



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

**EMISE STŘEDOTLAKÝCH PARNÍCH KOTLŮ NA PLYNNÉ
PALIVO**

EMISSIONS OF MEDIUM PRESSURE STEAM BOILERS FOR GASEOUS FUEL

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jan Zavadil

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Ladislav Šnajdárek

BRNO 2018

Zadání bakalářské práce

Ústav: Energetický ústav
Student: **Jan Zavadil**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Energetika, procesy a životní prostředí
Vedoucí práce: **Ing. Ladislav Šnajdárek**
Akademický rok: 2017/18

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

Emise středotlakých parních kotlů na plynné palivo

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Hlavní náplní práce je provedení posouzení emisí středotlakých parních kotlů při dlouhodobém provozu. Zhodnocení těchto emisí z hlediska dopadu na životní prostředí a jejich provozním měřením z hlediska platné legislativy a provozních předpisů.

Cíle bakalářské práce:

- Popis středotlakých parních kotlů na plynné palivo
- Popis emisí z těchto zařízení a vliv na životní prostředí
- Zhodnocení měřených emisí z reálného zařízení

Seznam doporučené literatury:

KAMEŠ, J. Fosilní paliva: uhlí, ropa a zemní plyn. Praha: [s.n.], 2012. ISBN 978-80-260-1291-7.

ČERNÝ, V., B. JANEBA a J. TEYSLER, J. Pamí kotle. 1. vyd. Praha: SNTL, 1983, 858 s.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Cílem této bakalářské práce je popis středotlakého parního kotle na plynné palivo a emisí vznikajících při spalování zemního plynu, a následné zhodnocení naměřených znečišťujících látek při pětiletém provozu. První část práce popisuje rozdělení parních kotlů a důležitých součástí kotle. Dále je stručně pojednáváno o hořácích na plynné a kapalné palivo. Následně práce pojednává o znečišťujících látkách vznikajících při spalování zemního plynu a jejich vlivu na životní prostředí. Experimentální část se zaměřuje na měření emisí na reálném zařízení a posouzení znečišťujících látek při dlouhodobém provozu.

Klíčová slova

Parní kotel, hořák, zemní plyn, znečištění ovzduší

ABSTRACT

The aim of this the Bachelor Thesis is a description of a medium steam boiler for gas fuels, fuel's emissions created during the burning process of natural gas and following evaluation of measured pollutants in 5 years of operation. First part of the thesis describes types of steam boilers and most important parts of it. Following a brief comparison of burners for gas and liquid fuels and pollutants created during the burning process of natural gas and their impact on the environment. The last part focuses on measurements of pollutants in real device and a review of produced pollutants created during the long-term operation.

Key words

Steam boiler, burner, natural gas, air pollution

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ZAVADIL, J. *Emise středotlakých parních kotlů na plynné palivo*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 69 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Ladislav Šnajdárek.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Emise středotlakých parních kotlů na plynné palivo** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

.....
Datum

Jan Zavadil

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Ladislavu Šnajdárkovi, za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování závěrečné práce. Dále bych rád poděkoval firmě PLEAS a.s., za možnost účasti na měření emisí a poskytnutí firemních dokumentů.

podpis

OBSAH

Úvod	10
1 Rozdělení parních kotlů.....	11
1.1 Základní parametry kotlů	12
1.2 Dělení kotlů podle ČSN	12
1.3 Rozdělení podle použitého paliva	14
1.4 Kotle na tuhá paliva	20
1.5 Kotle na kapalná a plynná paliva	20
1.6 Výměňiková část kotle.....	23
1.7 Kotle s relativně velkým obsahem vody (velkoprostorové)	25
1.8 Kotle s relativně malým obsahem vody (vodotrubnaté)	28
2 Kotel BOSH.....	31
2.1 Popis středotlakého parního kotle	31
3 Hořáky	34
3.1 Hořáky na kapalná paliva.....	34
3.2 Hořáky spalující plynná paliva	35
4 Hořák TEMINOX GLS 95–30a	38
4.1 Popis hořáku TEMINOX	40
5 Znečišťování ovzduší	41
5.1 Oxid uhelnatý.....	41
5.2 Oxidy dusíku	42
6 Experimentální část	46
6.1 Popis objektu.....	46
6.2 Účel měření	48
6.3 Charakteristika použitých metod měření	49
6.4 Popis průběhu autorizovaného měření	50
6.5 Popis odběrových míst	54
6.6 Shrnutí výsledků za 5 let.....	55
6.7 Porovnání měření z roku 2015 a 2018	57
Závěr.....	62
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	63
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	66
SEZNAM OBRÁZKŮ	68
SEZNAM TABULEK	69

