

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STROJNÍ**



**BAKALÁŘSKÁ
PRÁCE**

2022

**ANDRII
MOZHAR**



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení:	Mozhar	Jméno:	Andrii	Osobní číslo:	492640
Fakulta/ústav:	Fakulta strojní				
Zadávající katedra/ústav:	Ústav energetiky				
Studijní program:	Teoretický základ strojního inženýrství				
Studijní obor:	bez oboru				

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Návrh zdroje pro centrální zásobování teplem

Název bakalářské práce anglicky:

Design of a source for central heat supply

Pokyny pro vypracování:

Navrhněte zdroj pro zásobování teplem na vytápění a výrovu TUV obytného objektu situovaného v oblasti Prahy. Špičkový dodávaný výkon je 750 kW, garantovat je třeba dodávku alespoň 60 % výkonu. Použitým palivem bude plyn a dřevní peletky. Zpracujte:

- 1) Roční diagram dodávky tepla
- 2) Celkovou roční dodávku tepla
- 3) Navrhněte počet kotlů vždy alespoň ve dvou variantách
- 4) Varianty provozně a ekonomicky porovnejte a doporuče nejvhodnější řešení

Seznam doporučené literatury:

VLACH, J.: Zásobování teplem a teplárenství, SNTL, 1989
KADRNOŽKA, J., OCHRANA, L.: Teplárenství. Brno: CERM, 2001

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

prof. Ing. Tomáš Dlouhý, CSc. ústav energetiky FS

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

Datum zadání bakalářské práce: **21.04.2022** Termín odevzdání bakalářské práce: **03.06.2022**

Platnost zadání bakalářské práce: **31.12.2023**

prof. Ing. Tomáš Dlouhý, CSc.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval zcela samostatně pod vedením prof. Ing. Tomáše Dlouhého, CSc. Veškeré prameny a zdroje informací, které jsem použil k sepsání této práce, byly citovány a jsou uvedeny v seznamu použitých zdrojů.

V Praze dne

.....

Andrii Mozhar

Anotační list

Jméno autora:	Andrii Mozhar
Název BP:	Návrh zdroje pro centrální zásobování teplem
Anglický název BP:	Design of a source for central heat supply
Akademický rok:	2021/2022
Ústav:	Ústav energetiky
Vedoucí BP:	prof. Ing. Tomáš Dlouhý, CSc.
Bibliografické údaje:	Počet stran: 68 Počet obrázků: 25 Počet tabulek: 13 Počet grafů: 29 Počet příloh: 1
Klíčová slova:	zásobování teplem, kotle, plyn, biomasa, účinnost, TUV
Keywords:	heat supply, boilers, gas, biomass, efficiency, DHW
Anotace:	Práce se zabývá návrhem zdroje tepla pro vytápění a výrobu TUV obytného objektu situovaného v oblasti Prahy. Zkoumá provoz několika různých konfigurací kotlů v typických dnech přechodného, letního a zimního období. Na jeho základě bude provedeno porovnání z hlediska investičních a provozních nákladů.
Abstract:	The work deals with the design of a heat source for heating and hot water production of a residential building located in the Prague area. The operation of several different boiler configurations on typical days of transition, summer and winter is investigated. Based on it, a comparison will be made in terms of investment and operating costs.

Poděkování

Chtěl bych poděkovat panu prof. Ing. Tomášovi Dlouhému, CSc., za množství připomínek a cenných rad při konzultacích.

Obsah

Úvod	10
Cíl práce	10
1. Obecná metodika návrhu zdroje	10
1.1. Určení potřeb tepla zásobovaných objektů	10
1.1.1. Teplo k ohřátí UV	11
1.1.2. Teplo ke krytí tepelných ztrát budovy	12
1.2. Roční trvání potřeb tepla	13
1.3. Určení potřebného instalovaného výkonu zdroje	14
2. Typy vytopen pro CZT	16
2.1. Druhy paliva	17
2.1.1. Pelety	17
2.1.2. Brikety	17
2.1.3. Dřevní štěpka.....	18
2.1.4. Topný olej.....	18
2.1.5. Plyny.....	18
2.1.6. Uhlí.....	19
2.2. Určení roční spotřeby paliva.....	19
2.3. Typy kotlů.....	20
2.3.1. Spalování na roštu	20
2.3.2. Spalování kapalných paliv	22
2.3.3. Spalování plynu	22
2.3.4. Zplyňování biomasy	23
2.4. Minimalizace emisí	24
2.4.1. Cyklonové odlučovače	25
2.4.2. Látkové filtry.....	25
2.5. Palivové hospodaření.....	26
2.5.1. Zásobování paliva	26
2.5.2. Manipulace s tuhými zbytky po spálení.....	27
3. Porovnání a volba zdroje pro CZT	27
4. Specifikace objektu a postupu řešení	28
4.1. Určení tepelných ztrát.....	29
4.2. Určení ročního diagramu dodávky tepla.....	30
5. Návrh zdrojů tepla	31
5.1. První varianta.....	31
5.2. Druhá varianta	34

5.3.	Třetí varianta	36
5.4.	Čtvrtá varianta	39
5.5.	Problematika nízkoteplotních kotlů.....	41
6.	Způsoby provozu.....	42
6.1.	Provoz s optimálním výkonem	44
6.2.	Provoz se stejným výkonem všech kotlů.....	45
6.3.	Provoz první varianty kotlů	46
6.3.1.	Přechodné období.....	46
6.3.2.	Zimní období.....	47
6.3.3.	Letní období.....	48
6.4.	Provoz druhé varianty kotlů	49
6.4.1.	Přechodné období.....	49
6.4.2.	Zimní období.....	50
6.4.3.	Letní období.....	51
6.5.	Provoz třetí varianty kotlů.....	51
6.5.1.	Přechodné období.....	51
6.5.2.	Zimní období.....	52
6.5.3.	Letní období.....	52
6.6.	Provoz čtvrté varianty kotlů	53
6.6.1.	Přechodné období.....	53
6.6.2.	Zimní období.....	54
6.6.3.	Letním období.....	55
7.	Výsledné účinnosti provozů	55
7.1.	Využití instalovaného výkonu.....	57
8.	Výpočty zásobníků	58
8.1.	Stanovení celkové roční dodávky tepla.....	58
8.2.	Stanovení množství spotřebovaného paliva	58
8.3.	Výpočet objemu týdenního zásobníku paliva.....	59
8.4.	Výpočet objemu denního zásobníku paliva.....	60
8.5.	Výpočet objemu zásobníku TUV	60
9.	Ekonomické porovnání.....	61
10.	Závěr	63
11.	Přílohy	64
11.1.	Příloha 1	64
	Seznam použitých zdrojů	65

Seznam symbolů, indexů a zkratk

CZT – centrální zásobování teplem

TUV – teplá užitková voda

UV – užitková voda

TOEL – extra lehký topný olej

LTO – lehký topný olej

Prms – prostorový metr sypaný

Prmr – prostorový metr rovnaný

q – metrický cent (*quintal*) je roven 100 kg

KVET – kombinovaná výroba elektřiny a tepla

Q_c [Wh] – celková spotřeba tepla

Q_{top} [Wh] – topné teplo

Q_{TUV} [Wh] – teplo určené k ohřevu TUV

P_{TUV}^W [W] – tepelný výkon k ohřátí TUV

P_{TUV} [W] – potřebný výkon pro ohřev TUV v určitém čase

\dot{V} [$m^3 \cdot h^{-1}$] – objemový tok vody spotřebovávané objektem

V [m^3] – denní odběr TUV

V_{sd} [m^3] – maximální střední denní odběr jedním odběratelem

V_{sh} [m^3] – objem hodinového odběru teplé vody jednou osobou

ρ [$kg \cdot m^{-3}$] – hustota vody

c [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$] – měrná tepelná kapacita vody

T_1 [°C] – teplota vody na vstupu do soustavy

T_2 [°C] – teplota vody na výstupu ze soustavy

U_m [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$] – součinitel prostupu tepla

P_{max} [W] – maximální tepelný výkon

P_{top} [W] – výkon potřebný ke krytí tepelných ztrát

P_{top_i} [W] – hodnota středního topného výkonu potřebného v *i*-tem dne

P_{tmax} [W] – maximální topný výkon

H [$W \cdot K^{-1}$] – měrná ztráta tepla objektem

t_1 [°C] – venkovní teplota
 t_2 [°C] – průměrná vnitřní teplota
 t_0 [°C] – střední denní venkovní teplota, při které se začíná vytápět
 t_{min} [°C] – minimální střední venkovní teplota
 t_{2n} [°C] – teplota udržovaná uvnitř budovy v noci
 t_{2d} [°C] – teplota udržovaná uvnitř budovy v denních hodinách
 t_e [°C] – výpočtová venkovní teplota
 z' [$d \cdot r^{-1}$] – trvání období s teplotami nižšími než t_1
 z [$d \cdot r^{-1}$] – trvání otopného období
 N [-] – počet odběratelů
 η_k – okamžitá účinnost k-tého kotle
 k [-] – číslo kotle
 n [-] – celkový počet použitých kotlů
 P_{hk} [W] – výkon k-tého kotle v konkrétní hodině
 P_{hc} [W] – výkon dodávání všemi použitými kotly v danou hodinu
 η [-] – střední okamžitá účinnost
 η_s [-] – účinnost závislá na vytížení kotlů
 η_c [-] – celková účinnost s uvažováním ztrát při odstávkách
 Q_{in} [Wh] – hodinová ztráta tepla po odstavení kotle
 Q_{in200} [Wh] – hodinová ztráta tepla po odstavení kotle o výkonu 200 kW
 Q_{in270} [kWh] – hodinová ztráta tepla po odstavení kotle o výkonu 270 kW
 V_k [m^3] – objem kotlové vody
 V_{k200} [m^3] – objem vody ve výměníku tepla z technického listu kotlů 200 kW
 Δt_{in} [°C · h^{-1}] – předpokládaný hodinový pokles teploty vody v kotli
 Q_s [Wh] – množství tepla dodávaného ve dvou vybraných dnech
 Q_z [Wh] – teplo ztracené kvůli přerušování provozu v těchto dnech
 τ_i [h] – doba využití instalovaného výkonu jedním kotlem
 τ [h] – doba využití instalovaného výkonu soustavy
 τ_z [h] – počet pracovních hodin, pro který je navržen zásobník

Q_i [kWh] – množství tepelné energie vyrobené jednotlivým kotlem za celý rok

P_i [kW] – jmenovitý výkon kotle

Q_p [kWh] – množství spotřebované energie danou variantou

m_b [kg] – množství spotřebovaných pelet

V_g [m³] – množství spotřebovaného plynu

H_b [MJ · kg⁻¹] – výhřevnost pelet

H_g [MJ · m⁻³] – výhřevnost plynu

V_{tz} [m³] – navržený objem týdenního zásobníku na pelety

V_{dz} [m⁻³] – navržený objem denního zásobníku na pelety

V_{zw} [m³] – objem vody v zásobníku

ρ_p [kg · m⁻³] – minimální hustota prostorového metru sypaných pelet

Q_{7d} [kWh] – množství potřebné energie ve vybraném týdnu

Q_d [kWh] – množství potřebné energie za den teoretického provozu s maximálním výkonem kotlů

q_p [–] – koeficient plnění prostoru

Q_v [kWh] – teplo, které má být naakumulované ve vodě

Úvod

Užitečné teplo je možné produkovat buď monovýrobou, anebo kombinovanou výrobou tepla a elektřiny. Nejvýhodnější z hlediska účinnosti je dodávka energií ze zdrojů pracujících v kombinovaném teplotěnském cyklu. Ceny takových zdrojů jsou výrazně vyšší a nevyplatí se do nich investovat ve všech případech. Často je výhodnější použití levnějších zdrojů pro výrobu samotného tepla, které se potom může vyrábět lokálně v decentralizovaných zdrojích anebo centrálně, když se vytvoří soustava jednoho nebo více zdrojů tepla a spotřebitelských systémů propojených tepelnou sítí. Tu pak nazýváme soustavou centrálního zásobování teplem. Výhodami CZT jsou:

- možná menší spotřeba paliva na jednotku dodaného tepla,
- možnost využití více druhů paliv,
- lepší hygienické podmínky výroby tepla,
- nižší emise, resp. jejich lepší rozptyl,
- centrální regulace množství dodávaného tepla,
- snížení nákladů na dopravu paliva a odvoz popela.

Ovšem vlivem jejich vyššího technického vybavení jsou vyšší i pořizovací náklady, které stoupají s výkonem zdrojů a náročností rozvodu tepla jednotlivým odběratelům. Další nevýhodou je potřeba vybudování a údržby tepelné sítě, jejíž provoz je spojen s potřebou čerpací práce a s tepelnými ztrátami. Proto je třeba pečlivě zvážit, jestli je realizace centrálního zdroje tepla v daných podmínkách smysluplná. [1]

Cíl práce

Cílem práce je navrhnout zdroj zásobování teplem, rozebrat možné varianty zapojení výtopen, posoudit výhody a nevýhody různých zdrojů a vybrat nejlepší řešení. Práce bude obsahovat určení požadavků na výkon zdroje vycházejících z meteorologických podmínek ve vybrané lokalitě, norem a předpisů v teplotěnsství. Při rozhodování se kladou velké nároky na šetrnost k životnímu prostředí a celkovou ekologii s ohledem na současný stav dostupných technologií.

1. Obecná metodika návrhu zdroje

1.1. Určení potřeb tepla zásobovaných objektů

K určení maximálního topného příkonu budeme vycházet z potřeb tepla zásobovaných objektů. Celkové množství potřebného tepla se skládá z tepla k ohřevu užitkové vody a tepla ke krytí tepelných ztrát.

$$Q_c = Q_{top} + Q_{TUV} \quad (1)$$

kde Q_c [kWh] – celková spotřeba tepla,

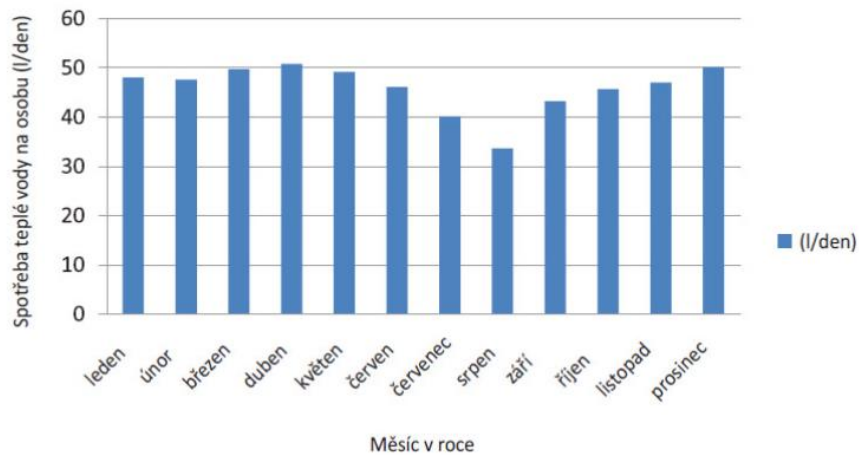
Q_{top} [kWh] – topné teplo,

Q_{TUV} [kWh] – teplo určené k ohřevu TUV.

1.1.1. Teplo k ohřátí UV

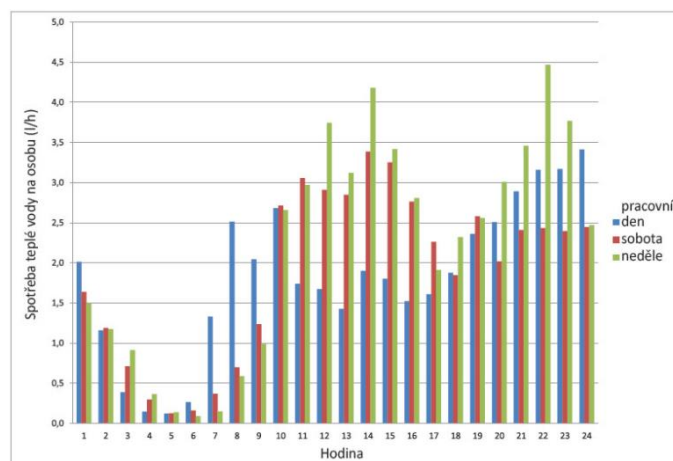
Q_{TUV} závisí na spotřebě teplé vody a teplotách vstupu a výstupu. Bude se uvažovat, že na vstupu do soustavy je teplota konstantní během celého roku $T_1 = 10\text{ }^\circ\text{C}$, teplotu UV dodávané odběratelům určuje norma ČSN 06 0320, dle které $T_2 = 55\text{ }^\circ\text{C}$. [1]

Z průběhu spotřeby teplé vody v typickém panelovém domě, který je znázorněn v Grafu 1, je vidět, že střední objem na jednoho obyvatele za den kolísá mezi 30 až 50 litry.



Graf 1 Střední spotřeba teplé vody na osobu během roku [3]

Ve špičkách, které jsou obvyklé v neděli, odběr UV jednou osobou dosahuje 4,5 litru za hodinu.



Graf 2 Denní odběr teplé vody v bytovém domě na obyvatele během týdne [3]

Maximální příkon potřebný k ohřátí UV potom je

$$P_{TUV}^W = \frac{Q_{TUV}^J}{3600} \quad (2)$$

$$Q_{TUV}^J = \rho \cdot \dot{V} \cdot c \cdot (T_2 - T_1) \quad (3)$$

kde $Q_{TUV}^J [J \cdot h^{-1}]$ – tepelný výkon k ohřátí TUV,

$P_{TUV}^W [W]$ – tepelný výkon k ohřátí TUV (převod na watty),

$\dot{V} [m^3 \cdot h^{-1}]$ – objemový tok vody spotřebovávané objektem,

$\rho [kg \cdot m^{-3}]$ – hustota vody,

$c [J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$ – měrná tepelná kapacita vody,

$T [°C]$ – teplota vody na vstupu do soustavy,

$T_2 [°C]$ – teplota vody na výstupu ze soustavy.

1.1.2. Teplo ke krytí tepelných ztrát budovy

Tepelné ztráty se počítají mnohem složitěji. K zabezpečení tepelného komfortu v budově se musí udržovat tepelná stabilita předepsaná normou ČSN 73 0540, v denních hodinách (6–22) musí být zajištěna teplota 20 °C, v noční době vytápění se omezí na udržení 18 °C. Průběh spotřeby tepla během roku přibližně odpovídá ročnímu průběhu teplot venkovního vzduchu, přičemž podle vyhlášky Ministerstva obchodu a průmyslu na území České republiky začíná topné období 1. září a končí 31. května. Tepelná energie se začne dodávat v topném období, poklesne-li teplota venkovního vzduchu ve dvou předchozích dnech pod 13 °C (respektive přestane se vytápět, když ve dvou po sobě následujících dnech teplota vystoupí nad 13 °C). [2]

Celkové tepelné ztráty se skládají ze ztrát prostupem a infiltrací. Výpočet je možné provést dvěma základními způsoby – obálkovou metodou, kde uvažujeme jen konstrukce jako obvodové stěny, podlahu na styku s půdou a střešní plášť, oddělující vytápěné prostory od venkovního prostředí, anebo složitějším a podrobnějším výpočtem, do kterého se započítává bilance každé jednotlivé místnosti.

Rozhodujícím je součinitel prostupu tepla, který nám udává, kolik tepla ztratí jeden metr čtvereční konstrukce při rozdílu teplot jeden kelvin. $U_m [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$ závisí na vlastnostech a tloušťce materiálu a spadá do daných charakteristik jednotlivých budov.

Popis konstrukce	Součinitel prostupu tepla U [$W/(m^2 \cdot K)$]		
	Požadované hodnoty $U_{N,20}$	Doporučené hodnoty $U_{rec,20}$	Doporučené hodnoty pro pasivní budovy $U_{pas,20}$
Stěna vnější	0,30	těžká: 0,25 lehká: 0,20	0,18 až 0,20
Stěna k nevytápěné půdě (se střešou bez tepelné izolace)	0,30	těžká: 0,25 lehká: 0,20	0,18 až 0,20
Střecha strmá nad 45°	0,30	0,20	0,18 až 0,20
Střecha do plochá a šikmá do 45° včetně	0,24	0,16	0,15 až 0,10
Strop s podlahou nad venkovním prostorem	0,24	0,16	0,15 až 0,10
Strop pod nevytápěnou půdou	0,30	0,20	0,15 až 0,10
Výplň otvoru ve vnější stěně a strmé střeše, z vytápěného prostoru do venkovního prostředí, kromě dveří	1,50	1,20	0,8 až 0,6
Šikmá výplň otvoru se sklonem do 45°	1,40	1,10	0,90
Strop a stěna vnitřní z vytápěného k nevytápěnému prostoru	0,60	0,40	0,30 až 0,20
Podlaha a stěna vytápěného prostoru přilehlá k zemině	0,45	0,30	0,22 až 0,15
Podlaha a stěna vytápěného prostoru k temperovanému prostoru	0,75	0,50	0,38 až 0,25

Obrázek č. 1 Požadované a doporučené hodnoty předepsané normou ČSN 73 0540-2

Zajímavá potom je měrná ztráta tepla H [$W \cdot K^{-1}$], která je vztažena na celou plochu pláště objektu. Příkon potřebný ke krytí tepelných ztrát za jednotku času se vypočte ze vztahu:

$$P_{top} = H \cdot (t_2 - t_1) \quad (4)$$

kde P_{top} [W] – výkon potřebný ke krytí tepelných ztrát,

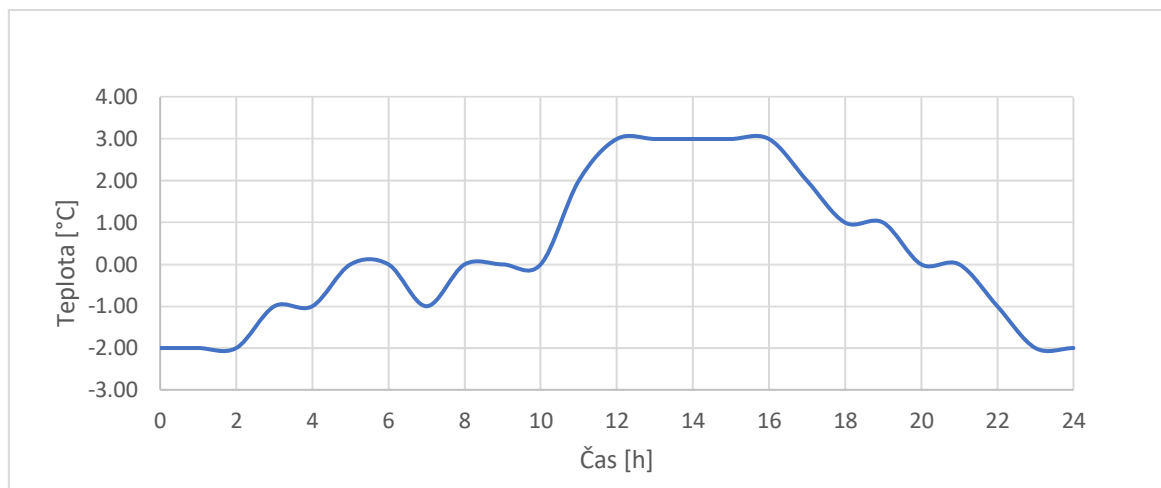
H [$W \cdot K^{-1}$] – měrná ztráta tepla objektem,

t_1 [$^{\circ}C$] – venkovní teplota,

t_2 [$^{\circ}C$] – teplota udržovaná uvnitř budovy.

