hodnoty pro výpočet ekonomiky kotle na uhlí.....	85
Tab. 37 - Provoz kolte na uhlí v jednotlivých letech.....	86

Seznam grafů

Graf 1 - I-t diagram spalín	50
Graf 2 - Srovnání pořizovacích cen jednotlivých kotlů.....	87
Graf 3 - Ekonomické zhodnocení	88

Seznam příloh

Příloha č.1 – Výkres sestavy automatického kotle na pelety SC-20

Seznam použitých zkratek

TV	Teplá voda
TUV	Teplá užitková voda

Seznam použitých značek a symbolů

M_{den}^{pal}	Spotřeba paliva – denní	[t·den ⁻¹]
M_{hod}^{pal}	Spotřeba paliva – hodinová	[kg·hod ⁻¹]
Nu_{sp}	Nuseltovo číslo	[-]
O_{Ar}	Objem Ar z 1 kg paliva	[Nm ³ ·kg ⁻¹]
O_{CO_2}	Objem CO ₂ z 1 kg paliva	[Nm ³ ·kg ⁻¹]
$O_{H_2O}^S$	Minimální objem vodní páry z 1 kg paliva	[Nm ³ ·kg ⁻¹]
$O_{H_2O}^V$	Objem vodní páry z 1 kg paliva	[Nm ³ ·kg ⁻¹]
O_{N_2}	Objem N ₂ z 1 kg paliva	[Nm ³ ·kg ⁻¹]
$O_{O_2\min}$	Minimální množství kyslíku ke spálení 1 kg paliva	[Nm ³ ·kg ⁻¹]
O_{SO_2}	Objem SO ₂ z 1 kg paliva	[Nm ³ ·kg ⁻¹]
$O_{SS\min}$	Minimální objem suchých spalin z 1 kg paliva	[Nm ³ ·kg ⁻¹]
$O_{SV\min}$	Minimální objem vlhkých spalin z 1 kg paliva	[Nm ³ ·kg ⁻¹]
$O_{VS\min}$	Minimální objem suchého vzduchu ke spálení 1 kg paliva	[Nm ³ ·kg ⁻¹]
$O_{VV\min}$	Minimální objem vlhkého vzduchu ke spálení 1 kg paliva	[Nm ³ ·kg ⁻¹]
P_k	Výkon kotle	[MW]
Pr_{sp}	Prantlovo číslo	[-]
Q_i^r	Výhřevnost paliva	[GJ·t ⁻¹]
Re_{sp}	Raynoldsovo číslo	[-]
V_{sp}	Objemový průtok spalin	[Nm ³ ·hod ⁻¹]
$a_{ú}$	Množství úletu popílku	[-]
cp_{sp}	Měrná tepelná kapacita spalin	[kJ/Nm ³ ·K ¹]
d	Vnitřní průměr trubky	[m]
d_o	Vnější průměr trubky	[m]
g	Tíhové zrychlení	[Pa]
i_{Ar}^t	Entalpie Ar	[kJ·kg ⁻¹]
$i_{CO_2}^t$	Entalpie CO ₂	[kJ·kg ⁻¹]
$i_{H_2O}^t$	Entalpie vodní páry	[kJ·kg ⁻¹]
$i_{N_2}^t$	Entalpie N ₂	[kJ·kg ⁻¹]
i_{pop}^t	Entalpie popílku	[kJ·kg ⁻¹]
$i_{SO_2}^t$	Entalpie SO ₂	[kJ·kg ⁻¹]
k	Součinitel prostupu tepla	[W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]
l	Délka rovného úseku trubky	[m]
m_{pal}	Měrná hmotnost paliva	[kg·m ³]
n_{tr}	Počet trubek výparníku	[ks]
p''	Parciální tlak vodní páry na mezi sytosti	[MPa]
p_c	Celkový tlak	[MPa]

q	Měrné teplo	$[\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$
w_{sp}^{sk}	Skutečná rychlost spalin	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$
x_5	Korekční faktor	$[-]$
y_1	Korekční faktor	$[-]$
y_2	Korekční faktor	$[-]$
ΔT_{\ln}	Střední logaritmický spád	$[\text{°C}]$
α	Součinitel přebytku spalovacího vzduchu	$[-]$
α_1	Součinitel přestupu tepla	$[-]$
α_2	Součinitel přestupu tepla	$[-]$
η_k	Účinnost kotle	$[\%]$
λ_{sp}	Součinitel tepelné vodivosti spalin	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$
λ_t^{st}	Součinitel střední tepelné vodivosti trubky	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$
ν_{sp}	Součinitel kinematické viskozity spalin	$[\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$
π	Ludolfovo číslo	$[-]$
ρ_{Ar}	Hustota Ar	$[\text{kg} \cdot \text{Nm}^{-3}]$
ρ_{CO_2}	Hustota CO ₂	$[\text{kg} \cdot \text{Nm}^{-3}]$
ρ_{H_2O}	Hustota vodní páry	$[\text{kg} \cdot \text{Nm}^{-3}]$
ρ_{N_2}	Hustota N ₂	$[\text{kg} \cdot \text{Nm}^{-3}]$
ρ_{SO_2}	Hustota SO ₂	$[\text{kg} \cdot \text{Nm}^{-3}]$
ρ_{SV}	Hustota spalin s přebytkem vzduchu	$[\text{kg} \cdot \text{Nm}^{-3}]$
$\rho_{SV\min}$	Hustota stechiometrických spalin	$[\text{kg} \cdot \text{Nm}^{-3}]$
ρ_t^k	Hustota toluenu	$[\text{Pa}]$
ρ_{vS}	Hustota vlhkých spalin	$[\text{kg} \cdot \text{Nm}^{-3}]$
ρ_{vV}	Hustota vzduchu	$[\text{kg} \cdot \text{Nm}^{-3}]$
φ	Relativní vlhkost vzduchu	$[\%]$
χ_v	Podíl vodní páry na 1 Nm ³ suchého vzduchu	$[-]$