Úvod

Téma této práce jsem si vybral především proto, že mi není lhostejné životní prostředí, ekologie a zajímají mě plynné znečišťující látky. Díky souhře náhod jsem měl možnost zúčastnit se měření emisních látek ve firmě PLEAS a.s., která má 145-letou tradici na trhu a je největším producentem emisí v okrese Havlíčkův Brod.

V současné době roste poptávka po výrobě elektrické energie a tepla, jejichž hlavním zdrojem je spalování nejrůznějších paliv. Nežádoucím produktem spalování jsou znečišťující látky, které svými vlastnostmi nepříznivě ovlivňují životní prostředí, tj. globální oteplování, acidifikace vodních toků a zvyšují obsah jedovatých látek v půdě a v potravě. Pro výrobu elektřiny, tepla, páry anebo likvidace odpadů je nezbytný proces spalování a musí se věnovat zvýšená pozornost nežádoucím látkám vznikajících při tomto procesu.

Ochrana, kvalita a znečišťování životního ovzduší je v současné době velmi diskutované téma, které bylo v minulosti často přehlíženo. Nejrůznější lidské činnosti ovlivňují jak kvalitativně, tak kvantitativně životní prostředí a mají významný dopad na přírodu.

Česká republika se na dlouhou dobu zařadila mezi jedny z největších znečišťovatelů na světě. V 70. letech 20. století byla třetím největším znečišťovatelem v produkci oxidu siřičitého. V letech 1990 až 2011 došlo k rozsáhlému odsiřování elektráren a k rozvoji automatizované sítě sledování kvality ovzduší, jež měla za následek snížení oxidu siřičitého a oxidu dusíku.

V roce 2015 se uskutečnila v Paříži Konference OSN o klimatické změně. Konference měla za cíl celosvětové dohody o snižování dopadů klimatických změn. Dohoda byla přijata téměř všemi státy světa. V současné době jsou v ČR emise látek přísně sledovány Ministerstvem životního prostředí České republiky a jejich emisní limity jsou omezeny platnou legislativou.

Cílem této práce je provedení posouzení emisí středotlakého parního kotle při dlouhodobém provozu, následné zhodnocení těchto emisí z hlediska dopadu na životní prostředí, a jejich provozní měření z hlediska platné legislativy a provozních předpisů. Mezi další cíle této práce patří popis středotlakých parních kotlů na plynné palivo, popis emisí vznikajících při spalování plyných paliv a jejich vliv na životní prostředí a následné zhodnocení měřených emisí z reálného zařízení.

Hlavní motivací při tvorbě této práce bylo zjistit, zda popisovaný kotel v této studii vyhovuje emisním limitům, zda splní limity i při zpřísnění limitů, které s sebou přinesla nová Vyhláška č. 452/2017 Sb., a bude je moci plnit i v budoucnosti.

1 Rozdělení parních kotlů

Parní kotle jsou zařízení pro výrobu páry, první kotel byl sestaven v roce 1875 a jednalo se o kotel vodotrubný. V této době jsme schopni vyrábět kotle různých výkonů, které jsou potřebné pro specifické účely, spalující široké spektrum paliv a zároveň jsou šetrné k životnímu prostředí. V současné době se výrobci kotlů snaží orientovat na spalování zemního plynu, protože je to palivo dostupné, ekologické a vysoce výhřevné.

Rozdělení parních kotlů je následující [1, 2, 5]:

Podle aplikace:

- Kotle teplárenské (slouží k výrobě páry pro turbínu tak i pro vytápění),
- Kotle elektrárenské (slouží k výrobě páry pro turbínu),
- Kotle průmyslové,
- Kotle spalovenské (spalovny odpadů),
- Kotle na odpadní teplo (spalinové kotle),
- Kotle pro vytápění (slouží k ohřevu vody),
- Kotle pro dopravní prostředky (lodní, lokomotivní).