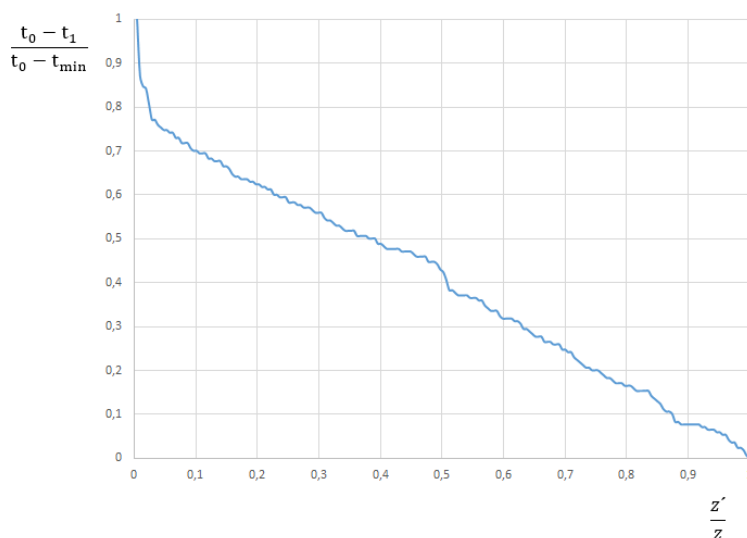
1.2. Roční trvání potřeb tepla

Absence velkých teplotních skoků vede k předpokladu, že budou srovnány tepelnou akumulací stěn budovy. Typický průběh teplot během dne může být potom zanedbán a je možné uvažovat střední denní teploty, které se berou jako aritmetické průměry čtyř teplot naměřených za den (v 7.00, 14.00 a 21.00 hodin (2x)). [2]



Graf 3 Průběh teplot 06.01.2020 [4]

Vzhledem k lineární závislosti potřeby tepla P_{top} na venkovní teplotě byly zkoumány střední denní teploty roku 2020 a sestrojena roční čára trvání teplot. Křivka ukazuje poměr rozdílu teploty ($t_0 = +13\text{ °C}$), při které se začíná vytápět, a okamžité venkovní teploty k maximálnímu rozdílu těchto teplot během otopné sezóny. Na vodorovnou osu se vynáší poměr doby (z'), kdy venkovní teploty jsou nižší než t_1 , k době trvání otopného období (z). Pro rok 2020 minimální střední venkovní teplota $t_{min} = -4\text{ °C}$ a doba vytápění $z = 194$ dnů. [1]



Graf 4 Roční čára trvání teplot

1.3. Určení potřebného instalovaného výkonu zdroje

Z údajů uvedených výše je možné spočítat tepelný příkon potřebný během dne a celého roku.

$$P_c = \rho \cdot \dot{V} \cdot c \cdot (T_2 - T_1) + \frac{1}{3} \cdot H \cdot (t_{2n} - t_1) + \frac{2}{3} \cdot H \cdot (t_{2d} - t_1) \quad (5)$$

kde P_c [W] – celkový potřebný výkon k vytápění a ohřevu TUV,

\dot{V} [$m^3 \cdot h^{-1}$] – objemový tok vody spotřebovávané objektem,

ρ [$kg \cdot m^{-3}$] – hustota vody,

c [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$] – měrná tepelná kapacita vody,

T_1 [$^{\circ}C$] – teplota vody na vstupu do soustavy,

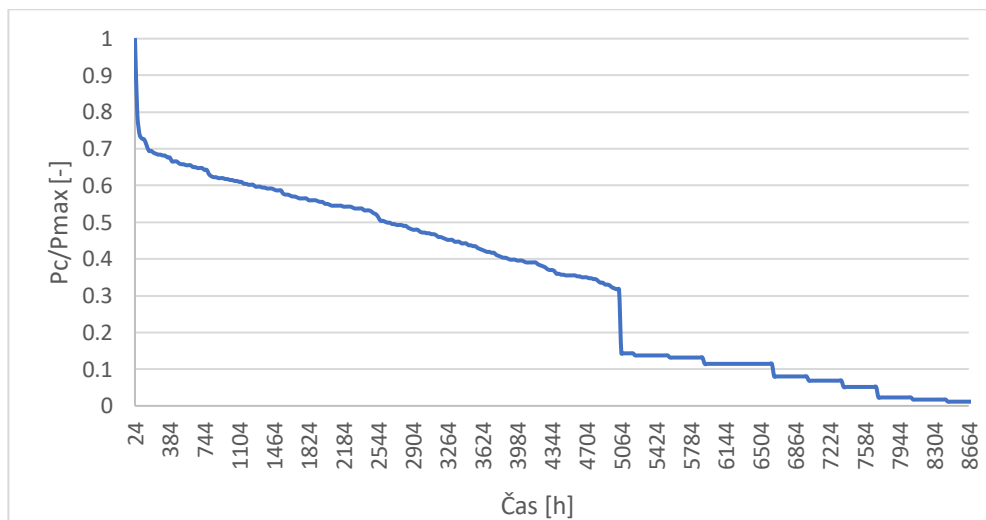
T_2 [$^{\circ}C$] – teplota vody na výstupu ze soustavy,

H [$W \cdot K^{-1}$] – měrná ztráta tepla objektem,

t_1 [$^{\circ}C$] – venkovní teplota,

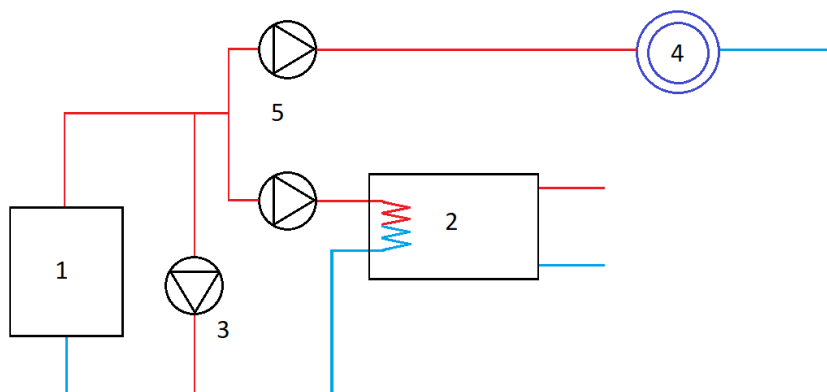
t_{2n} [$^{\circ}C$] – teplota udržovaná uvnitř budovy v noci,

t_{2d} [$^{\circ}C$] – teplota udržovaná uvnitř budovy v denních hodinách.



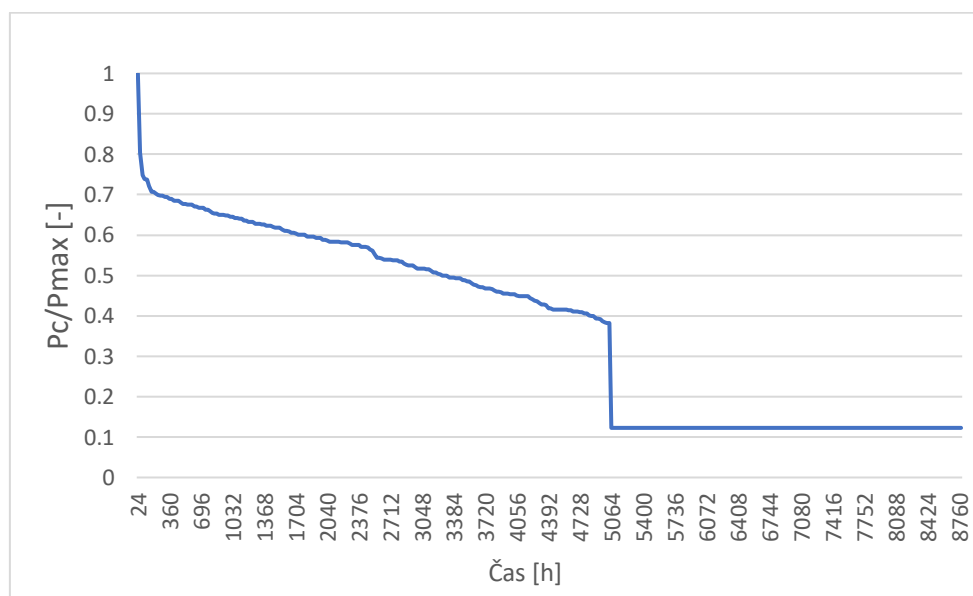
Graf 5 Roční diagram trvání potřeb tepla

Graf 5 znázorňuje dobu trvání potřeby tepla o různých příkonech. Je patrná potřeba dodávat teplo, které se použije k ohřátí UV, a to s ohledem na hodinový odběr z Graf 2 Denní odběr teplé vody v bytovém domě na obyvatele během týdne [3]. V otopném období se k této hodnotě přidá topné teplo. U klasických kotlů s klesajícím procentuálním výkonem zdroje klesá i jeho účinnost. Proto může být nevhodné, aby zdroj dodávající teplo měl jmenovitý výkon několikrát větší než výkon pracovní. Každý kotel má rozsah pracovních výkonů, pokud potřebný výkon bude menší než minimální, zajistit plynulou dodávku TUV může být problematické. Eliminovat rozdíly potřebného tepla je možné zavedením zásobníku teplé vody, který by měl srovnat změny potřeby teplé UV během dne. Zapojení zdrojů tepla a zásobníku může být realizováno dle schématu níže,



Obrázek č. 2 Schéma zapojení zásobníku ohřáté vody

kde 1 – zdroj tepla (kotel nebo soustava paralelně zapojených kotlů), 2 – zásobník teplé UV, 3 – směšovací čerpadlo pro zvýšení teploty vratné vody, 4 – spotřebitelská zařízení, 5 – čerpadla zajišťující tok ohřátého média.



Graf 6 Roční diagram seřazených potřeb tepla (varianta se zásobníkem)

Na rozdíl od Graf 5 je patrná stálost celkového potřebného příkonu v době, kdy se používá jen na výrobu TUV. Hodnota špičkového výkonu P_{max} je také nižší.

2. Typy vytopen pro CZT

Při spalovacím procesu palivo interaguje s kyslíkem, dochází k uvolnění určitého množství tepla a vznikají produkty spalování – spaliny. Získané teplo se vyjadřuje jako spalné teplo anebo výhřevnost paliva. Množství tepla uvolněného při dokonalém spálení měrné jednotky tohoto paliva se nazývá spalným teplem za předpokladu, že se spaliny ochladí na původní teplotu a vzniklá pára při spalování zkondenzuje. Ovšem v praxi obvykle odpařená voda odchází o teplotě vyšší rosného bodu vodní páry se spalinami do komína a odnáší s sebou

část výparného tepla vody. Proto ve výpočtech je lepší pracovat s výhřevností paliva. Výhřevnost se liší od spalného tepla tím, že se do ní nezapočítává skupenské kondenzační teplo vodní páry. Z tohoto důvodu hodnota výhřevnosti bude vždy nižší.

2.1. Druhy paliva

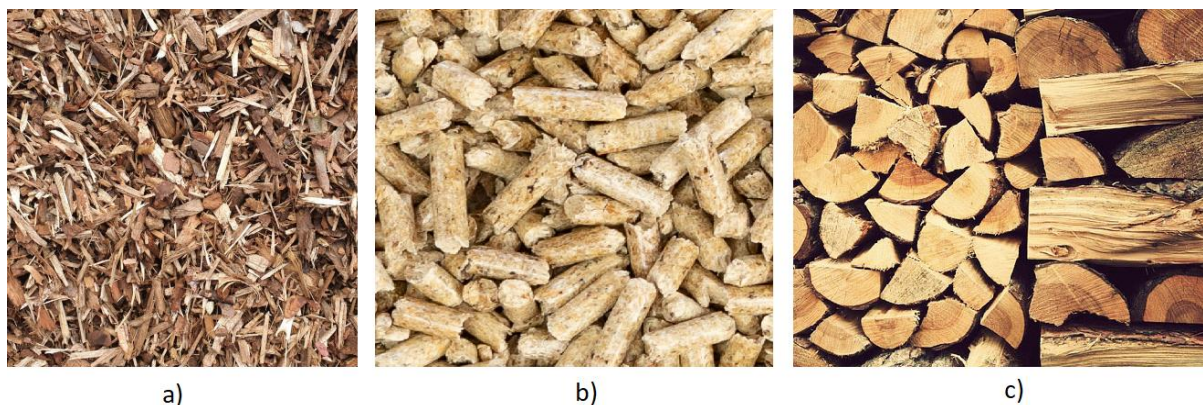
Topná paliva je možné rozdělit na:

- fosilní paliva, vznikající přeměnou biomasy na nerostné suroviny bez přístupu vzduchu, tento proces může trvat miliony let. Těžba probíhá z ložisek ropy, plynu, uhlí a podobných.
- obnovitelná paliva jsou ta, která jsou schopna se obnovit během lidského života. Jedná se především o biomasu.
- odpadovým palivem se nazývá domovní, živnostenský nebo průmyslový odpad, který se spaluje samostatně ve spalovnách anebo spolu se základním palivem v kotli.

2.1.1. Pelety

Pelety jsou ekologické palivo vyráběné převážně z dřevní biomasy (piliny, hobliny a podobné). Mají tvar granulí kruhového průřezu, výroba probíhá lisováním biomasy o určité vlhkosti a za vysokých teplot.

Hlavními výhodami jsou šetrnost k životnímu prostředí, nízké požadavky na obsluhu a snadná automatizace procesů příkladání paliva do kotle, nízká popelnatost, malé množství kouře, čistota při manipulaci. [5], [7]



Obrázek č. 3 Biomasa: a) dřevní štěpka, b) pelety, c) kusové dřevo

2.1.2. Brikety

Brikety se liší od pelet především rozměrem a tvarem. Většinou to jsou buď plné, anebo s otvorem válce (kvádry), vyrobené z odpadu v dřezpracujícím průmyslu. Výhodami jsou vysoká výhřevnost, popel použitelný jako přírodní hnojivo.

Je možné také pro spalování používat kusové dřevo. V porovnání s briketami a peletami je dřevo levnější, při správném hospodaření je to téměř nevyčerpatelný ekologický zdroj energie. Vzhledem k tomu, že nemá přesné požadavky nízké vlhkosti v místě skladování, dá se

uskladňovat venku do dřevníku. Dřevo ale má vyšší vlhkost, i když bylo ponecháno vysychat přirozeným způsobem několik let, výhřevnost bude nižší než u briket. [6] [7]



Obrázek č. 4 Biomasa: brikety [6]

2.1.3. Dřevní štěrka

Dřevní štěrka jsou drcené dřevní zbytky a odpad, které se třídí podle jakosti. Hlavními parametry jsou původ suroviny, velikost částic a společná pro biomasu i nejdůležitější vlhkost. Je levnější než dřevo, ale má větší měrný objem, což znamená, že i vyšší náklady na dopravu. [8]

2.1.4. Topný olej

Extra lehký topný olej (TOEL) je směs ropných destilátů se sníženým obsahem síry, považuje se za nejkvalitnější z topných olejů a používá se k vytápění ve výtopnách malé a střední velikosti. Pro TOEL je charakteristická vysoká výhřevnost, má nižší emisní faktor než hnědé uhlí, ale na druhou stranu je jeho cena vyšší a ztrácí se možnost spalovat více druhů paliva v jednom kotli. [10]

2.1.5. Plyny

Pro energetiku hrají nejvýznamnější roli zemní plyn, plyny na bázi propanu a butanu a plyny vyrobené zplyněním nebo odplyněním uhlí. Zemní plyn je hořlavý plyn, hlavní složkou je metan, ale vyskytují se také vyšší uhlovodíky a inertní plyny.

Plyny na bázi metanu s vyšším obsahem vyšších uhlovodíků mohou mít výhřevnost větší než 35 MJ/m^3 , záleží na původu. Množství emisí CO_2 je dvakrát menší, než má hnědé nebo černé uhlí, avšak největší výhodou zemního plynu je snadná dodávka pomocí plynovodů, není třeba se starat o skladování paliva jako například u biomasy, další kladnou stránkou je obrovské množství druhů hořáků a způsobů spalování, což poskytuje variabilitu při navrhování koteleny.

Plyny pro vytápění na bázi propanu a butanu se dodávají v kapalném stavu a využívají se buď samostatně, anebo ve směsi propan-butan. Mají vysokou výhřevnost, ale z důvodu ceny nejsou pro vytápění relevantní.

Koksárenské plyny nebo svítiplyny – plyny vznikající při koksování černého uhlí, po vyčištění mohou sloužit jako topné plyny, které se skládají z metanu, vodíku, dusíku, oxidu uhličitého. Mají vysoký obsah oxidu uhelnatého a relativně nízkou výhřevnost. [9]

2.1.6. Uhlí

Uhlí je jeden z nejlevnějších a dobře známých druhů paliv pro vytápění, jelikož se technologie těžby a použití uhlí aktivně vyvíjí od 18. století. Zásadním problémem je uvolnění velkého množství oxidu uhličitého do atmosféry a v dnešní době je trendem tyto emise omezovat. Evropský systém pro obchodování s emisemi kontroluje množství uvolněného CO₂ při spalování prostřednictvím emisních povolenek, které se platí za každou tunu vypouštěného CO₂. Pro teplárnu nebo výtopnu to bude znamenat výrazné zvýšení ceny na provoz. Další nevýhodou je vyčerpatelnost zásob a zdražování uhlí při jeho úbytku na trhu.

2.2. Určení roční spotřeby paliva

K odhadu přibližné hodnoty množství spotřebovaného paliva za celý rok je třeba znát celkovou spotřebu energie, kterou lze určit z ročního diagramu trvání potřeb tepla, a to dle vztahu:

$$Q_c = \frac{1}{\eta_k} \cdot \left(\sum (24 \cdot P_{top_i}) + P_{TUV}^W \cdot 8784 \right) \quad (6)$$

kde Q_c [Wh] – množství energie spotřebované za rok k výrobě potřebného tepla,

P_{top_i} [W] – hodnota středního topného výkonu potřebného v i-tem dne,

P_{TUV}^W [W] – výkon k výrobě TUV, má konstantní hodnotu během celého roku,

η_k [-] – účinnost soustavy kotlů.

Tato hodnota se vydělí výhřevnostmi jednotlivých druhů paliv a výsledné hodnoty budou mít jednotky, na které byly vztaženy výhřevnosti. V uvedené tabulce ceny na pelety, brikety a olej zahrnují i dopravu.

Tabulka 1 Porovnání vybraných druhů paliv [11], [12], [13], [14], [15], [16], [17], [18], [20]

	Jednotka	Výhřevnost [MJ/jednotka]	Účinnost η_k [-]	Cena [Kč/jednotka]	Emise CO ₂ [g CO ₂ /MJ]
Pelety	kg	16,8	0,9	9,85	0
Brikety	kg	17	0,88	9,5	0
Kusové dřevo	prmr**	6228	0,88	2060	0
Štěpka	prms*	2500	0,8	460	0
TOEL	l	42,7	0,9	26,5	74,1
Zemní plyn	m ³	37,98	0,9	18,7	55,45
Uhlí	q***	2921	0,88	620	99,35

* prostorový metr sypaný

** prostorový metr rovaný

*** metrický cent (*quintal*) je roven 100 kg

U biomasy emisní faktor je nulový, protože se uvažuje, že množství oxidu uhličitého zreprodukovaného při jejím spalování je rovno množství CO₂ pohlcenému během růstu rostliny. Ovšem u fosilních paliv to tak není a je snahou mít co nejnižší emise CO₂.

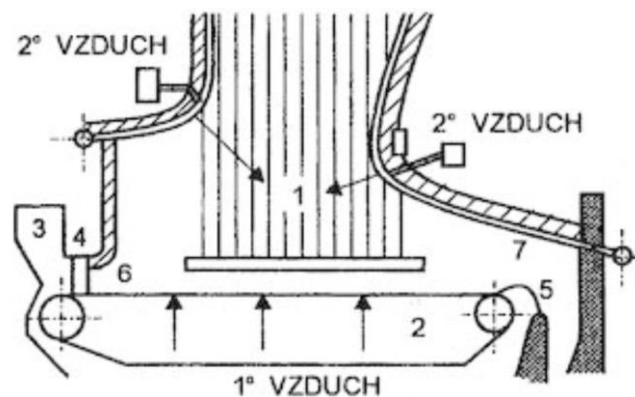
2.3. Typy kotlů

Zabezpečením objektu potřebným množstvím tepla se zabývá výtopna. Jedná-li se o menší výkony, potom jde o kotelnu. Na rozdíl od tepláren nebo elektráren neposkytuje možnosti kombinované výroby tepla a elektrické energie. Výtopny se umísťují blízko objektů, aby nedocházelo ke zbytečným ztrátám prostupem tepla z potrubí do okolí při jeho rozvodu.

K porovnání investičních nákladů na realizaci výtopny je potřeba vybrat zařízení, které by splňovalo požadavky na výkon a bezpečnost. Kotel musí mít hodnotu pracovního výkonu co nejbližší k hodnotě optimálního výkonu. Existuje celá řada různých hledisek, podle kterých se kotle dělí. Základní dělení je dle druhu spalovaného paliva a pracovního média. Rozlišujeme paliva tuhá, kapalná a plynná, vybrané druhy kterých byly popsány výše. Pracovním médiem může být přehřátá pára nebo ohřátá voda, potom se kotle dělí na parní a teplovodní nebo horkovodní, když voda na výstupu z kotle je ohřátá na teplotu vyšší než 110 °C.

2.3.1. Spalování na roštu

Tuhá paliva se spalují v roštových, práškových a fluidních kotlích. Roštové kotle se používají ke spalování kusového paliva jako uhlí a dřevo.

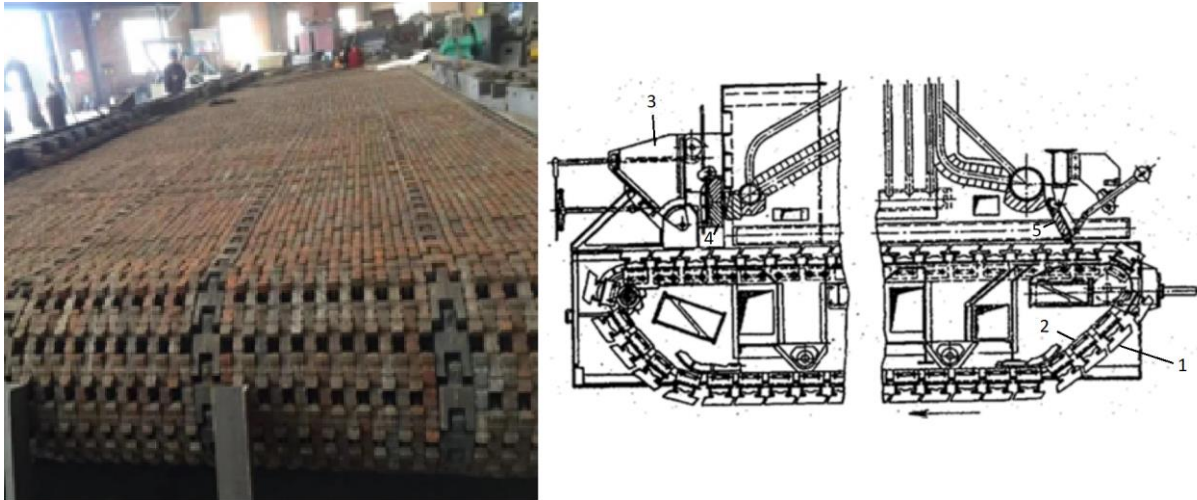


Obrázek č. 5 Schéma ohniště s pásovým roštem. Základními částmi jsou 1 – ohniště; 2 – rošt; 3 – zásobník paliva; 4 – hradítko výšky paliva; 5 – škvarky jízek; 6, 7 – přední a zadní klenby [21]

Fázemi spalovacího procesu jsou:

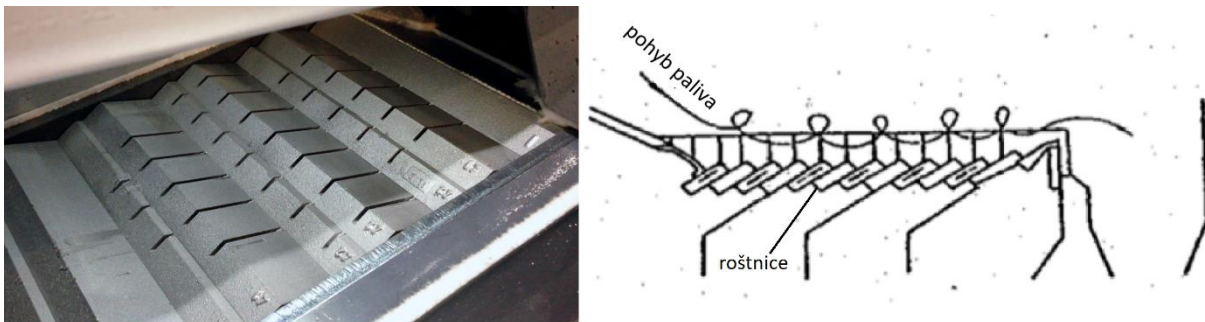
- I. sušení paliva, po kterém zůstane větší podíl hořlavin,
- II. odplyňování, kdy se z paliva uvolní prchavé hořlaviny,
- III. hoření prchavých hořlavin a vznícení tuhé hořlaviny,
- IV. dohořívání a chladnutí škváry.

Z hlediska uspořádání vzájemného toku paliva a spalin rošty mohou být souproude, protiproude nebo částečně protiproude. Odlišujeme pohyblivé a pevné rošty, má to vliv na pohyblivost i palivové vrstvy, dochází k rozrušování spečené části, posuvu paliva, odvodu popela. V důsledku toho se mění množství ztrát nedopalem paliva ve škváře. K občasnému přemísťování palivové vrstvy se používají různé mechanismy pohybu roštu nebo roštnic.



Obrázek č. 6 Řetězový rošt. Schéma provedení v kotli (vpravo), foto roštu zvlášť (vlevo). 1 – roštnice; 2 – příčný trámec; 3 – násypka paliva; 4 – hradítko; 5 – výkyvný škrabák [40], [23]

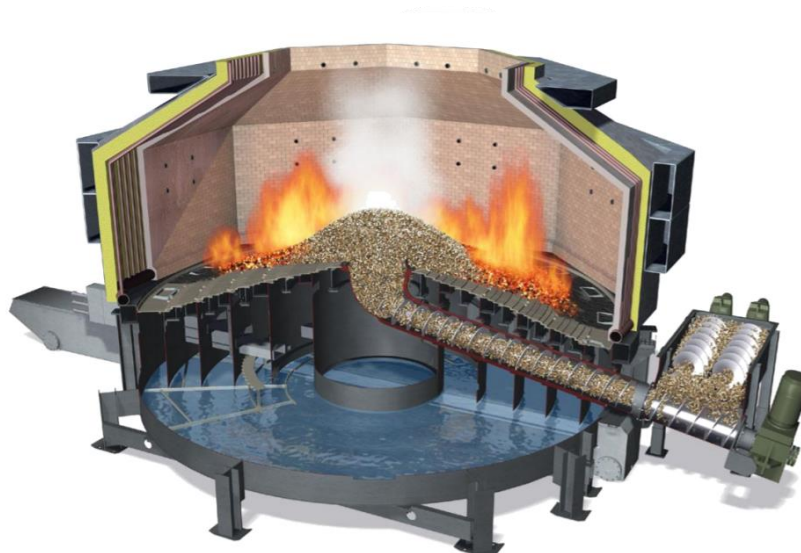
Rošty pásové nebo řetězové používají k přemísťování paliva nekonečný pás nebo řetěz z roštnic, na horní části kterého probíhá efektivnější spalování v čase, když dolní část se ochlazuje, což dovoluje využití paliva s vyšší výhřevností při nižším tepelném namáhání materiálu roštu.



Obrázek č. 7 Kaskádový rošt. Schéma (vpravo), foto roštu v kotli (vlevo). [22], [40]

Přesuvné rošty se skládají z šikmého rámu, na který jsou umístěny vodorovné řady roštnic, které jsou schopny měnit svůj sklon. Každá sudá řada se posouvá vůči vedlejším pevným lichým řadám, tímto pohybem se spečená vrstva prolamuje a dochází k posuvu paliv. Hlavní výhodou je univerzální použití. Na obdobném principu fungují vrativné rošty, kde se roštnice posouvají proti pohybu paliva, nebo kaskádové rošty, jež mají vodorovný povrch. Regulace spalovacího procesu se provádí změnou rychlostí pohybu roštnic a jejich sklonu. [21]

Zvláštními případy pohyblivých roštů na biomasu jsou retortové rošty s přívodem paliva spodem soustavou šnekových dopravníků.



Obrázek č. 8 Příklad kotle s retortovým roštem [25]

Spalování probíhá v krajních oblastech palivové vrstvy, uprostřed dochází k sušení paliva a následnému uvolnění prchavé hořlaviny. Popel a zbytky po spálení se sesouvají do stran a tam se mohou odvádět. [24]

Dalšími možnými provedeními jsou vibrační rošty, kde se využívá technologie přerušovaného protřepávání roštu k posuvu paliva a vysypání popela na popelový dopravník. Jsou vhodné pro spalování paliv s nízkým podílem popela.

2.3.2. Spalování kapalných paliv

Spalování kapalných paliv je podobné práškovému. Hořák zajišťuje proces atomizace, během kterého se z kapaliny a vzduchu za působení tlaku stane aerosol. Kapalně částice mají mnohokrát větší měrný povrch, a proto hoří velmi intenzivně. Rozměr kapiček paliva je obvykle kolem 30–50 μm a dosahuje se přetlakem 2–7 MPa.

2.3.3. Spalování plynu

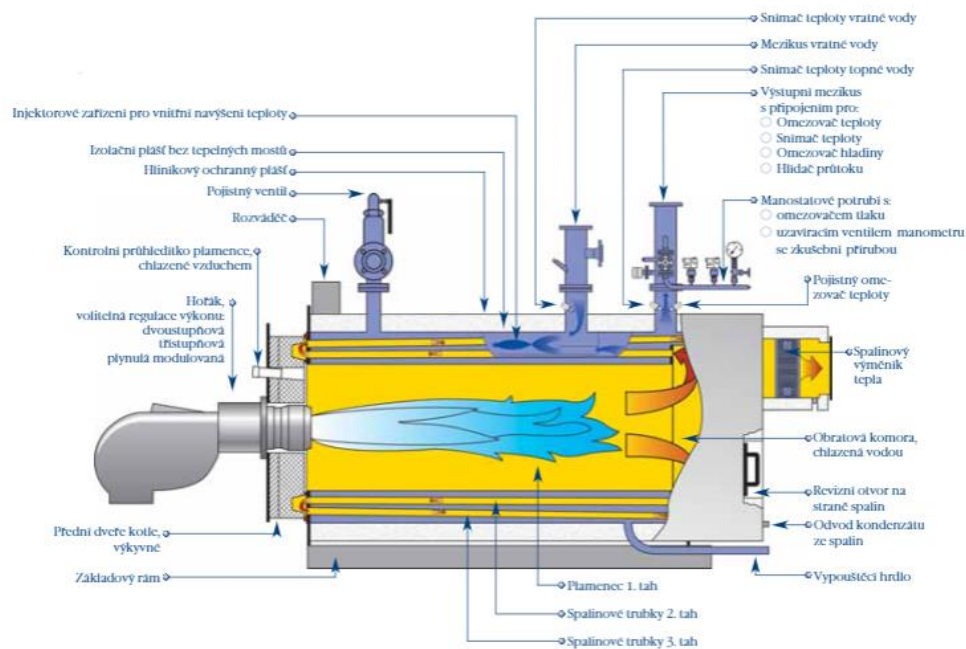
Hlavním odlišujícím kritériem kotlů na plyn je ohniště, které musí být vybaveno hořáky ke spalování plynných paliv. Obecně kotel představuje nádobu, která obsahuje výměník a ohniště. Existují teplovodní, horkovodní a parní plynové kotle. Liší se hlavně výstupním médiem:

- teplovodní – voda, která má teplotu $<110\text{ }^{\circ}\text{C}$ a přetlak obecně do 0,6 MPa,
- horkovodní – voda o teplotě $>110\text{ }^{\circ}\text{C}$ a přetlaku 0,9–7 MPa,
- parní – pára o teplotě od $210\text{ }^{\circ}\text{C}$ a přetlaku od 0,9 MPa.

Hořáky mohou být proudové, u kterých smísení plynu a vzduchu probíhá až v ohništi, a směšovací, jež smíchají plyn se vzduchem před vypouštěním do ohniště. Vzduch přiváděný do procesu se rozdělí na primární, který se smíchá s plynem před ohništěm, a sekundární – vstupuje přímo do ohniště.

Výměníky bývají litinové anebo ocelové. V porovnání s ocelovými mají litinové delší životnost díky větší korozivzdornosti, ale také vyšší hmotnost a cenu, jsou méně odolné tepelným šokům. Hmotnost a teplotní limity omezují maximální výkon těchto kotlů.

Dle druhu přívodu spalovacího vzduchu plynové kotle lze rozdělit na kotle s nuceným přívodem a s nenuceným. Nenucený přívod vzduchu se typicky používá u tzv. atmosférických plynových hořáků, kde se primární vzduch přísává z okolí pod tlakem na přechod plynu z trysky do injektoru a sekundární vzduch se dobře z okolí v místě spalování. Výhodou je jednoduchost, ale kvůli nemožnosti regulace přebytku vzduchu budou komínové ztráty vyšší. Nucený přívod vzduchu je možné regulovat, protože se uskutečňuje pomocí ventilátoru. Ovšem vyžaduje vnější zdroj energie. Takové hořáky se nazývají přetlakové a jsou určeny pro vyšší výkony. [41]

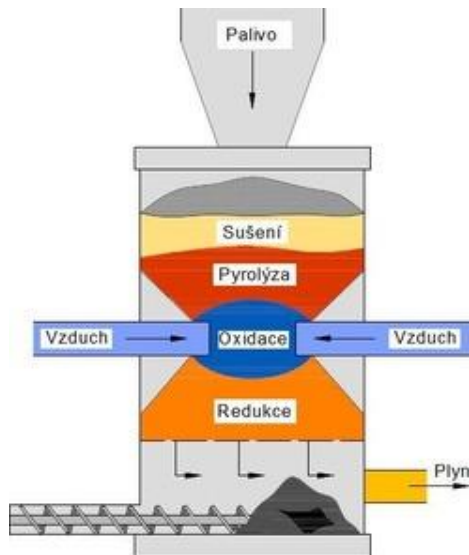


Obrázek č. 9 Schéma plamencového žárotrubného teplovodního kotle UNIMAT UT-L [26]

Efektivní je aplikace ekonomizéru. Na výstupu z kotle spaliny stále mají poměrně vysokou teplotu a je možné využití tohoto tepla k ohřátí média vstupujícího do kotle.

2.3.4. Zplyňování biomasy

Využití biomasy k energetickým účelům je možné také prostřednictvím zplyňovacího generátoru. Zplyňování biomasy je proces přeměny tuhých organických částic biomasy na směs hořlavých plynů. Tato chemická reakce je silně endotermická a zdrojem pro její uskutečnění může být buď přímo zplyňovací reaktor, anebo externí zdroj se spalovací zónou oddělenou od zóny zplyňovací výměníkem tepla. Zplyňovacím médiem může být čistý kyslík, vzduch (směs kyslíku), vodní pára nebo oxid uhličitý (vázaný kyslík) či vodík.



Obrázek č. 10 Schéma zplyňovacího generátoru [27]

V případě dodávky tepla pro reakci získanou spalováním části biomasy se dá proces rozdělit na několik základních fází:

- pyrolýza: ohřev biomasy na mez termické stability jejích organických látek a následný rozklad za nepřístupu média obsahujícího kyslík a vzniku stabilních nízkomolekulárních produktů,
- oxidace: reakce uhlíku s kyslíkem, je nutno zajistit přívod zplyňovacího média vzhledem k jeho exotermickým vlastnostem, je hlavním zdrojem tepla pro průběh zplyňování,
- redukce: přeměna oxidu uhličitého na oxid uhelnatý (Boudouardova reakce) a vodní páry na vodík (reakce vodního plynu) bez přítomnosti kyslíku, což snižuje teplotu plynu.

Při použití nejjednoduššího zplyňovacího média – vzduchu – produkovaná směs plynů kvůli velkému obsahu dusíku bude mít menší palivovou hodnotu než při použití čistého kyslíku. V menších zplyňovacích kotlích se plyn spaluje rovnou bez distribuce a zajištění jeho čistoty nemá ekonomický význam. [28], [42], [27]

2.4. Minimalizace emisí

Emise škodlivých látek při spalování jsou velmi závislé na složení paliva, na technickém řešení spalovacího zařízení, druhu a kvalitě spalovacího procesu, na odlučování škodlivin před komínem. Snižit emise je možné úpravou těchto kategorií.

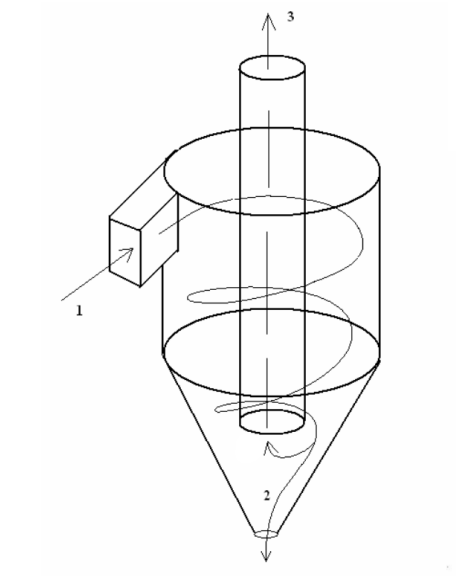
Kvalitnější palivo bude mít celkově menší popelnatost, nižší obsah toxických kovů, Cl, F a dalších látek, které mají nepříznivé dopady na životní prostředí. U biomasy to závisí na místě růstu, protože dřevo je schopno pohltit látky obsažené v půdě. Po následující úpravě může mít biomasa ve svém složení různé množství dřevěné kůry, která zpravidla obsahuje více chemických látek. Při nevhodném spalovacím procesu může docházet ke vzniku nedopalu a také většího množství CO. V konečném důsledku bude palivo využito neefektivně. Poměr CO₂ ve spalinách je dán obsahem uhlíku v palivu a to těsně souvisí s jeho výhřevností.

Imisní limity jsou stanoveny zákonem č. 201/2012 Sb., o ochraně ovzduší, dle kterého spalování paliv v kotlích o celkovém jmenovitém tepelném příkonu od více než 0,3 MW do 5 MW včetně vyžaduje rozptylovou studii pro znečišťující látky a kompenzační opatření v případě, že se nejedná o spalování zemního plynu. [19]

Množství a vlastnosti tuhých částic ve spalinách jsou závislé na zrnitosti a druhu paliva, na spalovacím zařízení a procesu. K odstranění exhalátů se používají mechanické filtry, mokré filtry, tkaninové a elektrostatické filtry.

2.4.1. Cyklonové odlučovače

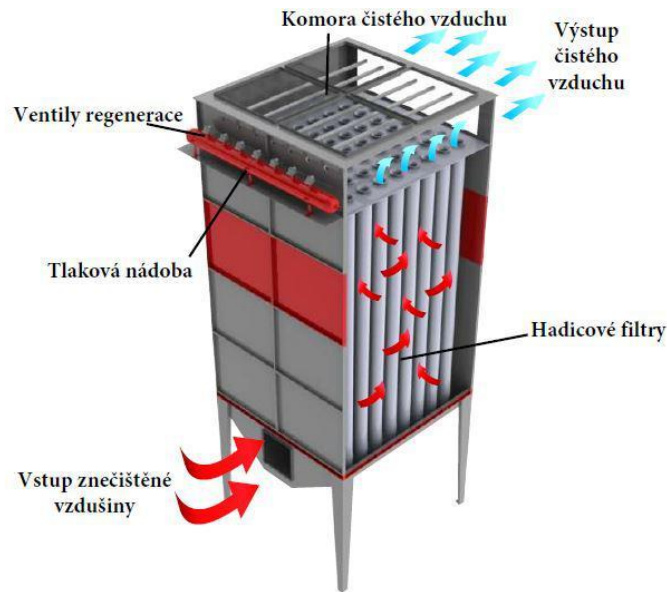
Cyklonové neboli vírové odlučovače patří mezi mechanické odlučovače tuhých látek z tekutin. Uvnitř cyklonu spaliny proudí po trajektorii spirály a působením odstředivé síly se částice dostávají ke stěně odlučovače, na které se odloučí z proudu plynu. Ze stěny částice padají do výsypky a mohou být za nějakou dobu odváděny.



Obrázek č. 11 Cyklonový odlučovač. 1 – vstup proudu; 2 – odvod tuhých částic; 3 – výstup proudu spalin [29]

2.4.2. Látkové filtry

Pro menší výkony se používají látkové filtry, které jsou tvořeny větším počtem filtračních hadic. Jedna taková hadice představuje tkaninový rukáv navlečený na koš z ocelových drátů. Spaliny procházejí ze všech stran dovnitř, aby nežádoucí částice zůstaly z vnější strany. Látkové filtry mají vysokou účinnost, avšak omezenou životnost používané tkaniny.



Obrázek č. 12 Schéma látkového filtru [30]

2.5. Palivové hospodaření

2.5.1. Zásobování paliva

Z hlediska hospodaření u kotlů na tuhá paliva je nutno zajistit zásobník paliva a systém odvodu tuhých zbytků po spalování. Vzhledem k závislosti výhřevnosti paliva na jeho vlhkosti musí ideálně zásobník zajistit suchost uschovávaného paliva a být dostatečně velký, aby bylo možné odebrat potřebné množství paliva po dobu jeho dalšího doplnění. Větší zásoby se mohou nacházet i venku pod krytem. Přemístění ze zásobníku do kotle může zabezpečit šnekový dopravník. Je důležitá roční spotřeba v prostorových metrech a perioda dovážení, resp. doplnění ze zásob.

Tabulka 2 Hustoty pro vybraná tuhá paliva [31], [32]

	Hustota
Kusové dřevo	1 [-]
Štěpka	1 [-]
Pelety/brikety	550 [kg/m ³]
Uhlí	14 [q/m ³]

V případě kapalného paliva zásobník může být tvořen ocelovou nádobou nebo několika sudy. U kotlů na zemní plyn, který se přivádí potrubím ze sítě, je výhodou, že není potřeba řešit zásobník a dopravník paliva. Tuhé zbytky u plynu a oleje také neexistují. Snižuje to jednak investiční náklady, jelikož se neplatí pronájem místnosti zásobníku a obsluha je minimalizována, provozní náklady budou také nižší.



Obrázek č. 13 Venkovní zásobník dřevní štěpky pod krytem (vlevo) a model denního zásobníku se šnekovým dopravníkem (vpravo) [14], [8]

2.5.2. Manipulace s tuhými zbytky po spálení

Co se týče odvodu popela, dřevo má nízkou popelnatost od 0,5 % (pelety) do 8 % (lesní štěpka). Je to nepříznivé množství, které se může odstraňovat obsluhou nebo automaticky a může být použito například v zemědělství. Horší je situace při spalování uhlí, popelnatost kterého se pohybuje kolem 30 %. Odpad po spálení bude pravidelně odvážen ze zásobníku na popel a tento odvoz bude jednou z položek variabilních nákladů.

3. Porovnání a volba zdroje pro CZT

Při volbě konkrétního řešení jsou rozhodujícími faktory pořizovací náročnost jednotky CZT a její údržba z ekonomického hlediska. Dle druhu spalovaného paliva bude perspektivním použitím biomasy, jelikož ta je ekologická. Lze s výhodou využívat dotace ve smyslu státní podpory na pořízení kotlů na biomasu, ovšem schválení žádostí bude závislé na výši částky, o kterou zákazník může požádat. Kromě jiného spalování biomasy v roštových kotlích za účelem pouze topení a ohřátí TUV má relativně nízkou účinnost, nevyužije se její veškerý potenciál. Pořízení kotle se stacionární fluidní vrstvou a výroba tepla ze spalování biomasy v menším měřítku je mnohem dražší než alternativní způsoby. Efektivnějším je použití kogeneračních jednotek, které jsou schopny zároveň vyrábět potřebné teplo a elektřinu. Cena kvalitní biomasy, jako jsou pelety nebo brikety, je vysoká. Méně kvalitní biopalivo jako štěpka nebo kusové dřevo nemá zaručené vlastnosti a jeho množství na území ČR je omezené, což s časem může zvýšit provozní náklady. Proto bych preferoval využití biomasy pro KVET, kde výroba energie je účinnější, ale i technologie monovýroby tepla spalováním biomasy se stále vyvíjí a jsou atraktivní díky možnému použití ekologičtějších a levnějších druhů paliv.

Uhelné teplárny a elektrárny se v současné době uzavírají kvůli nárůstu ceny emisních povolenek a zpřísnění ekologických norem v EU. Tyhle důvody ovlivní nejenom těžbu tuhých fosilních paliv a finanční stránku provozu větších zdrojů, ale i menších, jako jsou kotelny a výtopy, které fungují na obdobném principu a používají uhlí, topný olej nebo mazut.

Zemní plyn je šetrnější k životnímu prostředí než uhlí a LTO, má nižší emisní faktor určující, kolik se uvolní oxidu uhličitého spálením jednotkového množství paliva. Způsoby jeho

efektivního využití v teplárenství jsou dobře známé na rozdíl od např. metod zplyňování biomasy, které se aktuálně vyvíjí a zdokonalují. Plynové zdroje tepla mají širokou výkonovou sadu teplovodních a horkovodních plynových kotlů fungujících na stejném principu, což usnadňuje jejich navrhování a exploataci. Ale hlavní a rozhodující příležitostí plynových kotlů je jejich snadná obsluha v porovnání s ostatními zdroji:

- plná automatizace bez manipulace se zásobníkem paliva,
- není nutnost dovozu paliva,
- nulové odpadové zbytky po spálení,
- nulový úlet tuhých částic komínem.

Na základě výše uvedených důvodů optimálním zdrojem tepla do vytápění uvažuji soustavu teplovodních plynových kotlů anebo kotlů na biomasu. K porovnání těchto variant bude zapotřebí rozebrat konkrétní řešení z technického a provozního hlediska.

4. Specifikace objektu a postupu řešení

Zdroj zásobování teplem bude navržen pro vytápění a výrobu teplé užitkové vody obytného objektu. Za lokalitu byla zvolena Praha. Špičkový výkon dodávaný soustavou kotlů je určen zadáním 750 kW, garantovat je třeba dodávku alespoň 60 % výkonu. Střední výkon odebíraný k ohřátí TUV činí 12 % špičkového výkonu a je konstantní v celém roce. Použitým palivem bude plyn a dřevní pelety.

Prvním krokem je sestavení ročního diagramu trvání potřeb tepla, k tomu musím znát měrnou tepelnou ztrátu daného objektu a průběh středních venkovních teplot v dané lokalitě. Měrnou tepelnou ztrátu určím ze zadaného špičkového výkonu a minimální venkovní teploty. Z diagramu potom je možné zjistit množství tepla dodaného za celý rok.

Následuje návrh různých konfigurací kotlů, které následně porovnam. Budu se snažit sestavit kaskády o stejném jmenovitém výkonu, který je zadán 750 kW. Varianty se budou lišit typem kotlů, jejich množstvím a jmenovitým výkonem jednotlivých kotlů.

Udělám energetickou bilanci, která spočívá v tom, že k dodání potřebného tepla se musí spálit určité množství paliva. Rozhodujícím kritériem je účinnost kotle, jež závisí na typu kotle a na jeho zatížení. Porovnam dva způsoby provozu, a to tak, že budu zkoumat časový úsek 48 hodin z každého období (přechodného, zimního a letního). V těchto dvou typických dnech příslušného období zjistím hodinový odběr tepla, které bude určeno buď k vytápění a ohřevu užitkové vody v zimním a přechodném období, nebo jen pro výrobu TUV mimo topnou sezónu.

Výkon potřebný k vytápění v konkrétní hodině se určí z průběhu středních denních venkovních teplot a již známé měrné ztráty tepla. Výkon pro výrobu TUV bude záviset na hodinovém odběru. Ze středního výkonu během dne, za který je uvažováno 12 % špičkového výkonu, je možné určit denní spotřebu vody. Zná-li střední denní spotřebu vody jedním obyvatelem, mohu spočítat množství obyvatel objektu. Dle hodinového odběru vody jedním obyvatelem a jejich počtu určím hodinovou potřebu tepla k výrobě TUV.

V závislosti na zatížení kotle v kaskádě bude zjištěna jeho střední účinnost a následně i účinnost soustavy. Pokud dojde k přerušení provozu kotle, spočítají se tepelné ztráty během odstávky, jež také budou mít vliv na výslednou účinnost, kterou aplikuji na celé období, k němuž patří. Protože znám denní potřebu tepla, můžu spočítat roční spotřebu paliva a vyhodnotit finanční náročnost provozu variant, do které zahrnu také roční odpis z ceny soustavy.

Pro kotle na tuhá paliva navrhnu týdenní a denní zásobník paliva, u všech variant bude také potřeba mít zásobník TUV. Nutnost jeho zapojení plyne z minimálních výkonových možností kotlů a bude názorná v letním období.

4.1. Určení tepelných ztrát

Roční diagram potřeby tepla je společný pro oba druhy paliva. Je závislý na teplotách udržovaných uvnitř budov, venkovních teplotách po dobu topné sezóny a na lokalitě.

$$P_{top} = H \cdot (t_2 - t_e) \cdot 10^{-3} \quad (7)$$

kde P_{top} [kW] – topný výkon,

H [$W \cdot K^{-1}$] – měrná tepelná ztráta objektu,

t_2 [°C] – průměrná vnitřní teplota,

t_e [°C] – výpočtová venkovní teplota dle normy ČSN 38 3350.

Hodnoty středních denních teplot je možné zjistit u Českého hydrometeorologického ústavu. Průměrné vnitřní teploty jsou odlišné. V denních hodinách provozu (6–22 h) $t_{2d} = 20$ °C, v nočních (22–6 h) – $t_{2n} = 18$ °C. Výpočtová venkovní teplota pro Prahu (Karlovy) je -12 °C a považuje se za minimální, na niž je vztážen maximální topný výkon. Následující vzorec popisuje tuto závislost, přičemž maximální topný výkon je špičkový výkon ze zadání snížený o hodnotu výkonu pro výrobu TUV.

$$P_{tmax} = P_{max} - P_{TUV}^W = P_{max} \cdot (1 - 0,12) \quad (8)$$

kde P_{tmax} [W] – maximální topný výkon,

P_{max} [W] – zadaný maximální výkon,

P_{TUV}^W [W] – výkon pro výrobu TUV, je roven 12 % z P_{max} .

Z již známých a zadaných hodnot se dá určit měrná tepelná ztráta objektu a lze ji použít ke zjištění potřebného výkonu v každém dni.

$$H = \frac{P_{tmax}}{\frac{2}{3} \cdot (t_{2d} - t_e) + \frac{1}{3} \cdot (t_{2n} - t_e)} \quad (9)$$

4.2. Určení ročního diagramu dodávky tepla

$$P_{sd} = \frac{2}{3}H \cdot (t_{2d} - t_1) + \frac{1}{3}H \cdot (t_{2n} - t_1) + P_{TUV}^W \quad (10)$$

kde $H [W \cdot K^{-1}]$ – měrná tepelná ztráta objektu,

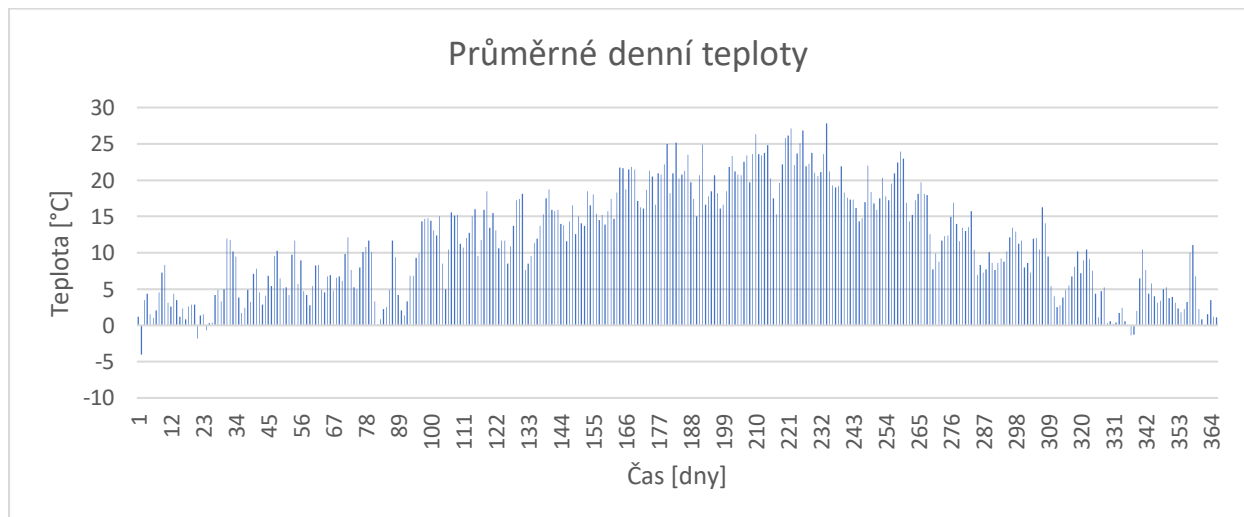
$P_{sd} [W]$ – střední denní potřebný výkon,

$t_{2d} [^{\circ}C]$ – průměrná teplota uvnitř budovy v denních hodinách,

$t_{2n} [^{\circ}C]$ – průměrná teplota uvnitř budovy v nočních hodinách,

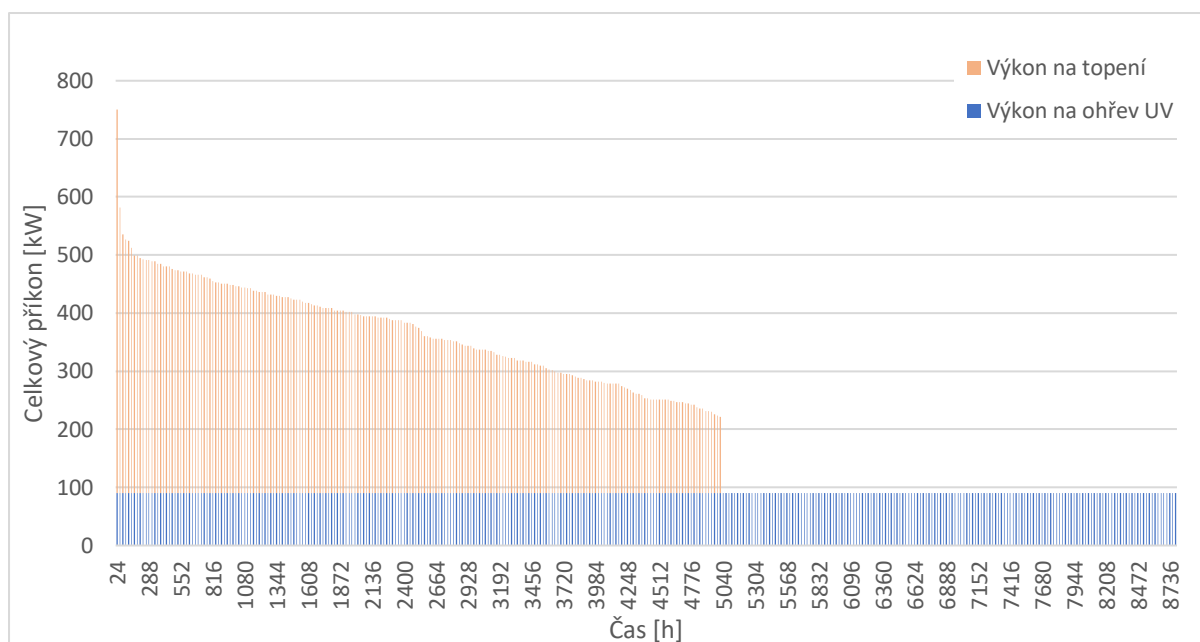
$t_1 [^{\circ}C]$ – střední venkovní teplota během topného období.