Podle ČSN dělíme kotle na:

- Teplovodní a nízkotlaké kotle (ČSN 07 0240),
- Horkovodní kotle (ČSN 07 0021),
- Parní kotle (ČSN 07 0020).

Podle použitého paliva:

- Kotle na tuhá paliva (fosilní paliva a tuhé odpady),
- Kotle na kapalná paliva (TO, LTO, ELTO a kapalné odpady),
- Kotle na plynná paliva (zemní plyn, plynné odpady, uměle vyrobené plyny).

Podle spalování tuhých paliv se kotle dělí na:

- Roštové,
- Práškové,
- Fluidní.

Kotle s relativně velkým obsahem vody:

- Kotle válcové,
- Kotle plamencové,
- Kotle žárotrubné,
- Kotle plamenco-žárotrubné.

Kotle s relativně malým obsahem vody:

- Kotle s přirozeným oběhem vody,
- Kotle s nuceným oběhem vody,
- Kotle průtočné.

Podle přetlaku páry:

- Nízkotlaké (do 0,07 MPa),
- Středotlaké (od 0,07 do 6,4 MPa),
- Vysokotlaké (od 6,4 MPa do 22,5 MPa),
- S nadkritickým tlakem páry (nad 22,5 MPa).

Podle způsobu zatížení:

- Kotle špičkové,
- Kotle pološpičkové,
- Kotle základní.

1.1 Základní parametry kotlů

Parní kotel je charakterizován souborem těchto údajů [1]:

- Jmenovitý výkon – je hmotnostní tok vyrobené páry na výstupu z kotle, kterého musí kotel dosáhnout v trvalém provozu při dodržení jmenovitých hodnot základních parametrů, tj. tlaku a teploty páry a napájecí vody při spalování projektovaného paliva,
- Jmenovitý tlak,
- Jmenovitá teplota páry (přehřáté i přihráté),
- Jmenovitá teplota napájecí vody,
- Druh a vlastnosti paliva,
- Způsob a proudění vody v kotli.

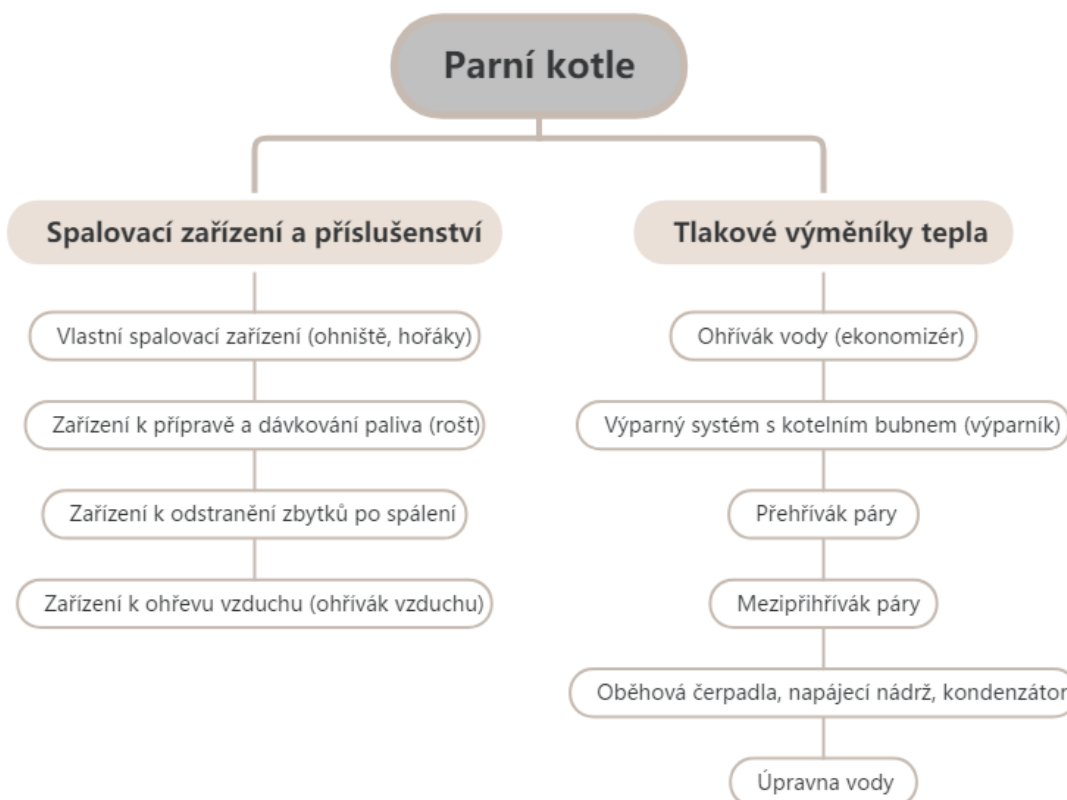
Norma ČSN 07 00 10 doporučuje základní parametry, názvosloví kotlů a výkony pro parní kotle. Norma mimo jiné stanoví požadavky na vlastnosti vyrobené páry, kondenzátu, přídavné vody a vody pro vstřikovou regulaci teploty přehřáté páry.

1.2 Dělení kotlů podle ČSN

1.2.1 Parní kotel

Parní kotel je zařízení, které slouží k výrobě páry z pracovního tepla, resp. k ohřevu jiného média pomocí tepla, které se získává především ze spalování látky, u které dochází díky chemické reakci k uvolnění tepla. Mezi hlavní přeměny ve spalovacích zařízeních patří transformace chemické energie paliva na tepelnou energii spalin. Poté dochází k přenosu spalin do pracovního média (pára, voda). Výsledkem je teplá voda (do 115 °C), dále horká voda (nad 115 °C, nad 0,07 MPa, o požadovaném tlaku) a pára (sytá nebo přehřátá) [1, 2].

Parní kotle se obecně člení na dvě části [1, 2, 5]:



Obr. 1 Graf rozdělení parních kotlů [vlastí tvorba]

Parní kotle se dále skládají z armatur, jenž propojují tlakové a spalovací části kotle. Součástí kotlů jsou také přístroje pro měření a zabezpečení proti přetlaku, napájení, měření tlaku, průtokoměry, plynoměry, termočlánky a další příslušenství kotle, které zajišťuje plynulý chod a bezpečnost provozu kotle.

1.2.2 Teplovodní a nízkotlaké kotle

Teplovodní kotle mají omezenou teplotu na výstupu z kotle podle ČSN 07 0240 na teplotu 115 °C. Využívají se jako vytopenské kotle v soustavách centralizovaného zásobování teplem a jako topné centrály pro komunální účely. Napájecí voda by neměla klesnout pod 70 °C. V případě poklesu pod tuto hodnotu, může dojít ke vzniku nízkoteplotní koroze (podkročení rosného bodu spalin, následná kondenzace a vznik koroze na straně spalin, snížení životnosti teplosměnných ploch kotle) [5].

Nízkotlaký kotel je určen k výrobě vodní páry s pracovním přetlakem nejvýše 70 kPa a tepelnou energií získává spalováním pevného, kapalného nebo plynného paliva.

Teplovodní kotle mívají nízké výkony a využívají se pro vytápění budov, vyplňování špiček aj.

Dělení teplovodních kotlů [5]:

- Do tepelného výkonu 50 kW,
- Nad tepelný výkon 50 kW.

Z hlediska odvodu spalín, rozeznáváme teplovodní kotle:

- Kotle s přirozeným tahem,
- Kotle s nuceným odvodem spalín.

1.2.3 Horkovodní kotle

Podle ČSN 07 0021 mají horkovodní kotle minimální teplotu vody na výstupu z kotle 110 °C. Uvedený kotel o jmenovitém výkonu od 1 MW do 12 MW se řeší jako velkoprostorové plamencové žárotrubné nebo dvoububnové kotle s přirozeným oběhem. Využívají se například do velkých výtopen a tepláren (např. kotel 58 H ČKD). Kotle se jmenovitým výkonem od 12 MW do 120 MW se řeší jako průtočné kotle s membránovými stěnami [5].