Průměrné denní teploty vzduchu v roce 2020 byly změřeny na hydrometeorologické stanici Praha, Karlov. Pro názornost jsou uvedeny v následujícím grafu.



Graf 7 Průběh středních denních teplot z roku 2020 [33]

Na základě těchto dat byl sestaven roční diagram trvání potřebných výkonů. Hodnoty byly seřazeny dle velikostí ke snadnějšímu odečtení dob provozu.



Graf 8 Diagram trvání potřeb tepla

Střední venkovní teploty v Praze během roku jsou vyšší než teplota, na kterou je systém připraven. Tedy výkon vyšší než 500 kW je potřeba dodávat jen 144 hodin v roce. Celkové množství dodaného tepla v roce 2020 činí 2 084 553 kWh.

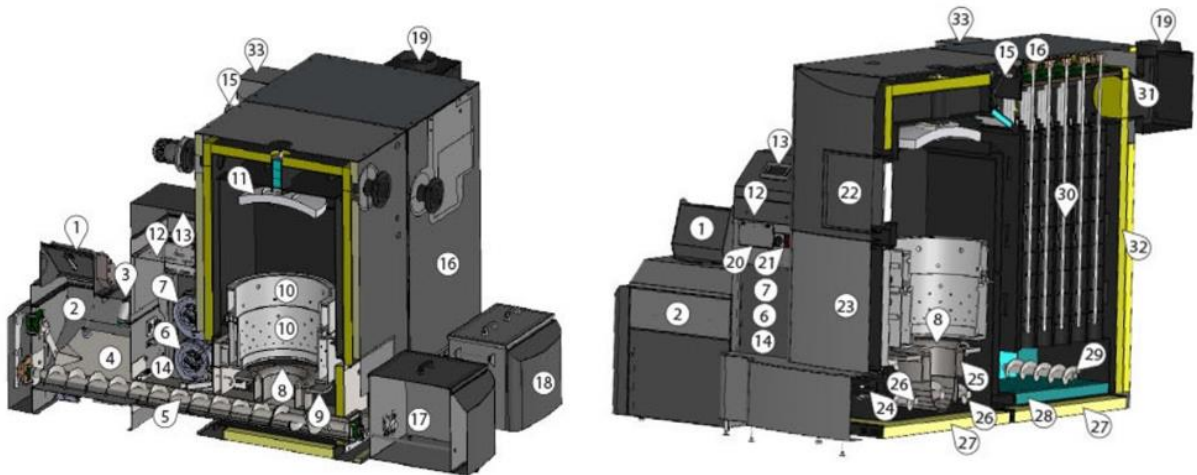
5. Návrh zdrojů tepla

Zdrojem tepla bude kaskáda kotlů. Velkou roli při rozhodování hrají investiční a provozní náklady. Hlavní otázkou je potom jejich nejvhodnější množství, aby byl splněn požadavek na výkon a zároveň aby byla zaručena spolehlivá dodávka minimálně 60 % špičkového výkonu. Je třeba zpravidla dávat přednost jednomu většímu zdroji před dvěma nebo více zdroji menšími. Jeden nebo dva kotle ale nesplní garantovanou dodávku 60 %, v případě poruchy jednoho z nich nebude dodáván buď žádný výkon, anebo pouze 50 % špičkového za předpokladu, že druhý kotel bude pracovat na plný výkon. Ovšem u kotlů na tuhá paliva bez automatického přikládání paliva s klesající využitelností instalovaného výkonu klesá i účinnost. V měřítku roku se očekává, že varianta s více kotly bude úspornější vzhledem k palivu, protože umožní optimálně regulovat pracovní výkon jednotlivých kotlů. K porovnání budou zvoleny kaskády minimálně 3 kotlů.

5.1. První varianta

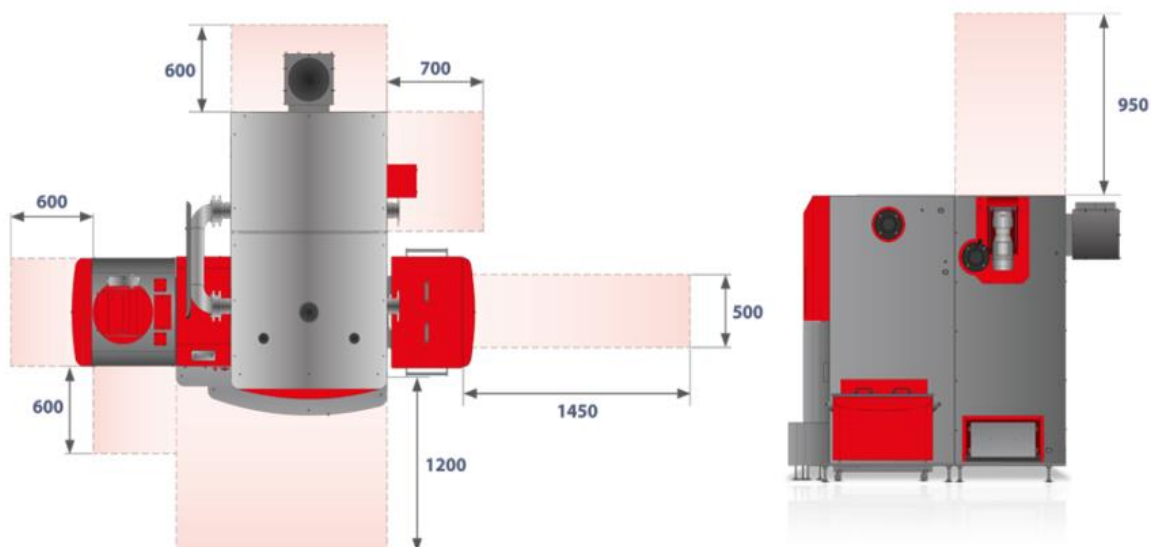
První varianta obsahuje 5 automatických kotlů na biomasu SMART 150 kW od společnosti Smart Heating Technology. Graf 9 znázorňuje množství pracovních hodin každého kotle při provozu na plný výkon: první kotel – 8 784 h/r, druhý kotel – 4 656 h/r, třetí – 3 624 h/r, čtvrtý – 936 h/r a poslední se využije během 24 h/r. Hodnoty jsou platné, pokud se kotle budou odstavovat se snížením pracovního výkonu.

Kotel SMART má šnekový dopravník zabezpečující spodní přívod paliva do vibračního litinového roštu. Spalování probíhá v keramickém sekvenčním hořáku a zapalování se provádí pomocí horkovzdušné pistole. Šnek vynášející popel ze spalovací komory může být doplněn o šnek odvádějící popel z tepelného výměníku. Řídicí jednotka Siemens zabezpečuje plně automatický provoz zařízení. [34]



Obrázek č. 14 Kotel SMART 150 kW a jeho vybavení. 1 – oddělovací klapka kanálu a mezizásobníku paliva; 2 – mezizásobník paliva; 3 – hladinové čidlo paliva; 4 – pohyblivá podlaha v mezizásobníku paliva; 5 – šnekový podavač paliva; 6 – primární ventilátor spalování; 7 – sekundární ventilátory spalování; 8 – prstenec primárního hořáku; 9 – vibrační litinový rošt; 10 – spodní a horní prstenec hořáku; 11 – žáruvzdorný nízkoemisní deflektor; 12 – řídicí jednotka Siemens; 13 – kryt řídicí jednotky s displejem; 14 – příslušenství (horkovzdušná zapalovací pistole, nouzové zhášecí zařízení, bezpečnostní teplotní čidla); 15 – oddělovací klapka výměníku pro řízení toku spalin; 16 – tepelný výměník s turbulátory; 17 – popelník spalovací komory; 18 – popelník tepelného výměníku; 19 – komínová nadstavba; 20 – pojistky; 21 – hlavní vypínač; 22 – malé servisní dveře spalovací komory; 23 – velké servisní dveře spalovací komory; 24 – vibrační litinový rošt; 25 – slot vzduchu primárního spalování; 26 – šneky vynášení popele ze spalovací komory; 27 – spodní izolace spalovací komory a tepelného výměníku; 28 – spodní žáruvzdorná izolace interiéru tepelného výměníku; 29 – šnek vynášení popele z tepelného výměníku; 30 – turbulátory pro vysokoefektivní přenos tepelné energie a čištění výměníku; 31 – lambda sonda; 32 – dvojitá izolace kotle se speciální textilií; 33 – pohon turbulátorů [34]

Umístění ve výtopně je definováno minimálními vzdálenostmi od pracovních ploch kotle a doprava paliva ze zásobníku se uskuteční pomocí šneku.



Obrázek č. 15 Servisní zóny kotlů SMART 150 kW [34]

Technické parametry jsou uvedeny v následující tabulce. Firma Smart Heating Technology také poskytuje podrobnou analýzu spalin pro jednotlivé výkonové řady.

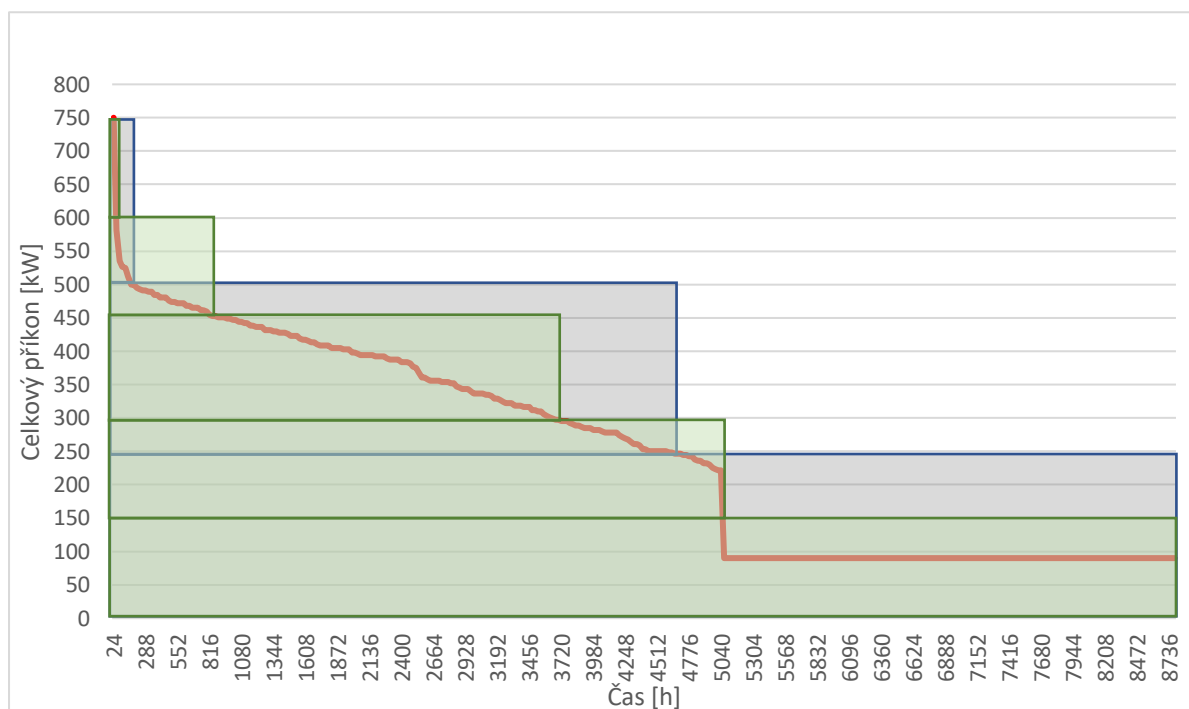
AUTOMATICKÉ KOTLE NA BIOMASU SMART 150		SMART 150			
		Dřevní pelety		Dřevní štěpka	
		Jmenovitá hodnota	Minimální hodnota	Jmenovitá hodnota	Minimální hodnota
Měřené hodnoty					
Jmenovitá tepelná kapacita	kW	150	150	150	150
Teplota spalin	°C	116,1	72,4	96,6	63,1
Spotřeba paliva	kg/hod	36,30	9,78	37,18	9,45
Teplota vstupní vody	°C	60,2	67,1	60,3	62,4
Teplota výstupní vody	°C	80,5	85,2	78,8	79,2
Teplota chladicí vody	°C	9,6	11,1	9,6	11,0
Průtok chladicí vody	m ³ /hod	6,733	2,033	7,080	1,950
Tah za komínem	Pa	125,0	35,0	125,0	35,0
Okolní teplota	°C	24,0	26,3	24,2	22,6
Relativní vlhkost vzduchu	%	45,3	44,7	38,6	37,2
Barometrický tlak	kPa	99,23	99,24	99,10	99,20

PROVOZNÍ DATA KOTLE SMART		
Technická data kotlů SMART		
Označení		150
Dílčí výkon P _n	kW	150
Dílčí zatížení P _p	kW	40
Účinnost kotle při P _n	%	>95
Třída kotle		5
Voda		
Objem vody	l	380
Přípojka vody průměr	"	3
Přípojka vody průměr	DN	80
Hydraulická ztráta kotle při teplotním spádu 20 °C	mbar	65
Teplota kotle	°C	60–90°
Minimální teplota vratné vody	°C	55
Maximální provozní tlak	bar	3,5
Zkušební tlak	bar	6,5
Teplota ohniště	°C	900–1100
Tlak ohniště	mbar	-0,04
Požadovaný tah komína	mbar	0,2
Požadavek umělého tahu		Ano
Teplota spalin při P _n	°C	96,6
Teplota spalin při P _p	°C	63,1
Průměr kouřového potrubí	mm	220
Průměr komína	mm	250

Obrázek č. 16 Technická data kotlů SMART 150 kW [34]

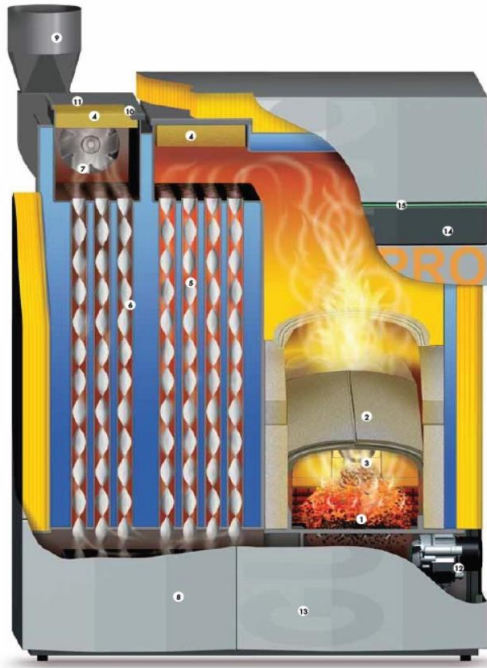
5.2. Druhá varianta

Druhá varianta obsahuje 3 kotle na pelety 250 kW, při odstávce jednoho z nich z důvodu opravy nebo čištění bude k dispozici stále 66,6 % celkového výkonu. Graf 9 znázorňuje počet pracovních hodin každého kotle. Jeden z kotlů bude nutné provozovat po dobu celého roku (8 784 h/r), druhý – 4 584 h/r, třetí – jen 144 h/r.



Graf 9 Diagram trvání potřeb tepla s vynesnými jmenovitými výkony kotlů na biomasu 250 a 150 kW z varianty 1 a varianty 2

Soustava může být zajištěna společností Esel Technologies, nabízející kotle Guntamatic PRO 250 kW. Je potřeba také dbát na minimální výkon.



Obrázek č. 17 Kotel Guntamatic PRO 250 kW a jeho vybavení. 1 – kaskádový rošt; 2 – lomená komora obloukové konstrukce; 3 – sledování stavu naplnění; 4 – čisticí víko; 5 – virbulátory; 6 – výměník tepla; 7 – odtahový ventilátor; 8 – automatické čisticí zařízení; 9 – kouřovod; 10 – sonda lambda; 11 – spalínové čidlo; 12 – pohon roštu; 13 – shromažďování popela; 14 – dotykové ovládání pomocí menu; 15 – LED ukazatele provozního režimu [35]

Mezi hlavní výhody uvedené výrobcem patří vysoká zplyňovací teplota a dlouhá doba zdržení popela, čtyřstupňový koncept ochrany proti zpětnému prohoření, který obsahuje plynotěsnou protipožární klapku mezi kotlem a dopravníkem paliva, automaticky uzavíratelnou při výpadku proudu. Zapalování se uskutečňuje pomocí horkovzdušné pistole. Spalování probíhá na kaskádovém posuvném litinovém roštu se spodním přívodem primárního vzduchu. Rošt je trvale samočisticí a chlazen vzduchem. Spalovací prostor pracuje v podtlakovém režimu. Komora má keramický obklad a klenbu, které dobře akumulují teplo. Vertikální trubkový výměník je trvale mechanickým způsobem čištěný. Pneumatické odpopelnění obsahuje separátor nespalitelných částic. Na kotli je jen a pouze jeden ventilátor. [35]

Každý modul má následující technické charakteristiky:

Typ	PRO 175 PRO 250	Jednotka
Palivo	pelety A1/A2	EN 14961-2
Výkon kotle	188 199,5 * / 250 **	kW
Teplota kotle	60 – 85	°C
Teplota zpětné vody	55	°C
Komínový tah	2 - 10	pascal
Obsah vody	572	litr
Provozní tlak	max. 3	bar
A - kouřovod	250	mm
B - topná voda	2	coul
C - zpětná voda	2	coul
D - bezpečnostní výměník	3/4	coul
E - vypouštění	2	coul
PRO 175		
Hydraulická ztráta teplotní rozdíl 10K	16168 80,3	kg/h mbar
PRO 175		
Hydraulická ztráta teplotní rozdíl 20K	8084 20,7	kg/h mbar

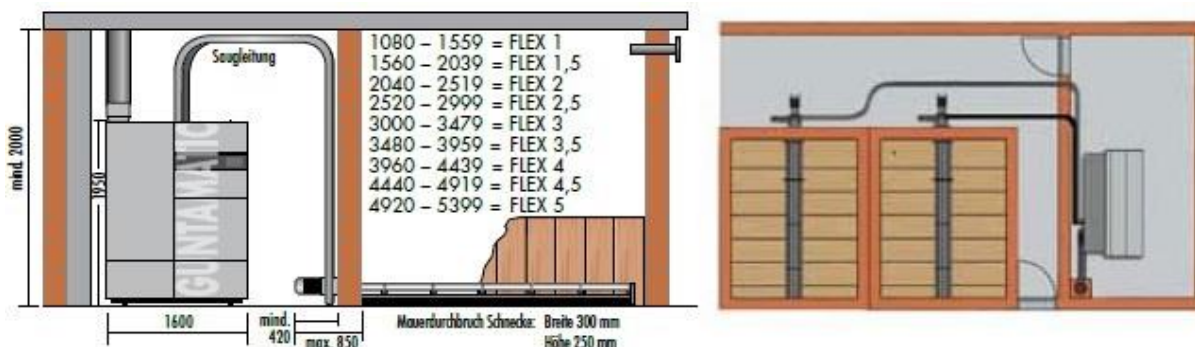
Typ	PRO 175 PRO 250	Jednotka
PRO 175		
Hydraulická ztráta teplotní rozdíl 20K	8084 20,7	kg/h mbar
PRO 250		
Hydraulická ztráta teplotní rozdíl 10K	21500 142,6	kg/h mbar
PRO 250		
Hydraulická ztráta teplotní rozdíl 20K	10750 36,7	kg/h mbar
Obsah popelníku	max. 240	litr
Celková hmotnost kotle	cca 2200	kg
Hmotnost podstavce	cca 600	kg
Hmotnost výměníku tepla	cca 1000	kg
Hmotnost podavače	cca 130	kg
Hmotnost pohonné jednotky	cca 70	kg
Hmotnost / m dopravy paliva	cca 40	kg
El.připojení	400 VAC / 20 A	-

* uvedený jmenovitý výkon pro modulový výkon < 400 kW.

** maximální možný výkon kotle

Obrázek č. 18 Technická data kotlů Guntamatic PRO 250 kW [35]

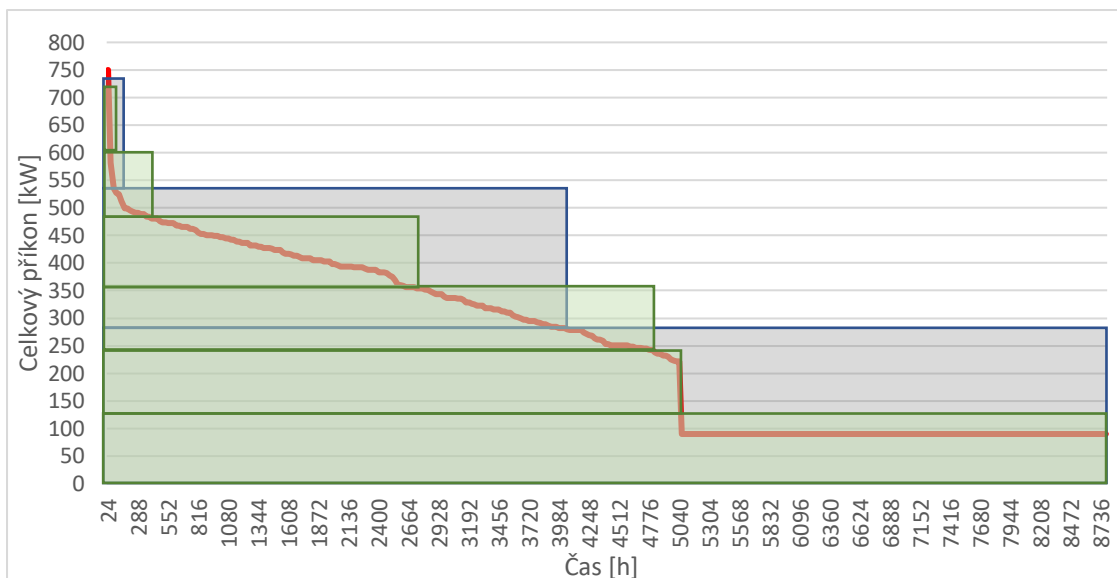
Doprava paliva se z denního zásobníku realizuje pomocí šnekového dopravníku FLEX. V případě topení peletami může být sklad až 20 metrů daleko od kotle, popř. může být instalováno více skladů na více místech. Schéma zobrazuje možné provedení denního zásobníku paliva.



Obrázek č. 19 Schéma umístění zásobníku paliva kotlů Guntamatic PRO FLEX [35]

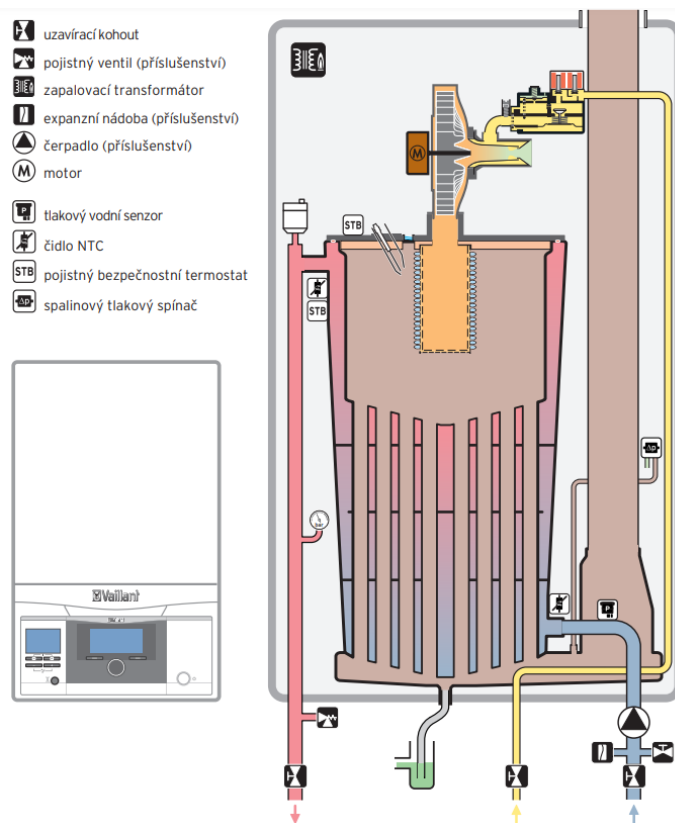
5.3. Třetí varianta

Třetí varianta se bude skládat ze šesti závěsných kondenzačních plynových kotlů VU 1206/5-5 eco TEC plus od firmy Vaillant s výkonem 120 kW. Tato kaskáda šesti vybraných stejných kotlů nespĺňuje požadavek na maximální výkon a počítá se s mírným přetížením. První kotel bude provozován 8 784 h/r, druhý a třetí – 4 656 h/r, čtvrtý – 2 592 h/r, pátý – 456 h/r. Šestý může být využit 24 h/r jako kotel pro špičková zatížení.