1.3 Rozdělení podle použitého paliva

Palivo je základní surovinou pro výrobu energie, jenž získáme zahřátím látky na zápalnou teplotu a při dostatečném přívodu okysličovadla látka hoří (dochází ke spalování) a uvolňuje přitom tepelnou energii. energii můžeme získat také chemickou nebo jadernou reakcí [1, 6].

Podle skupenství jsou paliva rozdělena na:

- Tuhá,
- Kapalná,
- Plynná.

Rozdělení paliv podle původu vzniku [1]:

- Fosilní paliva – jedná se o nerostné suroviny, záměrně těžené a nelze je obnovit (uhlí, rašelina, ropa a zemní plyn),
- Obnovitelná (biomasa, biopaliva).

Podle původu se paliva dělí na záměrně těžená, taktéž označována jako primární paliva, a odpady neboli sekundární paliva [1].

1.3.1 Tuhá paliva

Jedná se o palivo v pevném skupenství, základním tuhým palivem je uhlí (černé, hnědé). Následnou úpravou paliva nejčastěji uhlí, získáme koks a brikety. Do tuhých paliv můžeme zařadit také biomasu a odpadní paliva.

Složení tuhých paliv se určuje [2]:

- Hrubým rozbořem – při němž se stanoví poměrné obsahy vody (W^r), popeloviny (A^r) a hořlaviny (h) které jsou obsaženy v palivu. Index r značí, že se jedná o hmotnostní obsahy v surovém palivu.

Platí:

$$h + A^r + W^r = 100 \% \quad (1)$$

- Elementárním obsahem hořlaviny, v němž se navíc ještě určují poměrné obsahy prvků hořlaviny.

1.3.2 Kapalná paliva

Nejužívanějšími kapalnými palivy jsou různé druhy topného oleje (lehké, extra lehké, těžké oleje, kapalné odpady ropného původu, dehtové odpady a mazut), které vznikají destilací ropy při určitých bodech varu. Ropa obsahuje tisíce organických sloučenin různé struktury, avšak převládající skupinou jsou uhlovodíky (až 86 % hm.), jež mj. obsahují příměsi organických sloučenin kyslíku, síry, dusíku a minerálních látek. Složení ropy je kolísavé. Na světě je otevřeno mnoho set ropných ložisek a výtěžky z produktů při zpracování se liší od různých ložisek. Složení se liší vzájemným poměrem jednotlivých strukturních skupin a jednotlivých strukturních tříd [3].

1.3.3 Plynná paliva

Plynná paliva jsou látky v plynném skupenství a můžeme je definovat jako každý plyn, který obsahuje hořlavou složku, např. (CO – oxid uhelnatý, H_2 – vodík, C_xH_y – uhlovodíky, H_2S – hydrogensulfid a jiné). Mohou být uměle vyrobená, přírodního původu nebo vznikají jako odpadní produkt při technologických procesech. Základní rozdělení plynných paliv bývá podle spalného tepla [1, 32].

Norma „ČSN 38 5502 – Plynná paliva,“ rozděluje plynná paliva do skupin:

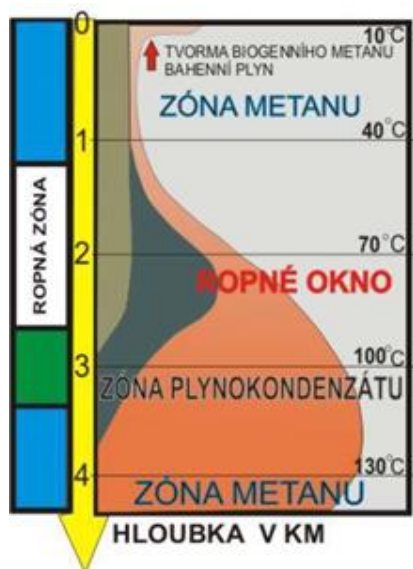
- Plynná paliva s nižším spalným teplem než $16,8 \text{ MJ}/m_N^3$ (málo výhřevné plyny, např. generátorový a vysokopecní plyn),
- Plynná paliva se spalným teplem v rozmezí od $16,8$ do $20 \text{ MJ}/m_N^3$ (středně výhřevná paliva, např. koksárenský plyn),
- Plynná paliva se spalným teplem v rozmezí od 20 do $50 \text{ MJ}/m_N^3$ (velmi výhřevné plyny, např. zemní plyn, bioplyn aj.),
- Plynná paliva se spalným teplem, které je vyšší než $50 \text{ MJ}/m_N^3$ (velmi vysoce výhřevné plyny, např. propan-butan aj.).