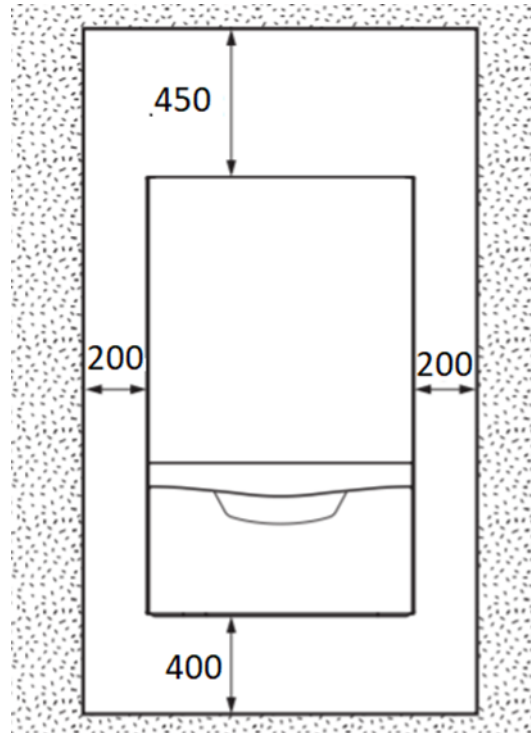
Graf 10 Diagram trvání potřeb tepla s vynesnými jmenovitými výkony nízkoteplotních plynových kotlů o výkonu 200–270 kW z varianty 4 a kondenzačních kotlů 120 kW z varianty 3

Kotle eco TEC plus jsou určeny především k vytápění v uzavřených teplovodních systémech. K výrobě TUV je možné připojení zásobníku a sekundárního okruhu. Je to cenově dostupná a úsporná varianta vytápění. Hořák z ušlechtilé oceli dovoluje spalovat plyn s nízkým zatížením spalovacího prostoru při nízkém podílu škodlivin jako oxidy dusíku vznikající při vysokoteplotním spalování. Vzduch pro spalování se může čerpat z místnosti výtopy nebo z venkovního prostoru. Celá kaskáda má společný kouřovod a je velmi kompaktní. [36]



Obrázek č. 20 Kotel VU 1206/5-5 eco TEC a jeho vybavení [36]

Umístění kotle na stěně je definováno tak, aby byla možnost připojení rozvodu vody, přívodu plynu a odvodu zkondenzované kapaliny. Boční vůle může být vynechána a je doporučena jenom ke snadnější servisní obsluze. Je nutno dodržet minimální vůli nad kotlem pro kouřovod, který má průměr 160 mm a při zapojení více kotlů je instalován pod úhlem a zvyšuje svou polohu o 62 mm/m. Vzduch je přiváděn potrubím o průměru 110 mm. [36]



Obrázek č. 21 Servisní zóny kotle eco TEC plus 120 kW [36]

Technická data pro vybranou sadu kotlů eco TEC plus jsou uvedena níže.

		Jednotka	VU 806/5-5	VU 1006/5-5	VU 1206/5-5
Rozsah jmenovitého tepelného výkonu / zemní plyn	80/60 °C 60/40 °C 50/30 °C	kW kW kW	14,9 -74,7 16,0 - 80,0 16,5 - 82,3	18,7 -93,3 20,0 - 100,0 20,7 - 102,8	22,4 -112,0 24,0 - 120,0 24,7 - 123,4
Max. jmenovitý tepelný výkon		kW	76,2	95,2	114,3
Min. jmenovitý tepelný výkon		kW	15,2	19,2	22,9
Kategorie			II2H3P		
Připojovací tlak / zemní plyn	G20	mbar	20		
Jmenovitá spotřeba / zemní plyn	G20	m ³ /h	8,1	10,1	12,1
Min. hmotnostní průtok spalin	G20	g/s	6,93	8,75	10,44
Max. hmotnostní průtok spalin	G20	g/s	34,7	43,4	52,1
Teplota spalin	min. max.	°C °C	40°C 85°C		
Třída NO _x			5		
Emise NO _x		mg/kWh	< 50	< 40	
Emise CO		mg/kWh	< 30		
Jmenovitá účinnost	80/60 °C 60/40 °C 50/30 °C 40/30 °C	% % % %	98 105 108 108	98 105 108 108	98 105 108 108
Jmenovitá účinnost při 30% výkonu	80/60 °C 60/40 °C 50/30 °C 40/30 °C	% % % %	96,9 106,3 106,9 107,7	98,3 108,5 105,4 108,5	97,3 108,4 106,8 108,6
Max. výstupní teplota		°C	90		
Nastavitelná výstupní teplota		°C	30-85		
Max. tlak topné vody		bar	6		
Objem topné vody v kotli		l	17	23,7	22,5
Jmenovitý průtok topné vody	Δ t = 23K	m ³ /h	2,99	3,74	4,49
Tlaková ztráta kotle	Δ t = 23K	mbar	111	124	147
Zbytková dopravní výška čerpadla		mbar	240	470	360
Množství kondenzátu	40/30	l/h	12,8	16,0	19,2
El. připojení		V / Hz	230 / 50		
Max. el. příkon (bez čerpadlové skupiny)		W	122	160	160
Min. el. příkon / Stand-by		W	< 2		
Stupeň el. krytí			IP X4D		
Výška kotle		mm	960		
Šířka kotle		mm	480		
Hloubka kotle		mm	602		
Hmotnost kotle		kg	68	86	90
Připojení topné vody		mm	1 1/4"		
Připojení odvodu kondenzátu		Ø mm	24		
Připojení plynu		mm	1"		
Připojení odkouření		mm	110/160		
Diferenční tlak ventilátoru spalin		Pa	150	200	200
Certifikované způsoby odkouření			C13, C33, C43, C53, C93, B23, B53, B53p, B23p		

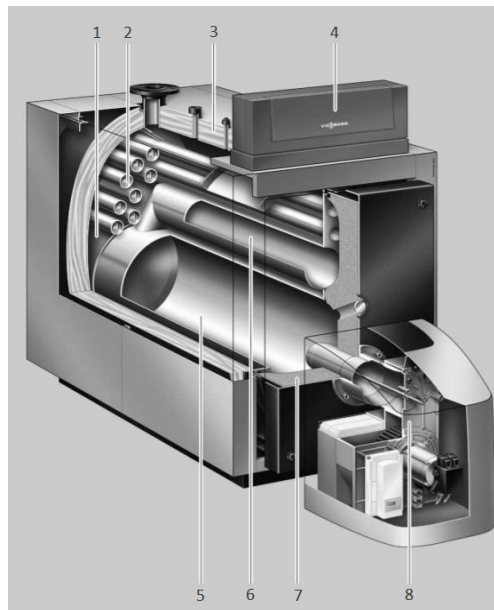
Obrázek č. 22 Technická data pro vybranou sadu kotlů eco TEC plus [36]

5.4. Čtvrtá varianta

Čtvrtá varianta se bude skládat ze tří nízkoteplotních plynových topných kotlů VITOPLEX 200 od firmy Viessmann se společným výkonem 740 kW. Nepodařilo se dohledat kotle o výkonu splňujícím podmínku unifikace a potřebného výkonu. Možnost je sestavit kaskádu z různých kotlů: jednoho 200kW a dvou o výkonu 270 kW. Dle Graf 10 první větší kotel bude provozován 8 784 h/r, druhý kotel 270 kW – 4 224 h/r, třetí 200 kW – 48 h/r.

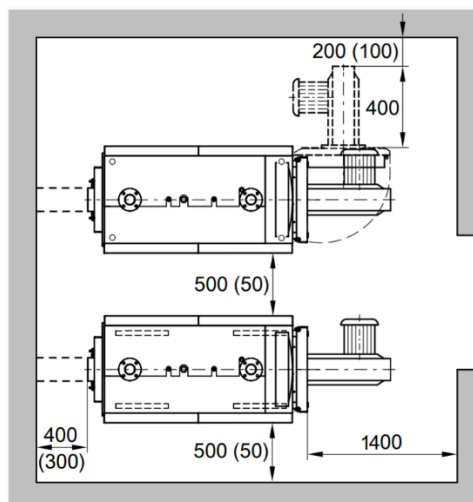
Kaskáda tří vybraných kotlů 270 a 200 kW nesplňuje požadavek na maximální výkon. 750 kW je špičková hodnota, která odpovídá venkovní teplotě -12 °C. V Praze tak nízká teplota téměř nebývá a dá se předpokládat, že kotle budou případně krátkodobě přetíženy o 1,35 %.

Vybraný třítahový kotel s nízkým zatížením spalovacího prostoru dovoluje spalovat plyn při nízkém podílu škodlivin jako oxidy dusíku vznikající při vysokoteplotním spalování. Velký objem vody ve výměníku zaručuje dobrou vlastní cirkulaci a efektivní odvod tepla. Tepelné ztráty stěnami kotle jsou minimalizovány účinnou tepelnou izolací. [37]



Obrázek č. 23 Zobrazení kotle VITOPLEX 200 v řezu. 1 – ohřívané médium (voda); 2 – třetí tah kotle; 3 – vysoce účinná tepelná izolace; 4 – řídicí jednotka Vitotronic; 5 – spalovací komora; 6 – druhý tah kotle; 7 – tepelná izolace dvířek kotle; 8 – hořák [37]

Následující schéma zobrazuje umístění kotlů ve výtopně. Ke snadné montáži a údržbě jsou doporučeny uvedené rozměry. Vzdálenosti nesmějí být menší než příslušné hodnoty v závorkách.



Obrázek č. 24 Servisní zóny kotlů VITOPLEX 200 [37]

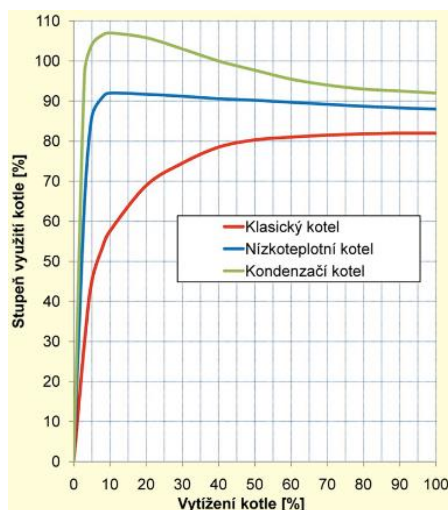
Technické údaje pro kotle 200 kW a 270 kW jsou popsány níže. Technická data obsahují i vlastnosti výměníku Vitotrans 300.

Jmenovitý tepelný výkon	kW	200	270	Jmenovitý tepelný výkon	kW	200	270
Jmenovité tepelné zatížení	kW	217	293	Jmenovité tepelné zatížení	kW	217	293
Označení značkou CE – podle směrnice pro účinnost – podle směrnice pro plynové spotřebiče		CE-0085BQ0020 CE-0085BQ0020		Celková hmotnost	kg	535	710
Připustná výstupní teplota (= pojistná teplota)	°C	110 (až 120 °C na vyžádání)		Kotel s tepelnou izolací, hořákem a regulací kotlového okruhu			
Připust. provozní teplota	°C	95		Objem kotlové vody	litrů	300	400
Připustný provozní tlak	bar kPa	4 400		Přípojky topného kotle			
Odpor na straně spalín	Pa mbar	200 2,0	180 1,8	Výstup a vratná větev kotlové vody	PN 6 DN	65	65
Rozměry tělesa kotle				Bezpečnostní přípojka (pojistný ventil)	R	1¼	1¼
Délka (rozměr q) ^{*1}	mm	1580	1600	Vypouštění	R	1¼	
Šířka (rozměr d)	mm	650	730	Charakteristiky spalín^{*2}			
Výška (s hrdlem) (rozměr t)	mm	1180	1285	Teplota (při teplotě kotlové vody 60 °C)			
Celkové rozměry				– při jmenovitém tepelném výkonu	°C	180	
Celková délka (rozměr r)	mm	1640	1660	– při dílčím zatížení	°C	125	
Celková délka s hořákem a krytem (rozměr s)	mm	2060	2085	Teplota (při teplotě kotlové vody 80 °C)	°C	195	
Celková šířka (rozměr e)	mm	825	905	Hmotnostní tok spalín			
Celková výška (rozměr b)	mm	1350	1460	– u zemního plynu	kg/h	1,5225 x topný výkon	
Údržbová výška (regulace, roz- měr a)	mm	1520	1630	– u topného oleje EL	kg/h	1,5 x topný výkon	
Výška				Potřebný tah	Pa/mbar		
– protihlukové stavěcí nožky	mm	28	28	Spalinová přípojka	Ø mm	200	200
– pružné protihlukové uložení kotle (zatížené)	mm	–	–	Pohotovostní ztráta $q_{B,70}$	%	0,30	0,25
Základy				Vhodný Vitotrans 300			
Délka	mm	1400	1400	– provoz na plyn	Obj. č.	Z010 327	Z010 328
Šířka	mm	830	900	– provoz na olej	Obj. č.	Z010 331	Z010 332
Průměr spalovacího prostoru	mm	400	480	Jmenovitý tepelný výkon			
Délka spalovacího prostoru	mm	1200	1200	Topný kotel s výměníkem Vitotrans 300			
Hmotnost těles kotlů	kg	455	630	– provoz na plyn	kW	219,0	295,6
Celková hmotnost	kg	505	680	– provoz na olej	kW	213,0	287,5
Kotel s tepelnou izolací a regulací ko- tlového okruhu				Označení značkou CE		CE-0085BS0287	
				Vitotrans 300 ve spojení s topným kotlem jako kondenzační jednotkou			
				Odpor na straně spalín	Pa	285	280
				Topný kotel s výměníkem Vitotrans 300	mbar	2,85	2,80

Obrázek č. 25 Technická data kotlů VITOPLEX [37]

5.5. Problematika nízkoteplotních kotlů

Kondenzační kotle mají hlavní výhodu v tom, že kondenzují vodní páru a takto odebírají ze spalín teplo, jež by bylo za jiných okolností ztraceno komínem.



Graf 11 Závislost účinnosti na vytížení plynových kotlů [38]

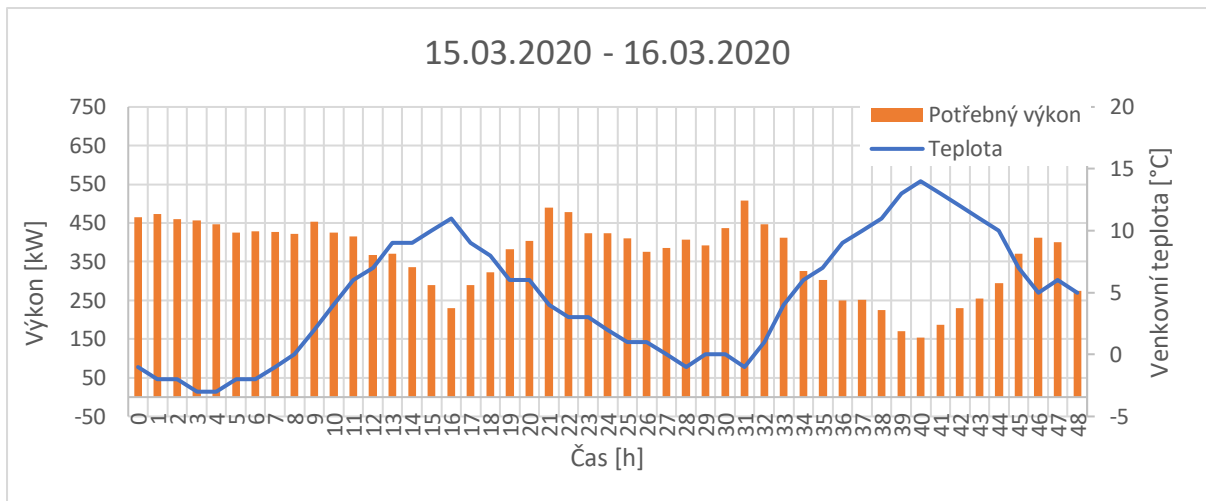
Účinnost kondenzace je tím vyšší, čím menší relativní výkon po celou dobu provozu a čím větší teplotní rozdíl je mezi vratnou vodou a skutečným rosným bodem spalin. Teplota rosného bodu je závislá na přebytku vzduchu a je rovna přibližně 57 °C. Přičemž teplota vody má být nižší než teplota spalin. Pokud tento požadavek nebude splněn, nedojde ke kondenzaci a kotel bude pracovat s účinností velkoprostorového kotle. Proto se kondenzační kotle používají v nízkoteplotních soustavách. Vhodnou variantou jsou systémy podlahového nebo stěnového vytápění.

Další problém může nastat v tom, že v nízkoteplotních soustavách teplota ohřáté vody je nižší než požadovaná teplota UV. Bude potřeba použít další zdroj energie k dohřívání UV před dodávkou spotřebitelům. Předpokládá se, že zásobovaný objekt není vybaven podlahovým a stěnovým vytápěním a charakter odběru TUV vyžaduje použití zásobníku s výměníkem tepla. Účinnost kondenzace potom je zanedbatelná a potenciál nebude možné využít naplno, ovšem účinnost moderních kondenzačních kotlů i bez uvažování kondenzace je velmi vysoká a jejich použití je stále atraktivní.

6. Způsoby provozu

Hodnoty ročního využití z Graf 9 a Graf 10 jsou platné za předpokladu, že v případě snížení potřebného výkonu zásobovaného objektu výkon dodávaný soustavou bude také snížen, a to odstavením jednoho z kotlů. Ovšem to není jediná možnost regulace.

Automatická regulace musí mít dostatečnou inteligenci, aby dokázala efektivně využívat jmenovitých výkonů kotlů. Vzhledem k tomu, že každý jednotlivý kotel má určitou hodnotu minimálního provozního výkonu, v momentech náběhu dalšího kotle kaskády, společný výkon ostatních kotlů má být snížen o hodnotu minimálního provozního výkonu. Následující graf znázorňuje hodinový průběh teplot a výkonů potřebných na vytápění a přípravu TUV během dnů 15. 3. 2020–16. 3. 2020. Pro přechodné období je charakteristické výrazné kolísání teplot.



Graf 12 Průběh potřeb tepelného výkonu v závislosti na venkovní teplotě a odběru TUV během dvou dnů přechodného období [6]

Výkon potřebný k výrobě TUV se vypočítá následujícím způsobem. Předpokládá se ohřev vody z teploty $T_1 = 10$ [°C] na teplotu $T_2 = 55$ [°C], hustota vody $\rho = 997$ [$kg \cdot m^{-3}$], měrná tepelná kapacita $c = 4180$ [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$]. Střední spotřeba teplé vody na osobu v březnu je 50 l/den (Graf 1). Denní výkon byl uvažován jako stálý během roku, ovšem nebude konstantní během dne. Hodnota potřebného výkonu je závislá na odběru teplé vody obyvateli. Tento odběr se odlišuje v pracovních dnech a o víkendu a je znázorněn v Graf 2, přičemž vybraný časový úsek zahrnuje neděli a pondělí. Denní odběr vody je možné určit ze vztahu

$$V = \frac{P_{TUV}^W \cdot 24 \cdot 3,6 \cdot 10^3}{\rho \cdot c \cdot (T_2 - T_1)} \quad (11)$$

kde V [m^3] – denní odběr TUV,

P_{TUV}^W [W] – zadaný výkon k ohřevu TUV,

T_1 [°C] – teplota vody na vstupu do soustavy,

T_2 [°C] – teplota vody na výstupu ze soustavy.

Počet osob, které by mohly využít vyrobenou teplou vodu, vychází ze střední spotřeby na osobu

$$N = \frac{V}{V_{sd}} \quad (12)$$

kde N [-] – počet odběratelů,

V_{sd} [m^3] – maximální střední denní odběr jedním odběratelem, vyplývá z Graf 1.

Potřebný výkon v konkrétní hodině potom je dán vztahem

$$P_{TUV} = \frac{\rho \cdot V_{sh} \cdot N \cdot c \cdot (T_2 - T_1)}{3,6 \cdot 10^3} \quad (13)$$

kde P_{TUV} [W] – potřebný výkon pro ohřev TUV v určitém čase,

V_{sh} [m³] – objem hodinového odběru teplé vody jednou osobou v určitém čase a dni týdne dle Grafu 2,

N [–] – vypočtený počet osob odebírajících teplou vodu.

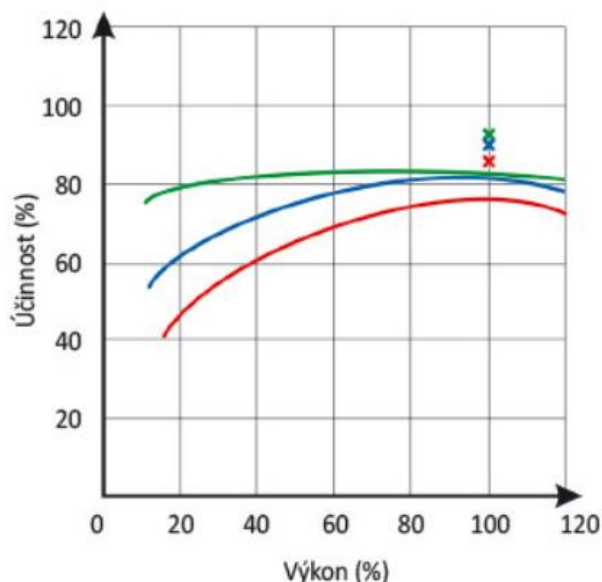
Denní potřeba topného výkonu soustavy se vypočte analogickým způsobem jako roční potřeba. Rozdíl bude v tom, že hodnoty celkového výkonu nebudou seřazeny dle velikostí, ale budou odpovídat příslušným hodinám.

Takto jsem definoval celkový odběr tepla v určitém čase, výkon pro vytápění je přímo úměrný teplotě v konkrétní hodině a výkon k výrobě TUV je přímo úměrný hodinovému odběru vody vynásobenému počtem odběratelů.

6.1. Provoz s optimálním výkonem

První navržený způsob regulace spočívá v tom, že část kotlů pracuje s konstantním optimálním výkonem a zbylé mají proměnné zatížení závislé na okamžité potřebě tepla. Vybrané kotle na pelety jsou automatické a jsou vybaveny lambda sondou. Z Graf 13 je možné odhadnout pokles účinnosti automatického kotle <5 % v rozsahu zatížení od 30 % do 100 %. Zřejmé je také, že svého maxima účinnosti nebude nabývat při provozu na plný výkon, ale při zatížení 60–80 %.

Vybrané plynové kotle jsou buď kondenzační, nebo nízkoteplotní. Dle Graf 11 jejich účinnost nabývá maxima při provozu se zatížením kolem 10 %.



Graf 13 Závislost účinnosti na zatížení kotlů na tuhá paliva [39]

Diagram popisuje závislost účinnosti na využití výkonu: červeně – moderní kotel na uhlí, modře – moderní kotel na dřevo, zeleně – kotel s automatickým přikládáním paliva. [39]

Cílem je maximalizovat počet provozních hodin, kdy kotle pracují s optimálním výkonem. Okamžité zatížení se určuje jako poměr okamžitého výkonu ku jmenovitému. Dále se pro každý kotel odečte hodnota okamžité účinnosti dle Příloha 1. Střední okamžitá účinnost se spočítá jako součet vážených okamžitých účinností jednotlivých kotlů:

$$\eta = \sum_{k=1}^n \eta_k \frac{P_{hk}}{P_{hc}} \quad (14)$$

kde η_k – okamžitá účinnost k -tého kotle,

k [-] – číslo kotle a n [-] – celkový počet použitých kotlů,

P_{hk} [W] – výkon k -tého kotle v konkrétní hodině,

P_{hc} [W] – výkon dodávaný všemi použitými kotle v danou hodinu.

6.2. Provoz se stejným výkonem všech kotlů

Časté zapalování a zhasínání nebo udržování rozehrátých kotlů připravených k okamžité dodávce tepla není vždy optimální způsob provozu. V pohotovostním režimu bude vzrůstat reaktivní podíl ztrát v důsledku úniku naakumulované energie sáláním do místnosti kotelny a přirozeným tahem komína. Zvláště u kotle na tuhá paliva po omezení přívodu vzduchu do ohniště může docházet k nedokonalému spalování zbylého paliva a zvýšení ztrát chemickým a mechanickým nedopalem. Pro zjednodušení se bude uvažovat jen o ztrátě sáláním a tahem komína. Ze zkušenosti se předpokládá chladnutí vody v kotli o 10 °C za hodinu. Množství tepla, jež kotel bude ztrácet každou hodinu, než za přibližně 6 hodin vychladne:

$$Q_{in} = \frac{\rho \cdot c \cdot V_k \cdot \Delta t_{in}}{3,6 \cdot 10^3} \quad (15)$$

kde Q_{in} [Wh] – hodinová ztráta tepla po odstavení kotle,

c [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$] – měrná tepelná kapacita vody uvnitř kotlového výměníku,

ρ [$kg \cdot m^{-3}$] – hustota vody,

V_k [m^3] – objem kotlové vody uvedený v technickém listu kotle,

Δt_{in} [°C] – předpokládaný hodinový pokles teploty vody v kotli.

Hraje roli doba mezi odstavením a znovu najetím kotle. Po úplném vychladnutí bude potřeba kotel znovu rozpálit a rozehrát přidáním ztraceného tepla. Proto je cílem eliminovat špičky výkonu a zbytečná přerušování provozu.

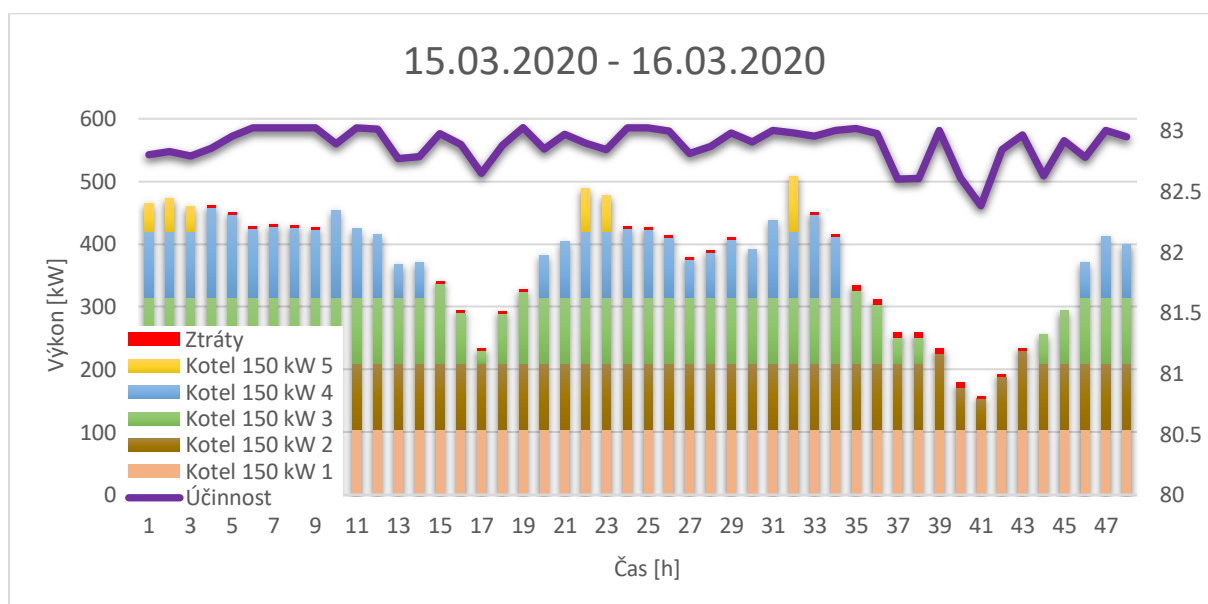
Dalším způsobem regulace je provoz všech kotlů se stejným výkonem. Pokud jejich zatížení opustí pásmo vyhovujících účinností, bude jeden kotel odstaven. Na rozdíl od předchozí varianty je zde snaha zmenšit počet přerušování za cenu možného snížení střední účinnosti.

Okamžité zatížení se určuje stejným způsobem jako v předchozí variantě provozu. Hodnota okamžité účinnosti se pro kotel odečte dle Příloha 1. Okamžitá účinnost je stejná u všech pracujících kotlů.

6.3. Provoz první varianty kotlů

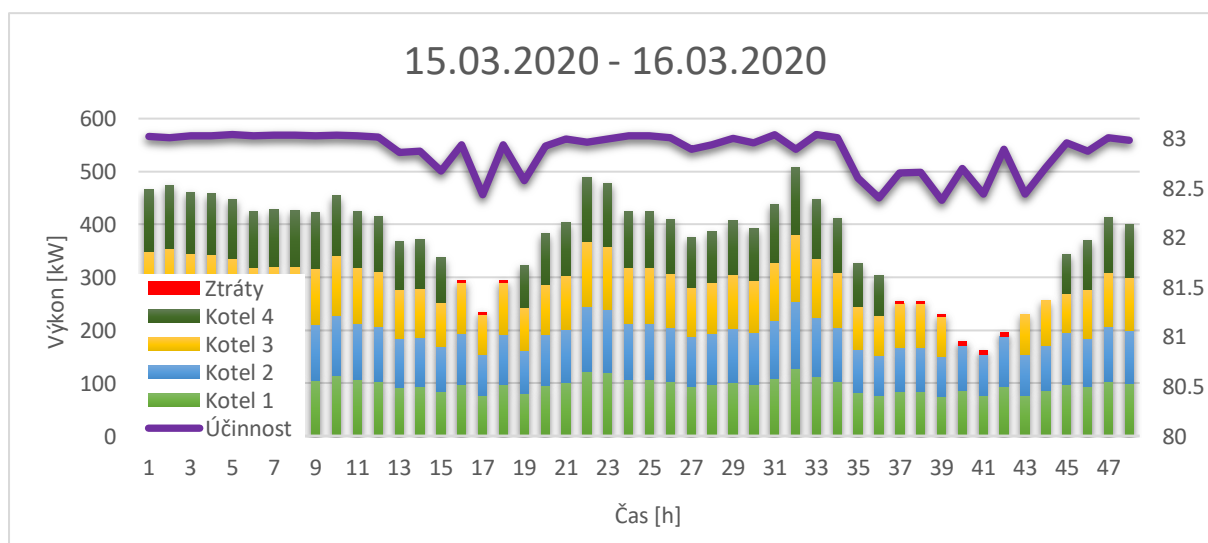
6.3.1. Přejíchné období

Na příkladu dvou dnů z přejíchného období je znázorněn chod soustavy kotlů první varianty. Kotel na pelety SMART má výkonový rozsah 40–150 kW.



Graf 14 Zatížení kotlů 150 kW: provoz na optimální výkon. Přejíchné období

Z grafu je patrné, že kotle 1 a 2 by pracovaly nepřetržitě, ale kotle 4 a 5 se musejí odstavit několikrát.



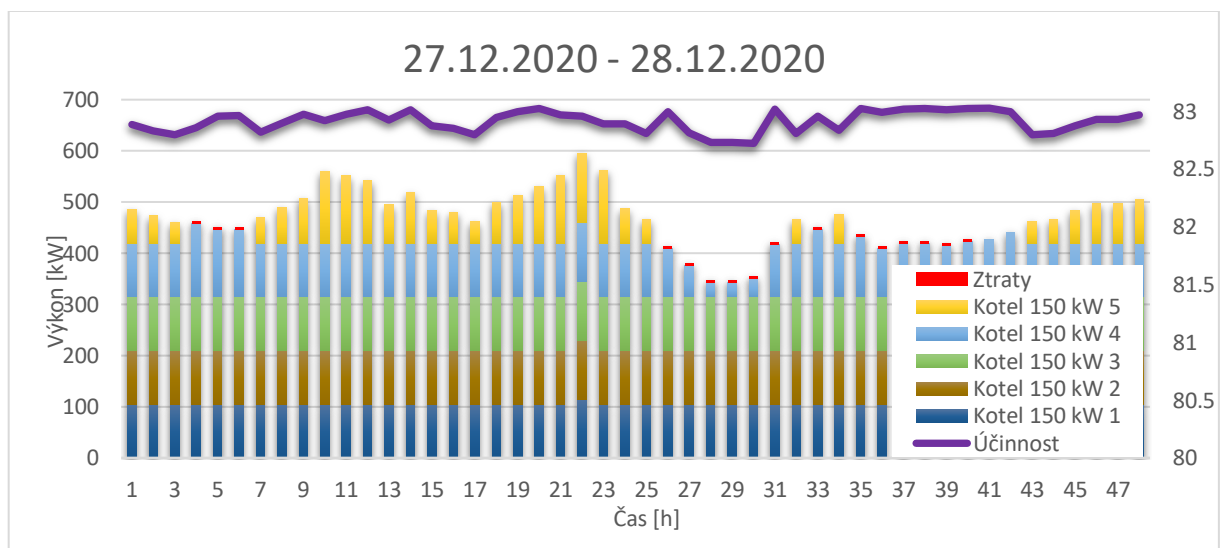
Graf 15 Zatížení kotlů 150 kW: provoz na stejný výkon. Přejíchné období

Graf výše znázorňuje: během prvních 12 hod. potřebný výkon je větší 400 kW a je možné využívat 4 kotle se zatížením větším než 67 %. Potom venkovní teplota vzrůstá a výkon potřebný k vytápění silně klesá, v 16 hod. jeden z kotlů bude odstaven a ponechán v pohotovostním režimu, avšak znovu najede v 19 hod. Obdobná situace nastane další den, čtvrtý kotel bude odstaven v době 37–44 hod. a třetí v čase 40–42 hod.

Byl redukován počet přerušení a hodin, kdy kotel zůstává v pohotovostním režimu. Výsledné zatížení pracujících kotlů neklesá pod 50 %. Střední účinnost závislá na vytížení kotlů η_s je 82,87 % oproti 82,89 % u prvního způsobu.

6.3.2. Zimní období

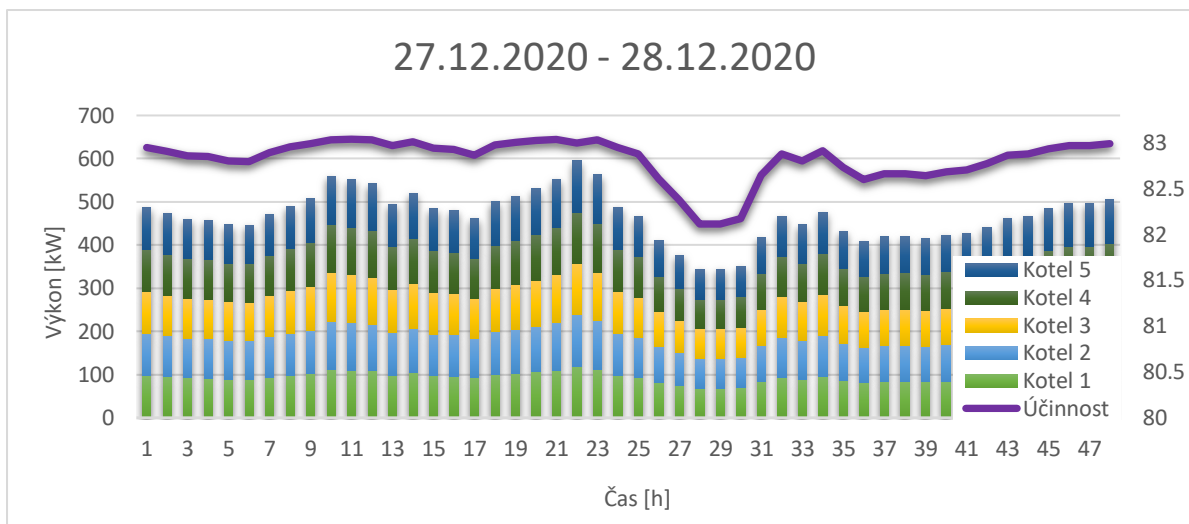
Dále budou zkoumány stejné dny v týdnu, avšak v zimním období, kdy venkovní teploty se příliš nemění. Průběh diagramu potřeb tepla bude převážně ovlivněn odběrem TUV.



Graf 16 Zatížení kotlů 150 kW: provoz na optimální výkon. Zimní období

Ve vybraných dnech 27.–28. prosince roku 2020 teplota kolísala od -4 do $+2$ °C. Čtyři z pěti kotlů nepřetržitě dodávaly teplo, přičemž tři pracovaly celou dobu s optimálním výkonem 105 kW. Výjimkou byla jedna hodina špičkového zatížení, kdy pracovní výkon by byl zvýšen do 115 kW. Pátý kotel by se musel odstavit čtyřikrát.

Na rozdíl od předchozího případu provoz se stejným výkonem všech kotlů nebude obsahovat okamžiky přerušení, diagram provozních výkonů bude vypadat následovně:

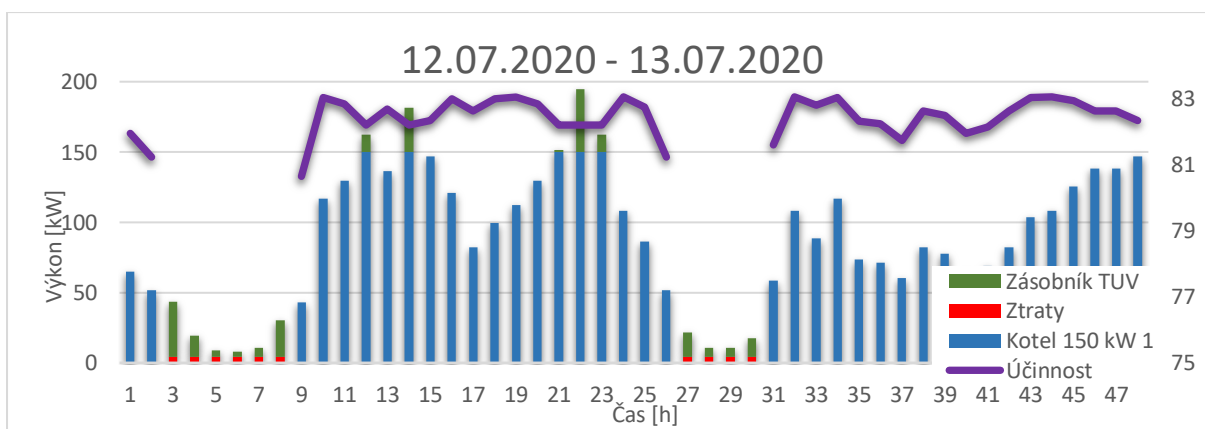


Graf 17 Zatížení kotlů 150 kW: provoz na stejný výkon. Zimní období

Větší celková dodávka tepla dovoluje použití pěti kotlů i ve chvíli minimální potřeby, kterou lze pozorovat mezi 28. a 30. hodinou. Střední hodnota η_s činí 82,82 % oproti 82,91 % z předchozí varianty.

6.3.3. Letní období

V letním období se vyrobené teplo využije pouze k ohřevu TUV a dodávka bude uskutečněna jedním kotlem. Jelikož množství potřebného tepla je závislé na odběru vody během dne, nastávají okamžiky poklesu pracovního výkonu pod hodnotu minimálního výkonu, se kterým může kotel pracovat. Snaha eliminovat použití dalšího kotle při špičkových zatíženích vede k okamžikům převýšení jmenovitého výkonu kotle. Proto může být zapojen zásobník TUV, jenž dokáže dodat potřebné teplo v čase, kdy kotel je odstaven nebo potřeba tepla převyšuje možnosti jednoho kotle. Graf 18 zohledňuje množství kotlem vyrobeného tepla, množství tepla dodaného ze zásobníku při odstaveném kotli a teplo ztracené kotlem během odstávek.



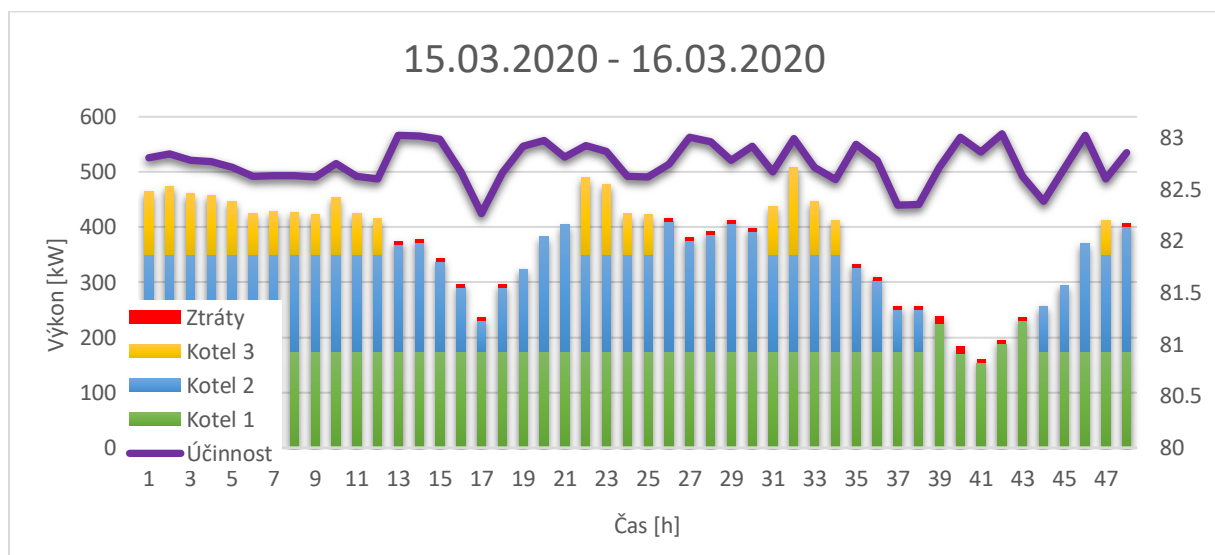
Graf 18 Zatížení kotle 150 kW v letním období

Kotel SMART bude odstaven v ranních hodinách od 3 do 8 hodin v neděli a od 3 do 6 hodin v pracovní den. V tomto čase dochází ke ztrátám kvůli odstávce a je využíván zásobník TUV. Střední účinnost η_s je 82,42 %.

6.4. Provoz druhé varianty kotlů

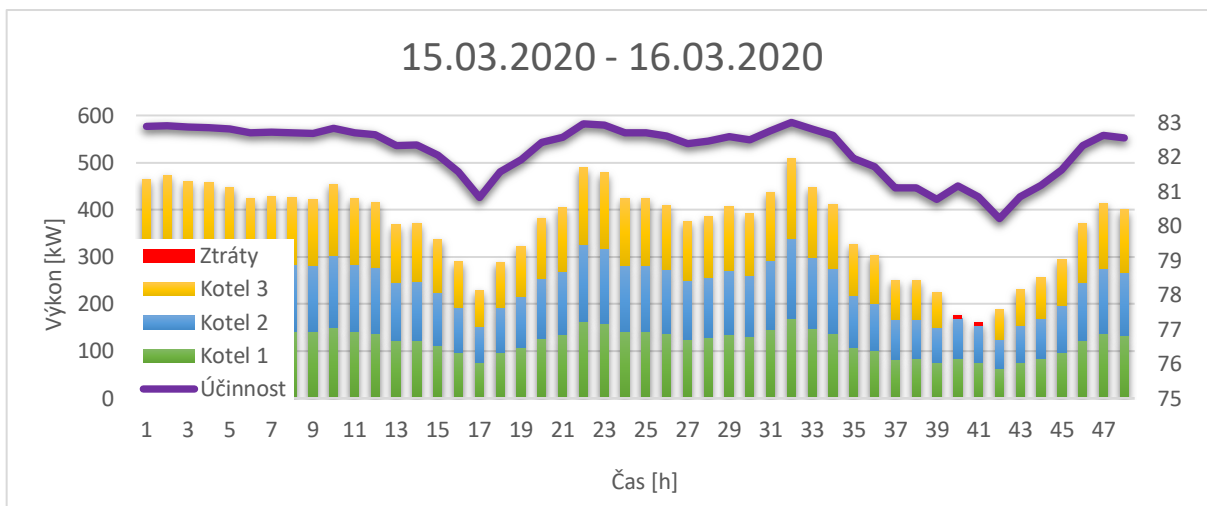
6.4.1. Přechodné období

Obdobným způsobem bude probrána varianta 1 se třemi automatickými kotly Guntamatic PRO 250 kW, které mají výkonový rozsah 60–250 kW. Pro danou variantu jsou platné stejné předpoklady jako pro automatické kotle SMART. Optimální hodnotou výkonu je 175 kW. První způsob regulace spočívá v tom, že se bude udržovat optimální výkon za cenu odstavování kotlů. Pokud potřebný výkon je vyšší než výkon dodávaný kotlem pracujícím s optimálním výkonem, ale pořád není dostatečně vysoký pro náběh kotle dalšího, potom zatížení již pracujícího kotle bude zvýšeno a dodávka tepla jím bude uskutečňována, dokud potřebný výkon nebude dostatečným pro náběh dalšího kotle.



Graf 19 Zatížení kotlů 250 kW: provoz na optimální výkon. Přechodné období

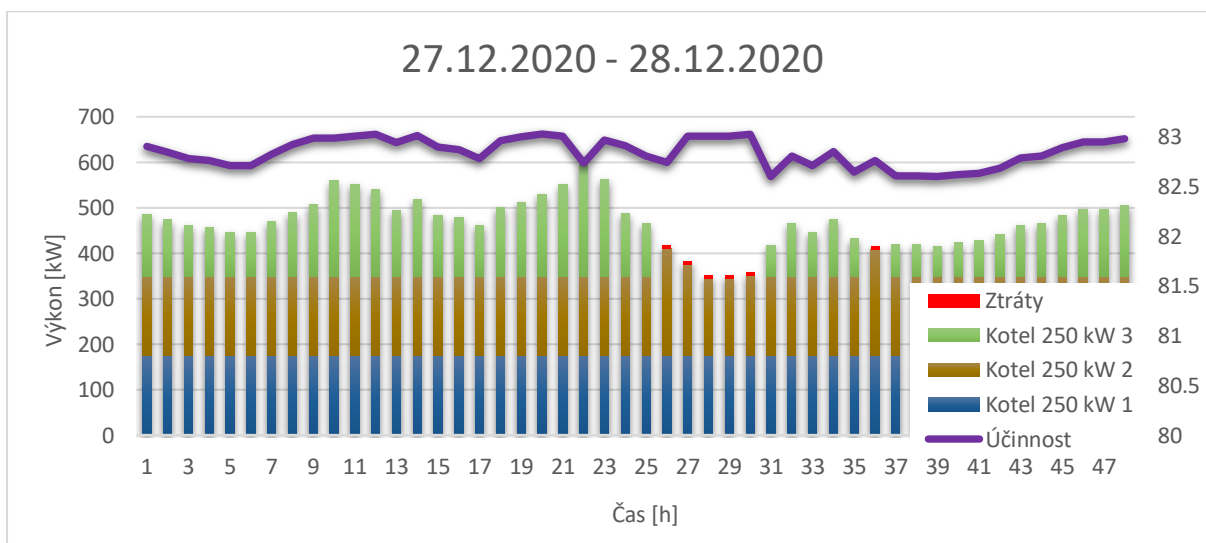
Provoz kotle 2 bude přerušen v čase minima potřeb tepelného výkonu kolem 17. hod. a 41. hod. Kotel 3 se odstaví čtyřikrát.



Graf 20 Zatížení kotlů 250 kW: provoz na stejný výkon. Přechodné období

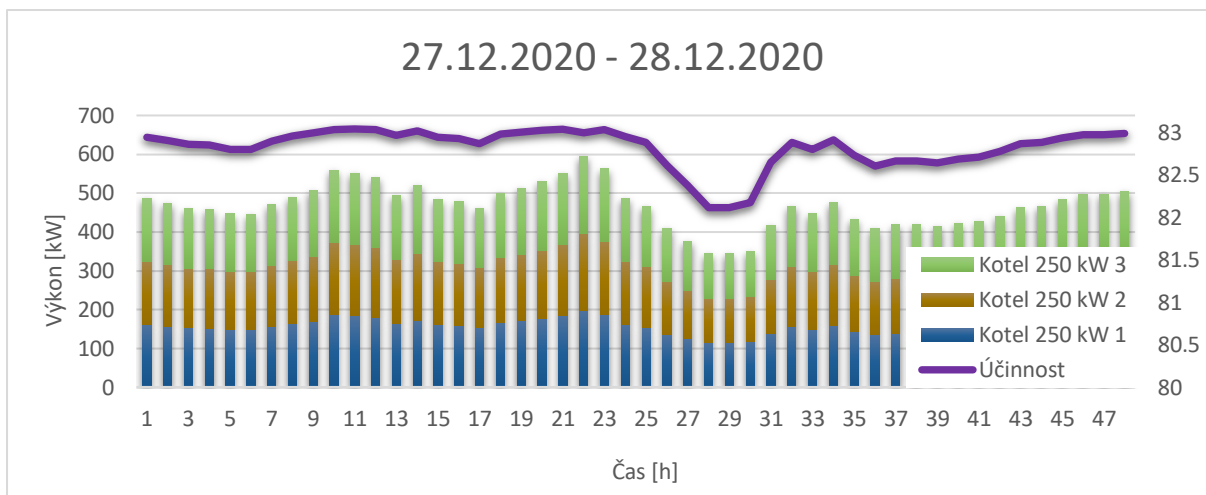
Při zatěžování všech pracujících kotlů stejným výkonem se dá snížit počet přestávek do jedné dvouhodinové ve 40.–41. hodině, kdy potřebný výkon je menší než minimální výkon tří kotlů. Střední účinnost závislá na zatížení při provozu se stejným výkonem pracujících kotlů je 82,2 % oproti 82,76 % dosaženým při regulaci jen jedním kotlem z Graf 19.

6.4.2. Zimní období



Graf 21 Zatížení kotlů 250 kW: provoz na optimální výkon. Zimní období

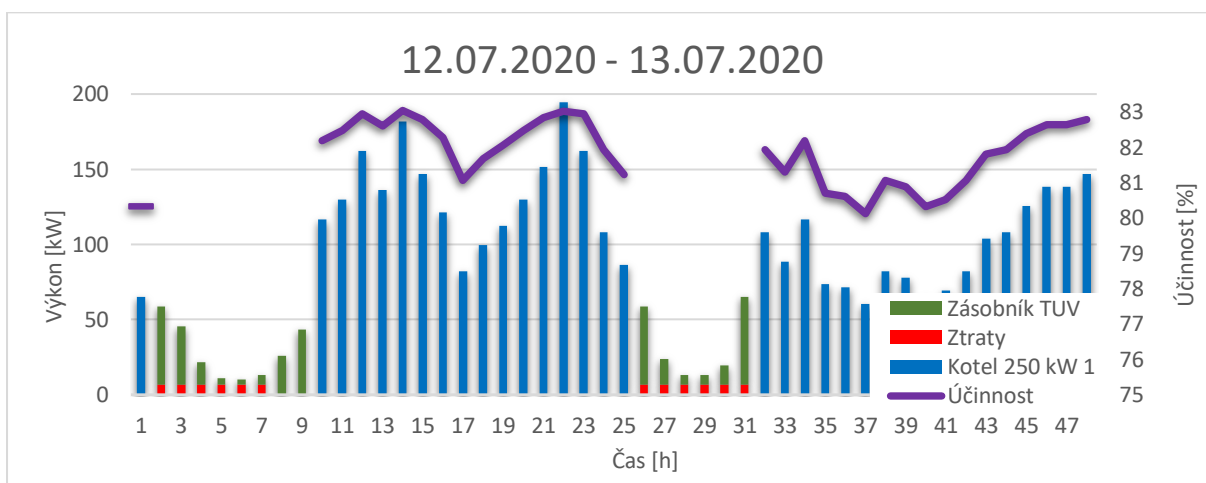
Během zimního období se situace liší pouze vyššími hodnotami potřebného výkonu. Z Grafu 14 je patrná nutnost přerušení provozu třetího kotle v době 26.–31. hod. a v 36. hod. Střední hodnota $\eta_s = 82,85 \%$ na rozdíl od druhého způsobu provozu, znázorněného v Graf 22, kdy byly eliminovány všechny odstávky kotlů a střední účinnost η_s klesla na 82,82 %.



Graf 22 Zatížení kotlů 250 kW: provoz na stejný výkon. Zimní období

6.4.3. Letní období

V letním období bude provozován jeden kotel. V hodinách nejmenší spotřeby kotel bude odstaven a dodávku tepla zabezpečí zásobník TUV. Větší automatický kotel na pelety má i hodnotu minimálního výkonu větší, proto bude odstaven od 2 do 9 hodin v neděli a od 2 do 7 hodin v pracovních dnech týdne. Střední účinnost η_s je 81,84 %.