Mezi nejužívanější plynná paliva patří [1, 10, 32]:

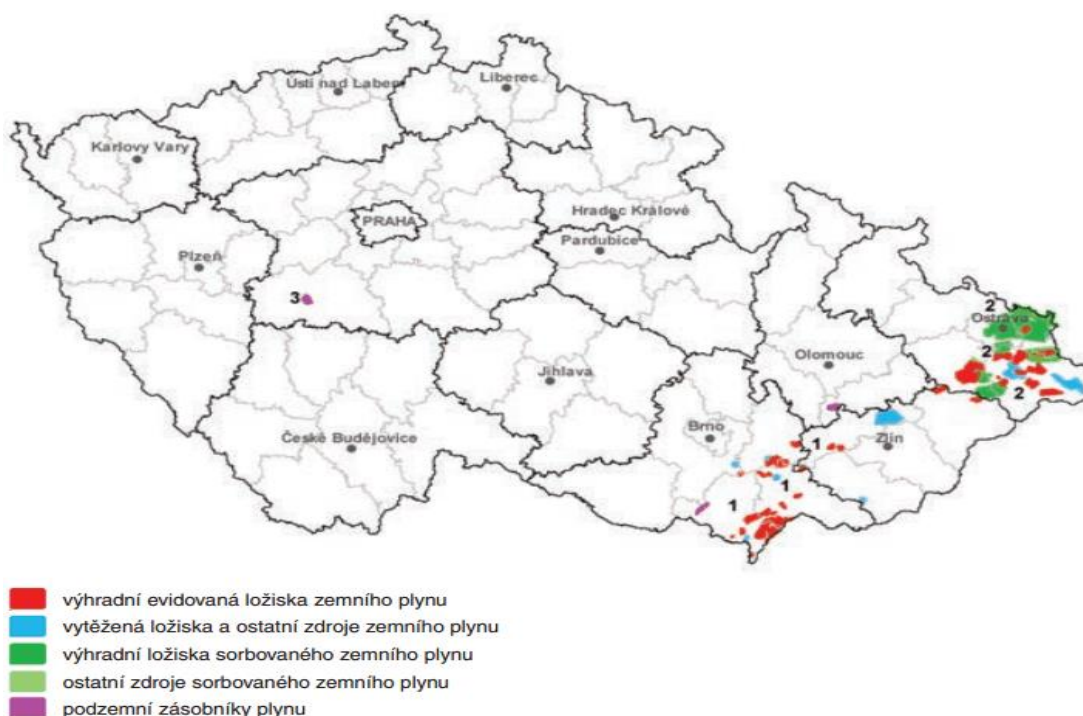
Zemní plyn: bezbarvý, nezapáchající hořlavý plyn s vysokým obsahem metanu (CH_4) a dalších plynných uhlovodíků, které jsou doprovázeny proměnlivým množstvím neuhlovodných prvků. Zemní plyn se vyskytuje v nalezištích společně s ropou a řadí se mezi fosilní paliva. Rozeznáváme dva druhy: naftový a karbonský. Naftový zemní plyn se vyskytuje společně s ropou, zatímco karbonský zemní plyn se nalézá společně v uhelných ložiscích

O vzniku zemního plynu existuje spousta teorií. Zemní plyn karbonský vzniká po mnoho milionů let rozkladem organických látek, především odumřelých rostlin a těl, za vysokého tlaku a absence vzduchu. Ve větších hloubkách pod povrchem je méně ropy, ale zato více zemního plynu, (viz Obr. 2).

K těžbě zemního plynu dochází pomocí hloubkových vrtů, které jsou vedeny do pórovitých ložisek. Hloubka vrtu bývá od 3 do 8 km pod povrchem země. Ložiska se vyznačují ohraničenými nepropustnými vrstvami a vodou. V České republice jsou evidovány desítky ložisek se zemním plynem. Nejvyužívanější je oblast vídeňské pánve a karpatské předhlubně. Místa těžby jsou znázorněna na mapě České republiky (viz Obr. 3).