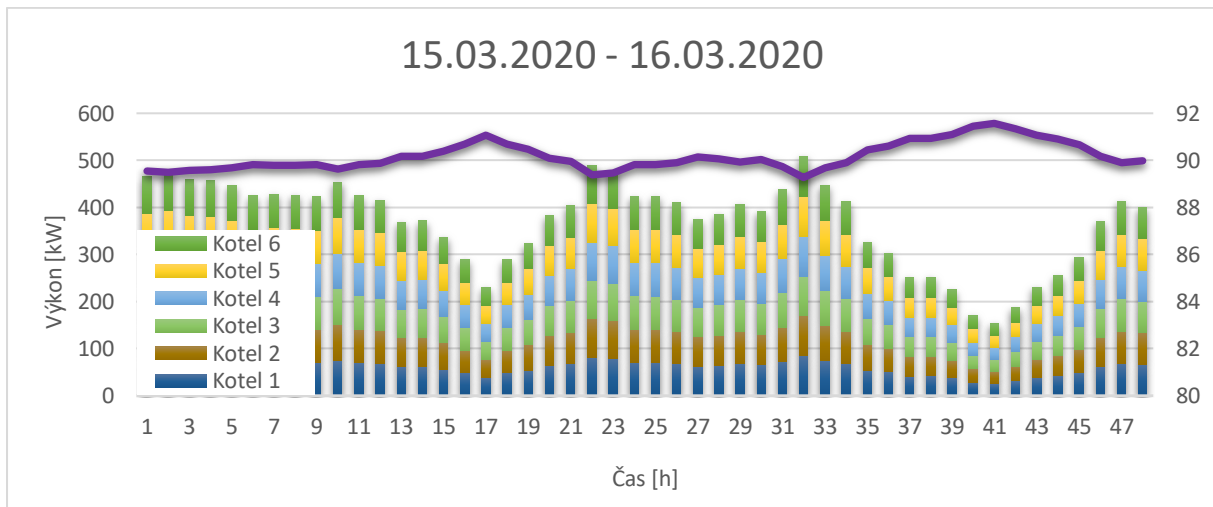
Graf 23 Zatížení kotle 250 kW v letním období

6.5. Provoz třetí varianty kotlů

6.5.1. Přechodné období

Následuje varianta 3, obsahující kaskádu šesti kondenzačních kotlů na plyn o výkonu 11–120 kW. Na rozdíl od automatických kotlů na dřevní pelety mají kondenzační kotle tím větší účinnost, čím je nižší zatížení. Proto je cílem provozovat kotle s co nejnižším zatížením. Pokud optimální hodnota je 11 kW a minimální potřebný výkon ve zkoumaných dnech přechodného období činí 153 kW ve 41. hod., pak provoz všech kondenzačních kotlů v kaskádě je nepřetržitý

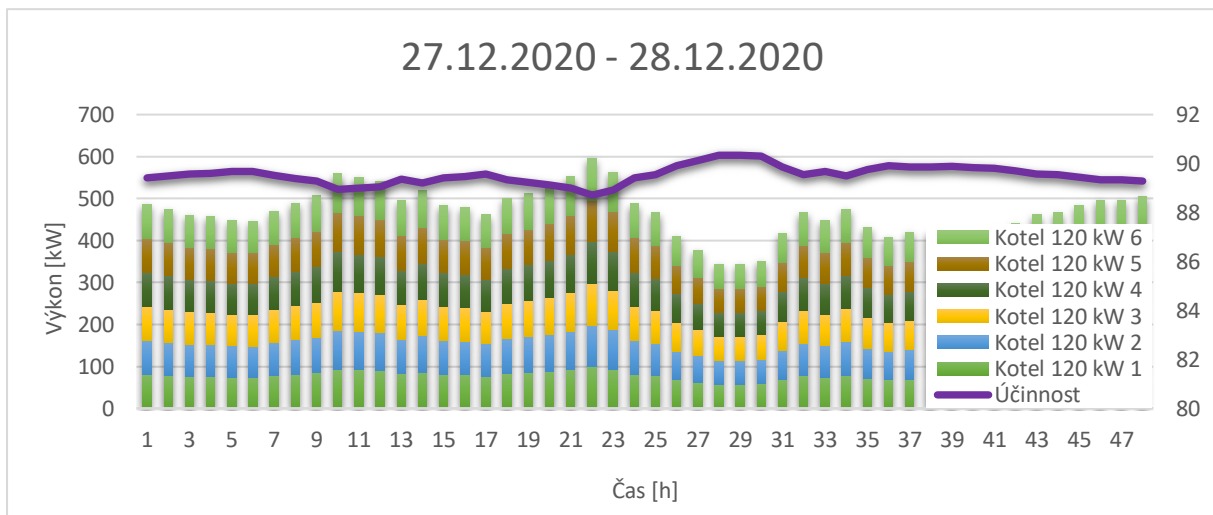
v obou výše probíraných případech regulace. Jelikož střední zatížení bude stejné, potom i střední účinnost závislá na něm bude stejná. Proto se průběh účinnosti znázorní pouze jedním ze způsobů provozu, a to na druhém.



Graf 24 Zatížení kotlů 120 kW: provoz na stejný výkon. Přechodné období

6.5.2. Zimní období

Při plynulém provozu šesti kotlů z Graf 24 a Graf 25 je patrný nárůst účinnosti v okamžicích nejmenšího odběru tepla, kdy provozní výkon jednotlivých kotlů klesá. V zimním období průběh účinnosti je stabilnější, ale střední hodnota závislá na zatížení činí 89,53 %, což je méně než 90,17 % v období přechodném. Daný průběh je v souladu se závislostí účinnosti na zatížení nízkoteplotních kotlů, viz Příloha 1.

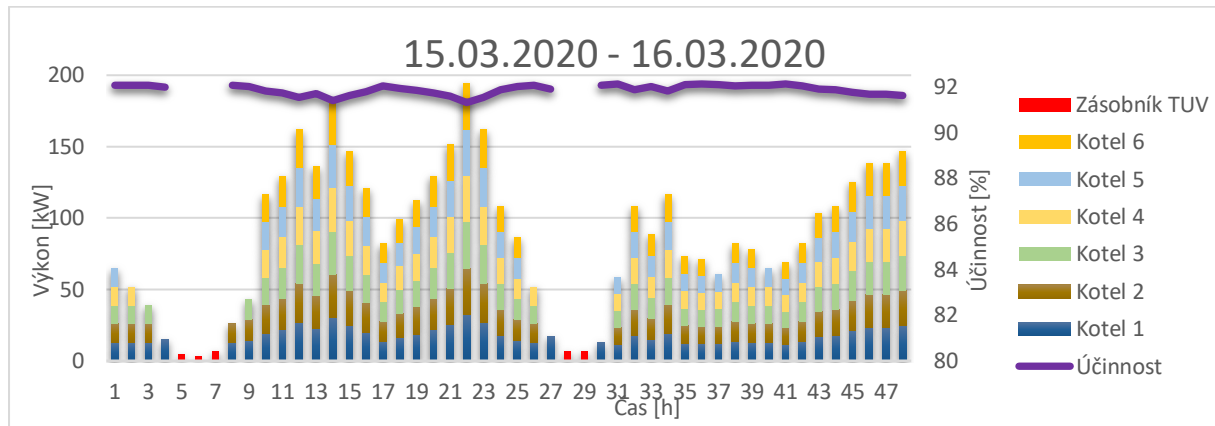


Graf 25 Zatížení kotlů 120 kW: provoz na stejný výkon. Zimní období

6.5.3. Letní období

V letním období kondenzační kotle budou pracovat se stejným co nejnižším zatížením. Jeden z kotlů se odstaví, pokud výkon klesne pod minimální provozní výkon. Objem kotlové vody

u kondenzačních kotlů je řádově menší než u velkoprostorových, proto ztráty při odstávkách budou zanedbány.



Graf 26 Zatížení kotlů 120 kW v letním období

Je patrné minimální využití zásobníku TUV, dané schopností vybraných kondenzačních kotlů dodávat teplo s výkonem 11 kW. Ovšem potřeba tepla je menší od 5 do 7 hodin v neděli a v čase od 5 do 6 hodin ráno v pracovních dnech. Střední účinnost η_s je 91,87 %.

6.6. Provoz čtvrté varianty kotlů

6.6.1. Přechodné období

Čtvrtá varianta se dvěma kotly s výkonovým rozsahem 67,5–270 kW a jedním kotlem o výkonu 50–200 kW. Dle Graf 11 platí úvaha jako u kondenzačních kotlů, snahou je provozovat kotle na minimální výkon. Ovšem v přechodném období hodnota minimální potřeby tepla je nižší než minimální výkon tří kotlů, proto v Graf 27 je zobrazena odstávka jednoho z nich. K tomuto stavu by došlo i při provozu na optimální výkon. Otázkou je, který z kotlů odstavit, protože na rozdíl od předchozích tří variant nemají stejný jmenovitý výkon. Pokud se odstaví kotel 200kW, zbylé kotle budou pracovat se stejným zatížením 35,51 % (ve 40. hod.) a hodinová ztráta tepla bude rovna

$$Q_{in200} = \frac{\rho \cdot c \cdot V_{k200} \cdot \Delta t_{in}}{3,6 \cdot 10^3} = \frac{997 \cdot 4180 \cdot 0,3 \cdot 10}{3,6 \cdot 10^3} = 3\,470 \text{ Wh} \quad (16)$$

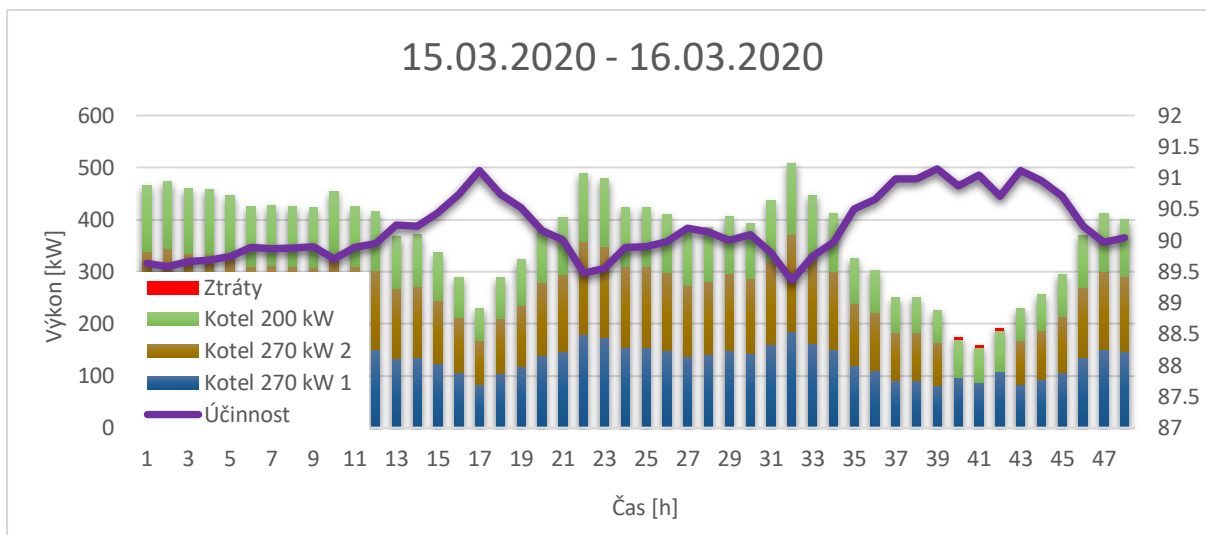
kde Q_{in200} [Wh] – hodinová ztráta tepla po odstavení kotle o výkonu 200 kW,

c [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$] – měrná tepelná kapacita vody uvnitř kotlového výměníku,

ρ [$kg \cdot m^{-3}$] – hustota vody,

V_{k200} [m^3] – objem vody ve výměníku tepla z technického listu kotlů 200 kW,

Δt_{in} [$^{\circ}C$] – předpokládaný hodinový pokles teploty vody v kotli.



Graf 27 Zatížení kotlů 200–270 kW: provoz na stejný výkon. Přechodné období

Kdyby byl odstaven kotel o větším jmenovitém výkonu 270 kW, pak

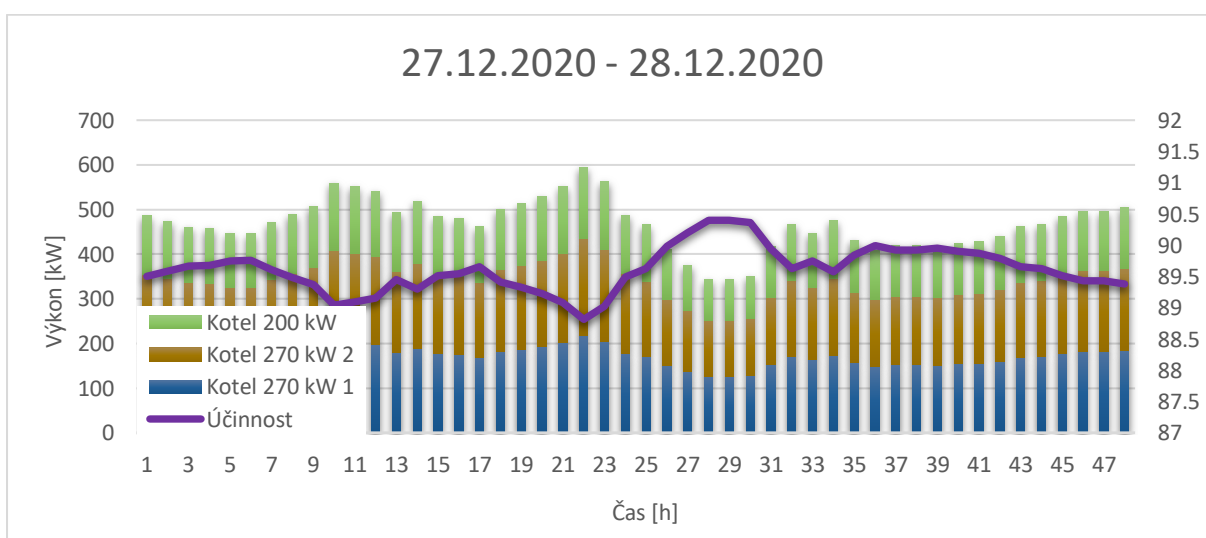
$$Q_{in270} = \frac{\rho \cdot c \cdot V_{k270} \cdot \Delta t_{is}}{3,6 \cdot 10^6} = \frac{997 \cdot 4180 \cdot 0,4 \cdot 10}{3,6 \cdot 10^6} = 4,63 \text{ kWh} \quad (17)$$

kde Q_{in270} [kWh] – hodinová ztráta tepla po odstavení kotle o výkonu 270 kW,

V_{k270} [m³] – objem vody ve výměníku tepla z technického listu kotlů 270 kW.

Zatížení zbylých kotlů by bylo 36,21 %. Takže hospodárnější bude nechat v provozu dva kotle s vyššími jmenovitými výkony, protože i střední účinnost η_s bude vyšší (90,214 % oproti 90,2 %), i ztráty prostupem při odstávce budou nižší.

6.6.2. Zimní období

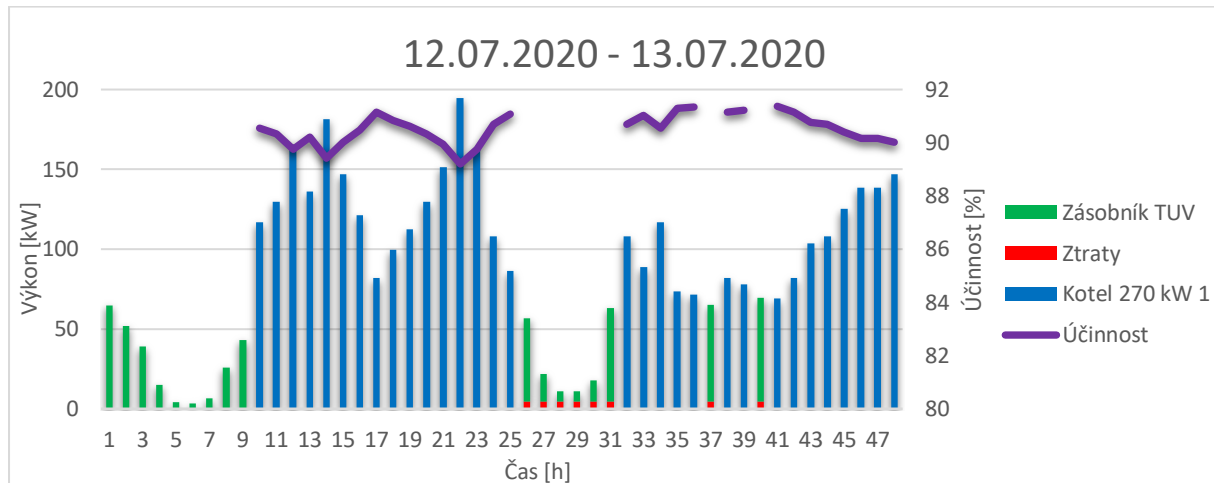


Graf 1 Zatížení kotlů 200–270 kW: provoz na stejný výkon. Zimní období

Provoz nízkoteplotních kotlů se v zimním období neliší od provozu kondenzačních kotlů, avšak účinnost η_s je nižší a rovná se 89,62 %.

6.6.3. Letním období

V poslední variantě se použije jeden kotel tak, aby běžel s minimálním možným zatížením. Je zvolen kotel s vyšším jmenovitým výkonem 270 kW.



Graf 28 Zatížení kotle 270 kW v letním období

Z výše uvedeného grafu je vidět, že kvůli většímu jmenovitému výkonu bude kotel odstaven od 1 do 9 hodin ráno v neděli, od 2 do 7 hodin a potom dvě hodiny odpoledne v pracovních dnech, kdy odběr teplé vody je menší. Střední účinnost η_s přitom je rovna 90,53 %.

7. Výsledné účinnosti provozů

Další vliv budou mít ztráty způsobené přerušovaným chodem kotlů. Výsledná účinnost se spočítá dle vztahu:

$$\eta_c = \eta_s \cdot \frac{Q_s}{Q_s + Q_z} \quad (18)$$

kde η_c [–] – celková účinnost s uvažováním ztrát při odstávkách,

η_s [–] – účinnost závislá na vytížení kotlů,

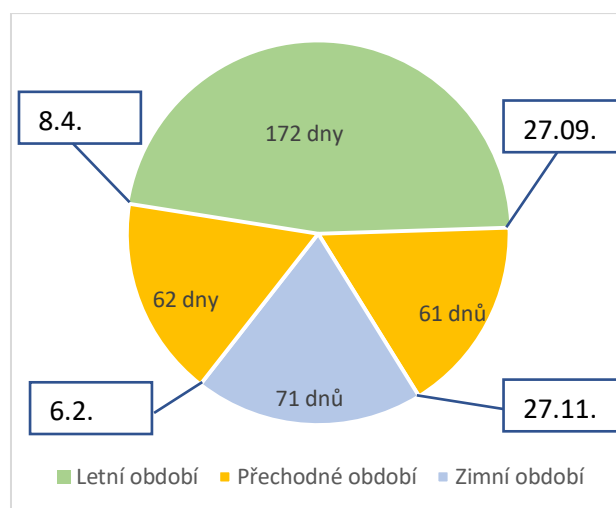
Q_s [Wh] – množství tepla dodávaného ve dvou vybraných dnech,

Q_z [Wh] – teplo ztracené kvůli přerušování provozu v těchto dnech.

Tabulka 3 Výsledné účinnosti navržených soustav v přechodném období

Varianta	1		2		3		4	
Perioda	15.03.2020 - 16.03.2020							
Způsob regulace	1	2	1	2	1	2	1	2
Q_s [kWh]	17707,5							
Q_z [kWh]	152,26	13,24	149,6	52,8	0		10,41	
η_s [%]	82,76	82,2	82,89	82,87	90,17		90,214	
η_c [%]	82,054	82,139	82,196	82,624	90,17		90,161	

Předpokládá se, že kaskády v navržených variantách budou pracovat se střední výslednou účinností v příslušných obdobích. V první polovině roku je definováno přechodné období od 7. 2. 2020 do 8. 4. 2020, ve druhém pololetí pak od 27. 9. 2020 do 27. 11. 2020. Tyto periody byly odhadnuty dle průběhu teplot z Graf 7, dodávka tepla byla zahájena, když střední venkovní teplota klesla pod 13 °C ve dvou předchozích dnech, ve skutečnosti se otopné období mohlo začít v jiné datum.



Graf 29 Rozdělení roku na jednotlivá období

Tabulka 4 Výsledné účinnosti navržených soustav v zimním období

Varianta	1		2		3		4	
Perioda	28.12.2020 - 29.12.2020							
Způsob regulace	1	2	1	2	1	2	1	2
Q_s [kWh]	22 446,90							
Q_z [kWh]	39,72	0	70,4	0	0		0	
η_s [%]	82,85	82,82	82,91	82,82	89,53		89,62	
η_c [%]	82,704	82,820	82,651	82,820	89,53		89,620	

Zimní období bylo v daném případě určeno ve dnech 1. 1. 2020–6. 2. 2020 a v době od 28. 11. 2020 do 31. 12. 2020. Letním obdobím je zbylá část roku od 9. 4. 2020 do 26. 9. 2020. Využití zásobníku TUV zohledňuje hodnota Q_{v2} , která je rovna množství tepla dodaného ze zásobníku během dvou zkoumaných dnů.

Tabulka 5 Výsledné účinnosti navržených soustav v zimním období

Varianta	1	2	3	4
Perioda	12.07.2020 - 13.07.2020			
P [kW]	4184			
Qz [kW]	44	79,44	0	37,04
ns [%]	82,42	81,84	91,87	90,53
n [%]	81,56	80,32	91,87	89,74

Při porovnání výsledných účinností jsem došel k závěru, že nebyly výrazně ovlivněny způsobem provozu. U automatických kotlů na pelety jsou rozdíly v řádu desetin procent. Kondenzační kotle mají účinnost nízkoteplotních kotlů, protože nebyla využita kondenzace. Jejich účinnost se liší od účinnosti velkoprostorových kotlů opět v řádu desetin procent. V letním období ve všech variantách kromě třetí byl provozován jeden kotel k zabezpečení objektu TUV. V hodinách minimálního odběru kotle byly odstaveny a dodávku uskutečňoval zásobník TUV. Čím vyšší má kotel náběhový výkon, tím více byl využit zásobník.

7.1. Využití instalovaného výkonu

Hodnota ročního využití instalovaného výkonu je poměr skutečně vyrobené tepelné energie za celý rok k výkonu zdroje a platí vzorec:

$$\tau_i = \frac{Q_i}{P_i} \quad (19)$$

kde τ [h] – doba využití instalovaného výkonu jednoho kotle,

Q_i [kWh] – množství tepelné energie vyrobené jednotlivým kotlem za celý rok,

P_i [kW] – jmenovitý výkon kotle.

Pro popsané varianty byly vypočteny následující veličiny:

Tabulka 6 Využití instalovaného výkonu jednotlivými kotly

i	varianta 1			varianta 2			varianta 3			varianta 4		
	Q	P	τ [h]	Q	P	τ [h]	Q	P	τ [h]	Q	P	τ [h]
1	1069920	150	7133	1535374	250	6141	930240	120	7752	1622109	270	6008
2	670361	150	4469	586885	250	2348	558720	120	4656	504434	270	1868
3	356175	150	2374	10319	250	41	440326	120	3669	5796	200	29
4	32523	150	217				187295	120	1561			
5	3600	150	24				12398	120	103			
6							2880	120	24			

Pro celý rok doba využití instalovaného výkonu je rovna

$$\tau = \frac{Q_c}{P_{max}} = \frac{2\,084\,553}{750} = 2\,779 \text{ [h]} \quad (20)$$

kde τ [h] – doba využití instalovaného výkonu soustavy,

Q_c [kWh] – množství tepelné energie vyrobené za celý rok z Tabulky 4,

P_{max} [kW] – jmenovitý výkon soustavy.

Obecně je výhodnější při vysoké hodnotě využitelnosti volit kvalitnější a dražší zdroj, protože jeho potenciál a výhody oproti levnějším alternativám budou využity po co nejdelší dobu během roku.

8. Výpočty zásobníků

V okolí kotelny se bude nacházet místo k uskladňování paliva dostatečného pro týdenní dodávku tepla v zimě, jednou za týden bude doplňováno. V blízkosti samotných kotlů uvnitř kotelny se bude nacházet menší místnost denního zásobníku. Ta bude doplňována častěji.

8.1. Stanovení celkové roční dodávky tepla

Množství potřebného tepla vychází ze vztahu (4), kde střední potřebný výkon je vztažen ke střední venkovní teplotě z Grafu 1, k němu se přidá výkon k ohřátí TUV, jenž je dán dle zadání, a výsledná hodnota je vynásobena časem 24 hodin za příslušný den. Výpočet se provede pro každý den zimního a přechodného období.

Tabulka 7 Množství potřebného tepla v různých obdobích

Období	Zimní	Přechodné	Letní	dohromady
Q_c [kWh]	725 251	987 782	371 520	2 084 553

8.2. Stanovení množství spotřebovaného paliva

Metody provozu a jeho účinnosti budou aplikovány na celá období, ve kterých byly zkoumány a následně použity k výpočtu roční spotřeby paliva každou z navržených variant.

$$Q_p = \frac{1}{\eta_c} \cdot Q_c \quad (21)$$

kde Q_p [kWh] – množství tepla dodané v palivu do kotlů,

Q_c [kWh] – celková spotřeba tepla,

η_c [–] – celková účinnost varianty.

$$m_b = \frac{Q_p}{H_b} \quad (22)$$

$$V_g = \frac{Q_p}{H_g} \quad (23)$$

kde m_b [kg], V_g [m³] – množství spotřebovaného plynu nebo pelet,

H_b [MJ · kg⁻¹], H_g [MJ · m⁻³] – výhřevnosti jednotlivých druhů paliv.

Tabulka 8 Množství paliva spotřebovaného za rok

Varianta	1		2		3		4	
Způsob regulace	1	2	1	2	1	2	1	2
Q_p [kWh]	2 536 258	2 533 793	2 541 784	2 533 765	2 165 509		2 318 823	
Q_p [MJ]	9 130 529	9 121 654	9 150 423	9 121 556	7 795 833		8 347 764	
m_p [kg]	543 484	542 956	544 668	542 950	-		-	
V_g [m ³]	-	-	-	-	205 262		219 794	

Tím pádem druhý provozní režim u automatických kotlů na pelety je úspornější vzhledem k palivu, ale rozdíly jsou zanedbatelné. Mezi plynovými kotli menší spotřebu mají kondenzační kotle, díky vysoké účinnosti i bez využití kondenzace.

8.3. Výpočet objemu týdenního zásobníku paliva

Výhřevnost biomasy je silně závislá na její vlhkosti, proto je lepší ji chránit v suchu, ideálně v hale nebo v podzemním skladu. Jeho objem je dán spotřebou paliva během sedmi zimních dnů. Pro návrh byl zvolen první týden roku. Množství tepla se vypočítá stejným způsobem jako potřebné teplo v různých obdobích, ale jen pro periodu od 1. 1. 2020 do 7. 1. 2020. Vybrané dny reprezentují typický zimní týden a palivo připravené pro tento týden by mělo stačit pro většinu týdnů v roce. Pokud spotřeba paliva mírně převyšuje spotřebu navrženou, následující objednávka pelet bude obsahovat jejich větší množství. Dovoz paliva je plánován jednou za 5 dní.

$$V_{tz} = \frac{3,6 \cdot Q_{7d}}{H_p \cdot \rho_p \cdot \eta} \cdot q_p \quad (24)$$

kde V_{tz} [m³] – navržený objem týdenního zásobníku na pelety,

Q_{7d} [kWh] – množství potřebné energie ve vybraném týdnu,

H_p [MJ · kg⁻¹] – výhřevnost pelet,

ρ_p [kg · m⁻³] – minimální hustota prostorového metru sypaných pelet,

η [–] – účinnost varianty,

q_p [–] – koeficient plnění prostoru (předpokládá se $q_p = 0,66$, což znamená, že prostor zásobníku bude vyplněn na 66 %).

Tabulka 9 Objemy týdenních zásobníků pelet

Varianta	1		2	
Způsob regulace	1	2	1	2
Q_{7d} [kWh]	78 632			
m [kg]	20 374	20 345	20 387	20 345
V_{tz} [m ³]	51,45	51,38	51,48	51,38

8.4. Výpočet objemu denního zásobníku paliva

Denní zásobník paliva bude určen k umístění dostatečného množství dřevních pelet pro zásobování objektu teplem během 24 hodin. Extrémní možnost, která může nastat, je provoz kaskády kotlů na maximální výkon 750 kW. Objem zásobníku se určuje dle známého vztahu:

$$V_{dz} = \frac{3,6 \cdot Q_d}{H_p \cdot \rho_p} \cdot q_p = \frac{3,6 \cdot P_{max} \cdot \tau_z}{H_p \cdot \rho_p \cdot \eta} \cdot q_p \quad (25)$$

kde V_{dz} [m⁻³] – navržený objem denního zásobníku na pelety,

Q_d [kWh] – množství potřebné energie za den teoretického provozu s maximálním výkonem kotlů,

P_{max} [kW] – maximální výkon kaskády,

τ_z [h] – počet pracovních hodin, pro který je navržen zásobník.

Tabulka 10 Objemy denních zásobníků pelet

Varianta	1		2	
Způsob regulace	1	2	1	2
Q [kWh]	18000			
m [kg]	4 664	4 657	4 667	4 657
V_{dz} [m ³]	11,78	11,76	11,78	11,76

Vypočítal jsem objemy týdenního a denního zásobníku. Rozdíly v objemech zásobníků pro varianty peletových kotlů jsou zanedbatelné a mohou být zaokrouhleny, potom $V_{tz} = 51$ [m³] a $V_{dz} = 12$ [m³].

8.5. Výpočet objemu zásobníku TUV

Objem zásobníku TUV je navržen tak, aby byl zásobník schopen zajistit dodávku potřebného množství ohřáté vody odběratelům v dobách odstávek všech kotlů v soustavě. Tyto okamžiky zpravidla nastávají v nočních hodinách letního období, kdy potřeba tepla klesá pod hodnotu minimálního výkonu provozovaného kotle. Z grafů letních provozů plyne, že

největší odběr ze zásobníku je v noci a v ranních hodinách v neděli. Zásobník v příslušné variantě bude dimenzován ke sdílení tepla během tohoto časového úseku.

V nádrži zásobníku je objem vody o teplotě 55 °C – V_{zw} , který může naakumulovat potřebné množství tepla. Výpočet se provede dle vztahu

$$V_{zw} \geq \frac{Q_v \cdot 3,6 \cdot 10^6}{\rho \cdot c \cdot (T_2 - T_1)} \quad (26)$$

kde V_{zw} [m^3] – objem vody v zásobníku,

Q_v [kWh] – teplo, které má být naakumulované ve vodě,

c [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$] – měrná tepelná kapacita vody,

ρ [$kg \cdot m^{-3}$] – hustota vody,

T_2 [$^{\circ}C$] – žádaná teplota vody na výstupu ze zásobníku,

T_1 [$^{\circ}C$] – teplota vody na vstupu do zásobníku.

Tabulka 11 Objemy zásobníků jednotlivých variant

Varianta	1	2	3	4
Q_v	94	189	14	254
V_{zw}	1,80	3,63	0,27	4,88

Objem V_{zw} potom závisí na vybraném zdroji, minimální velikost je 270 l u soustavy kondenzačních kotlů a maximální 4,88 m^3 u nízkoteplotního kotle ze čtvrté varianty.

9. Ekonomické porovnání

Výsledné ekonomické rozhodnutí se opírá o náklady. Ty jsou rozděleny na investiční a provozní. Investiční náročnost jednotlivých variant je definována cenami pořízení soustav. Rozdíl je dán různými cenami kotlů, příslušných jim zásobníků TUV a nutností postavit týdenní zásobníky biomasy v případě variant s peletovými kotly. Zásobník může být zajištěn v kontejnerovém provedení.

Tabulka 12 Pořizovací náklady jednotlivých soustav

	Biomasa 150 kW	Biomasa 250 kW	Kondenzační 120 kW	Nízkoteplotní 200 kW/270 kW
Cena kotle [Kč]	500 000	750 000	167 700	640 000/864 000
Cena týdenního zásobníku [Kč]	169 000	169 000	-	-
Cena zásobníku TUV [Kč]	102 000	205 000	15 000	276 000
Cena soustavy [Kč]	2 771 000	2 624 000	1 021 200	2 644 000

Provozní náklady se skládají z nákladů fixních, které nezávisí na množství dodávané energie, a z variabilních – závislých na množství spotřebovaného paliva. Mezi fixní patří náklady na servisní obsluhu a pronájem prostorů kotelny. Plynové kotle vyžadují servisní prohlídku jednou za rok. Kotle spalující biomasu kromě toho mají větší nároky na čištění, protože část prachu ve spalínách zůstává v systému, jímž spaliny procházejí. V dalším rozboru tyto náklady budou odhadnuty.

Vzhledem k tomu, že konstrukce peletových kotlů je složitější a skládá se z většího počtu mechanických částí jako pohyblivý rošt nebo šnekové dopravníky, mohou tyto kotle mít větší poruchovost. V důsledku toho položka jejich provozních nákladů může vzrůst o cenu náhradních dílů a oprav.

Mezi variabilní patří náklady na palivo. Pokud jsou známa množství spotřebovaného paliva m [kg], pelet a V_{tz} [m³] zemního plynu a jsou k dispozici ceny dostupných nabídek na trhu, je možné spočítat roční náklady na palivo vybraných variant. U zvoleného dodavatele cena pelet činí 8 300 Kč za tunu, doprava je zdarma od 4 tun. Týdenní zásobník je určen pro minimálně 20 tun pelet, proto se palivo bude dovážet dávkami většími než 4 tuny a doprava pelet je zdarma. Cena plynu od společnosti, která poskytuje zemní plyn velkoodběratelům, byla určena na přibližně **3 500 Kč** za MWh.

Pořizovací náklady budou odepisovány po dobu odhadnuté životnosti kotle, a tak tvoří položku ročního odpisu. Počítá se s životností 10 let.

Tabulka 13 Výsledné roční náklady na provoz soustav

	Varianta 1	Varianta 2	Varianta 3	Varianta 4
Roční spotřeba paliva	542 956 kg	542 950 kg	205 262 m ³	219 794 m ³
Množství produkovaného CO ₂	-	-	432,28 tun CO ₂	462,88 tun CO ₂
Roční náklady na palivo [Kč]	4 506 535	4 506 485	7 245 990	7 899 687
Servisní položka [Kč]	37 000	23 000	15 000	12 000
Roční odpis [Kč]	277 100	262 400	102 120	264 400
Suma [Kč]	4 820 635	4 791 885	7 363 110	8 174 087

Následné ekonomické porovnání obsahovalo porovnání nákladů na palivo a pořizovacích nákladů ve formě ročních odpisů. Byla také zohledněna množství ročních emisí CO₂. Celkové náklady na pořízení soustavy pěti kotlů 150 kW jsou o 5,6 % vyšší než na soustavu tří kotlů 250 kW. I když cena tří kotlů je nižší, vyžadují dvakrát větší objem zásobníku TUV, který samozřejmě bude dražší. Soustava velkoprostorových plynových kotlů má obdobnou pořizovací cenu jako soustava ve variantě 2, rozdíl činí 0,8 %. Výrazně se liší od ostatních cena soustavy kondenzačních kotlů, rozdíl je víc než dvojnásobný (157 %). Ovšem plyn v současné době je dražším palivem než biomasa a následkem toho silně vzrostly náklady na palivo. Tedy plynové kotle jsou provozně dražší o 54 % než kotle na biomasu při porovnání druhé a třetí

varianty a o 70 % v případě druhé a čtvrté varianty, protože používají výrazně dražší palivo, i když jejich investiční náklady mohou být nižší než u kotlů na biomasu.

Ve výpočtu se neuvažuje o časové hodnotě peněz a nepředvídatelné změně ceny paliva. Ve skutečnosti ceny na plyn a dřevní pelety rostou. Zvyšuje se i poptávka po biomase, což může způsobit její nedostatek na českém trhu. Za předpokladu rovnoměrného růstu cen na palivo a kotle, vyšší investice do zařízení s levnějším palivem může zajišťovat menší riziko výrazného zdražování tepla v budoucnosti.

10. Závěr

Ve své práci jsem ze znalosti maximální tepelné spotřeby určil měrnou ztrátu tepla objektem. Dle středních denních teplot jsem stanovil potřebný tepelný výkon.

Střední venkovní teploty v Praze během roku jsou vyšší než teplota, na niž je systém připraven, což znamená, že větší část roku má velkou výkonovou rezervu. Tedy výkon vyšší než 500 kW je potřeba dodávat jen 144 hodin za celý rok. Celkové množství dodaného tepla v roce 2020 činí 2 084 553 kWh. Abych zjistil množství spotřebovaného paliva pro dodávku takového množství tepla, modeloval jsem provoz v šesti typických dnech roku, kde jsem definoval celkový odběr tepla v určitém čase. Výkon pro vytápění byl přímo úměrný teplotě v konkrétní hodině. Výkon k výrobě TUV byl přímo úměrný hodinovému odběru vody určitým počtem odběratelů.

Zkoumal jsem dva způsoby provozu navržených kaskád kotlů a zjišťoval, jaké účinnosti jsou kotle schopny dosáhnout v daných podmínkách. Při porovnání výsledných účinností jsem došel k závěru, že nebyly výrazně ovlivněny způsobem provozu. U automatických kotlů na pelety se rozdíl pohybuje v řádu desetin procent. Kondenzační kotle mají účinnost nízkoteplotních kotlů, protože nebyla využita kondenzace. Jejich účinnost se liší od účinnosti velkoprostorových kotlů opět v řádu desetin procent. V letním období ve všech variantách kromě třetí byl provozován jeden kotel k zabezpečení objektu TUV. V hodinách minimálního odběru kotle byly odstaveny a dodávku uskutečňoval zásobník TUV. Čím vyšší měl kotel náběhový výkon, tím více byl využíván zásobník.

Na základě získaných účinností jsem vypočítal množství spotřebovaného paliva. Provozní režim, při kterém všechny kotle pracovaly se stejným výkonem, u automatických kotlů na pelety je úspornější vzhledem k palivu, ale rozdíly jsou téměř zanedbatelné. Mezi plynovými kotle menší spotřebu vykazují kondenzační kotle, díky poměrně vysoké účinnosti i bez využití kondenzace.

Vypočítal jsem objemy týdenního a denního zásobníku paliva pro varianty s peletovými kotle. Týdenní zásobník je dimenzován pro dodávku tepla během typického zimního týdne a denní pro dodávku tepla během jednoho dne, kdy kotle pracují s instalovaným výkonem. Rozdíly v objemech zásobníků pro varianty peletových kotlů jsou zanedbatelné a mohou být zaokrouhleny, potom $V_{tz} = 51 \text{ m}^3$ a $V_{dz} = 12 \text{ m}^3$.

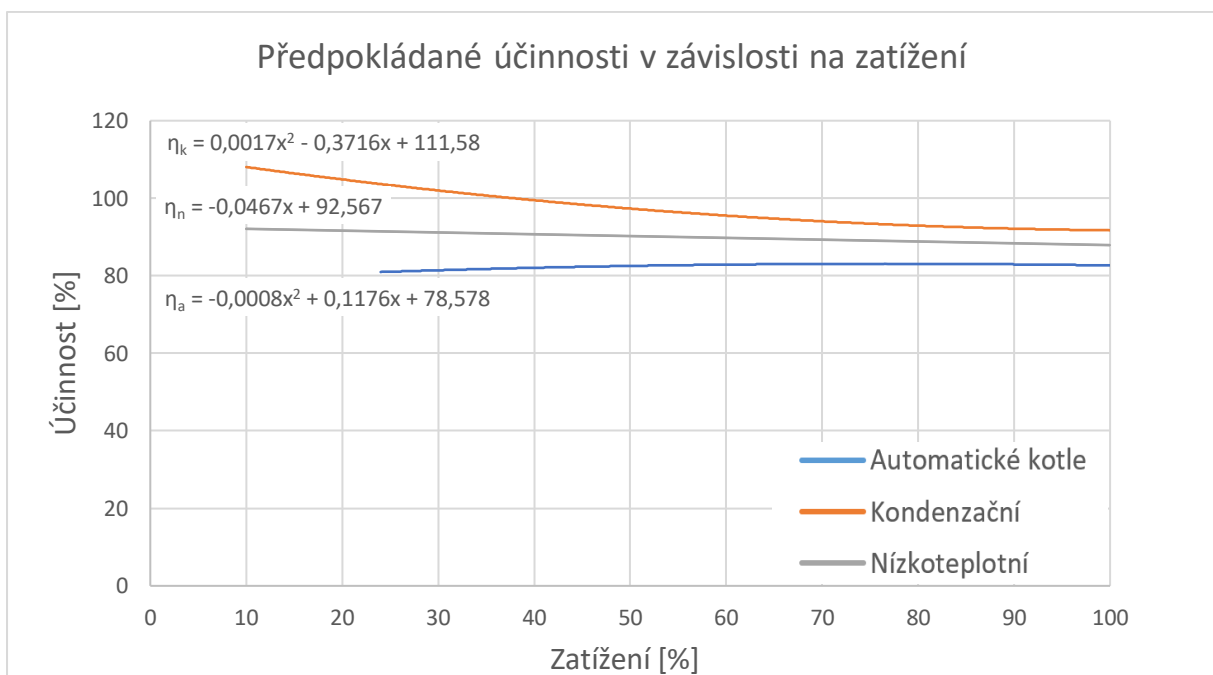
Určil jsem objem zásobníku TUV, který závisel na vybraném zdroji tepla. Minimální velikost byla stanovena 270 l u soustavy kondenzačních kotlů, 1,8 m³ pro kotle na biomasu

150 kW, 3,63 m³ pro kotel na biomasu 250 kW a maximální velikost 4,88 m³ u nízkoteplotního kotle ze čtvrté varianty.

Plynové kotle jsou provozně dražší, protože používají výrazně dražší palivo, i když jejich investiční náklady mohou být nižší než u kotlů na biomasu. Proto bych preferoval právě kotle na biomasu jako zdroj zásobování teplem. Mezi kotly na biomasu je hlavní rozdíl v servisních nákladech, které rostou s počtem kotlů. Po finálním ekonomickém hodnocení doporučuji druhou variantu s menším počtem kotlů, protože je nejvýhodnější z finančního hlediska.

11. Přílohy

11.1. Příloha 1



Seznam použitých zdrojů

- [1] VLACH, Josef. Zásobování teplem a teplotností. Praha: SNTL, 1989.
- [2] ALENA, HORÁKOVÁ. Klimatologické údaje [online]. Praha, 2013 [cit. 2022-05-26]. Dostupné z: https://www.mpo-efekt.cz/upload/7799f3fd595e1fa66875530f33e8a/EF13_3105_STU-E_Klimatologie.pdf
- [3] KRIPPELOVÁ, Zuzana a Jana PERÁČKOVÁ. Průběh spotřeby teplé vody v bytových domech [online]. 10.11.2014 [cit. 2022-05-26]. Dostupné z: <https://www.asb-portal.cz/stavebnictvi/technicka-zarizeni-budov/vytapeni/prubeh-spotreby-teple-vody-v-bytovych-domech>
- [4] Předpověď počasí [online]. [cit. 2022-05-26]. Dostupné z: https://world-weather.ru/pogoda/czech_republic/prague/
- [5] Vyplatí se topit peletami? dTest [online]. 27.02.2019 [cit. 2022-05-26]. Dostupné z: www.dtest.cz/clanek-7152/vyplati-se-topit-peletami
- [6] Виды и отличия топливных брикетов [online]. 16.03.2021 [cit. 2022-05-26]. Dostupné z: https://kuzmich24.ru/stat_i_sovety/vidy-i-otlichiya-toplivnyh-briketov/
- [7] STUPAVSKÝ, Vladimír. O vytápění biomasou od A až do Z [online]. 14.10.2020 [cit. 2022-05-26]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/vytapeni-peletami/8814-o-vytapeni-biomasou-od-a-az-do-z>
- [8] Nejlevnější způsob vytápění je štěpkou a dřevním odpadem v plně automatické kotli FRÖLING T4 [online]. 04.09.2015 [cit. 2022-05-26]. Dostupné z: <https://vytapeni.tzb-info.cz/kotle-kamna-krby/13158-nejlevnejsi-zpusob-vytapeni-je-stepkou-a-drevnim-odpadem-v-plne-automatickem-kotli-froling-t4>
- [9] BUDÍN, Jan. Zemní plyn - těžba, vlastnosti a rozdělení [online]. 12.04.2015 [cit. 2022-05-26]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/plynarenstvi/zemni-plyn-tezba-vlastnosti-a-rozdeleni>
- [10] HODBOŇ, Josef. Extralehký topný olej, topná nafta aktuálně jako vhodná náhrada za uhlí [online]. 08.06.2021 [cit. 2022-05-26]. Dostupné z: <https://vytapeni.tzb-info.cz/vytapime-kapalnymi-palivy/22375-extralehky-topny-olej-topna-nafta-aktualne-jako-vhodna-nahrada-za-uhli>
- [11] Cena dřevných pelet classic A1 [online]. [cit. 2022-05-26]. Dostupné z: <https://eshop.biomac.cz/drevene-pelety-classic-a1-bigbag-g8546.html>
- [12] Cena briket RUF [online]. [cit. 2022-05-26]. Dostupné z: <https://www.biomac.cz/drevene-brikety-ruf-hard-top/>
- [13] Cena palivového dřeva [online]. [cit. 2022-04-23]. Dostupné z: <https://www.topte-drevem.cz/cenik-palivove-drevo/>
- [14] Cena dřevní štěpky [online]. [cit. 2022-04-23]. Dostupné z: <http://www.pilamrazek.cz/cs/drevni-stepka/>
- [15] Cena topného oleje [online]. [cit. 2022-04-23]. Dostupné z: <https://www.silmetvytapeni.cz/dodavky-topneho-oleje>
- [16] Cena zemního plynu [online]. [cit. 2022-03-24]. Dostupné z: <https://www.kurzy.cz/plyn/>
- [17] Cena uhlí [online]. [cit. 2022-03-24]. Dostupné z: <https://uhli-zabreh.cz>

- [18] Paliva a energie [online]. [cit. 2021-11-03]. Dostupné z: <https://www.atmos.eu/paliva-a-energie/>
- [19] ČESKO. Zákon č. 201/2012 Sb., o ochraně ovzduší. In: Zákony pro lidi.cz [online]. © AION CS 2010-2022 [cit. 27. 5. 2022]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2012-201>
- [20] STRAKA, František. Alternativní energetické zdroje a měrné emise CO₂. Biom.cz [online]. 11.01.2010 [cit. 2022-05-26]. Dostupné z: <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/alternativni-energeticke-zdroje-a-merne-emise-co2>
- [21] BALÁŠ, Marek, Martin LISÝ a Jiří MOSKALÍK. Kotle – 2. část [online]. 02.04.2012 [cit. 2022-05-26]. Dostupné z: <https://vytapeni.tzb-info.cz/kotle-kamna-krby/8438-kotle-2-cast>
- [22] SMĚJA, Libor. Jak fungují mechanické části kotle Guntamatic Powerchip [online]. 05.03.2015 [cit. 2022-05-26]. Dostupné z: <https://www.avytapeni.cz/Article.aspx/Detail/266>
- [23] Řetězový rošt spalující biomasu [online]. [cit. 2022-05-26]. Dostupné z: <https://cz.xinyuelc.com/boiler-grate/chain-grate/biomass-fired-chain-grate.html>
- [24] SOCHA, David. Charakteristiky chování pevných biopaliv na pohyblivém roštu. Ostrava, 2015. Dostupné také z: <https://docplayer.cz/198532224-Charakteristiky-chovani-pevnych-biopaliv-na-pohyblivem-rostu-the-solid-biofuel-bed-characterization-for-a-travel-grate.html>. Diplomová práce. VŠB – TUO. Vedoucí práce Tadeáš Ochodek.
- [25] KORTELA, Jukka a Sirkka-Liisa JAMSA-JOUNELA. Modeling and model predictive control of the BioPower combined heat and power (CHP) plant. International Journal of Electrical Power & Energy Systems [online]. 2015(65) [cit. 2022-05-26]. ISSN 0142-0615. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/268079772_Modeling_and_model_predictive_control_of_the_BioPower_combined_heat_and_power_CHP_plant
- [26] Energie v hrsti. Teplovodní a horkovodní kotle. Výrobní program [online]. [cit. 2022-05-27]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/16132568-Energie-v-hrsti-teplovodni-a-horkovodni-kotle-vyrobní-program.html>
- [27] PEER, Václav a Pavel FRIEDEL. Zplyňování – principy a reaktory [online]. VŠB – TU Ostrava, 25.1.2016 [cit. 2022-05-27]. Dostupné z: <https://vytapeni.tzb-info.cz/vytapime-pevnymi-palivy/13729-zplynovani-principy-a-reaktory>
- [28] Biomasa. Energie z biomasy [online]. VŠB – TU Ostrava [cit. 2022-05-27]. Dostupné z: <https://vec.vsb.cz/export/sites/vec/.content/galerie-souboru/199-biomasa-1.pdf>
- [29] PŘÍHODA, Josef et al. Cereální chemie a technologie I: cereální chemie, mlýnská technologie, technologie výroby těstovin. Vyd. 1. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 2003. ISBN 9788070805305;8070805307
- [30] Látkové filtry [online]. [cit. 2022-05-27]. Dostupné z: <https://www.depuro.cz/latkove-filtry.html>
- [31] Tabulka hustoty a sypné hmotnosti [online]. [cit. 2022-05-27]. Dostupné z: <http://www.prvky.com/hustota.html>
- [32] CHROMÍK, Róbert a Štefan KLEIN. Stavební tabulky: porovnávací přehled výrobků ve stavebnictví na území České a Slovenské republiky. Brno: Art - Projekt, [2004]. ISBN 80-239-2938-0.
- [33] Český hydrometeorologický ústav. Denní data dle zákona 123/1998 Sb. [online]. [cit. 2022-05-27]. Dostupné z: <https://www.chmi.cz/historicka-data/pocasi/denni-data/Denni-data-dle-z-123-1998-Sb>

- [34] Smart Heating Technology s.r.o. Automatické kotle na biomasu SMART 150 kW [online]. [cit. 2022-05-27]. Dostupné z: <https://www.smartheating.cz/smart-150-kw/>
- [35] ESEL TECHNOLOGIES s.r.o. Kotel Guntamatic PRO FLEX [online]. [cit. 2022-05-27]. Dostupné z: <https://guntamatic.esel.cz/w/5794/kotel-guntamatic-pro-na-stepku-a-pelety-175-kw-1000-kw>
- [36] Vaillant. Závěsný kondenzační kotel VU ecoTEC plus (80 - 120 kW). [online]. [cit. 2022-05-27]. Dostupné z: <https://www.vaillant.cz/pro-zakazniky/produkty/zavesny-kondenzacni-kotel-vu-ecotec-plus-80-120-kw-10816.html>
- [37] Viessmann. Kotel Vitoplex 200 [online]. [cit. 2022-05-27]. Dostupné z: <https://www.viessmann.cz/cs/obytne-budovy/plynove-kotle/nizkoteplotni-plynove-kotle/vitoplex-200.html>
- [38] VAVŘIČKA, Roman. Energetické štítky zdrojů tepla a ohřivačů vody - 2. část. Topenářství instalace [online]. Topin Media, 01.07.2015, 2015(4) [cit. 2022-05-27]. Dostupné z: <https://www.topin.cz/clanky/energeticke-stitky-zdroju-tepla-a-ohrivacu-vody-2-cast-dokonceni-detail-3946>
- [39] MĚCHURA, Petr. Věčný problém vytápění – kde děláme nejčastější chyby a jak správně topit? TZB HAUSTECHNIK [online]. 18.09.2019, 2019(3) [cit. 2022-05-27]. Dostupné z: <https://www.asb-portal.cz/stavebnictvi/technicka-zarizeni-budov/vytapeni/vecny-problem-vytapeni-kde-delame-nejcastejsi-chyby-a-jak-spravne-topit>
- [40] DLOUHÝ, Tomáš. Spalování a kotle: Přednáška 7 [online]. [cit. 2022-06-01]. Dostupné z: <http://energetika.cvut.cz/wp-content/uploads/SK-pr6-2.pdf>
- [41] DLOUHÝ, Tomáš. Výměníky tepla a kotle: Přednáška 9 [online]. In: . [cit. 2022-06-03]. Dostupné z: <http://energetika.cvut.cz/wp-content/uploads/VTK-pr9-2.pdf>
- [42] Obnovitelné zdroje energie: Zplyňování a pyrolýza biomasy [online]. In: . [cit. 2022-06-03]. Dostupné z: https://moodle-vyuka.cvut.cz/pluginfile.php/489238/mod_resource/content/1/OZE%20p9_zm.pdf