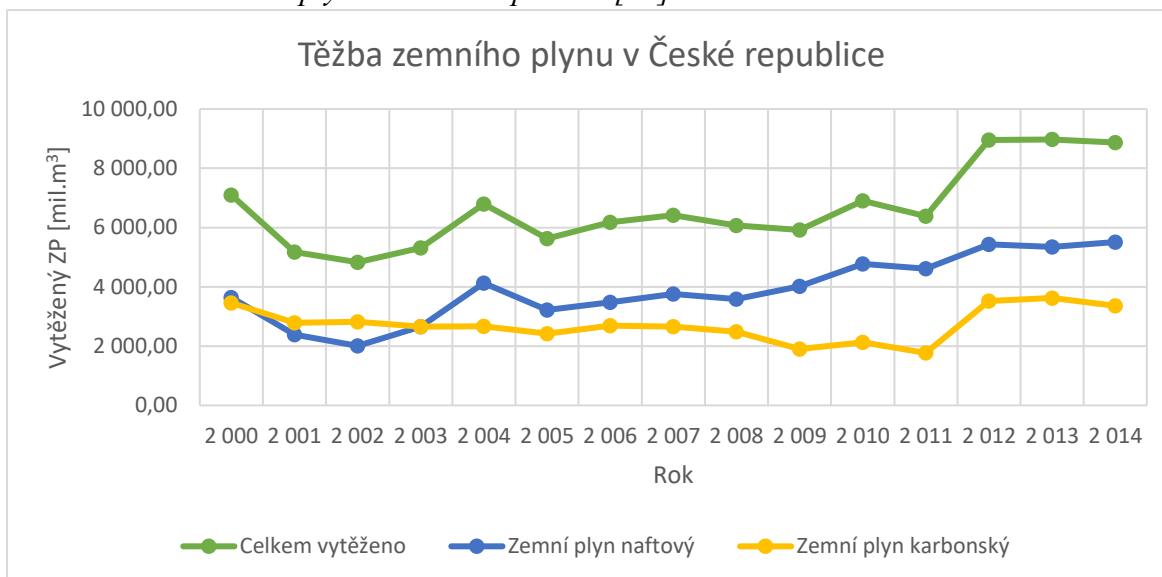
Obr. 2 Tvorba uhlovodíku [16]



Obr. 3 Těžba zemního plynu v České republice [17]

1. Oblast jižní Moravy, 2. Oblast severní Moravy, 3. Podzemní zásobník plynu Příbram

Tab.1 Těžba zemního plynu v České republice [11]



V Tab. 1 můžeme vidět trend těžby zemního plynu. Podle prognóz má dojít ke snížení těžby [4, 12].

Zemní plyn můžeme rozdělit podle výhřevnosti na dvě skupiny [11]:

- Zemní plyn H (vysoký) – plyn, jehož spalné teplo Q_s^0 za normálních podmínek odpovídá rozmezí od 40 do 46 MJ/ m_N^3 . Procentuální zastoupení nehořlavých složek je nižší než 5 %. Normální podmínky odpovídají tlaku 101,325 kPa a teplotě 0 °C.
- Zemní plyn L (nízký) – plyn, jehož spalné teplo Q_s^0 za normálních podmínek odpovídá rozmezí od 33 do 38 MJ/ m_N^3 , procentuální zastoupení nehořlavých složek je vyšší než 10 %. Normální podmínky odpovídají tlaku 101,325 kPa a teplotě 0 °C.

Spalné teplo a výhřevnost plynného paliva jsou znázorněny v tab. 2, pro používané typy zemního plynu v Evropské unii a České republice.

Spalné teplo – je množství tepla uvolněného úplným spálením 1 m^3 paliva při tlaku 101,325 kPa v adiabatických podmínkách za předpokladu, že spaliny se ochladí na teplotu výchozích látek a vodní pára obsažená ve spalinách je v kapalném stavu [1, 11].

Spalné teplo vychází ze složení zemního plynu a určí se vztahem (2). Graf. 1 porovnává různé druhy zemních plynů. Pokud porovnáme spalná tepla Českého a Alžírského zemního plynu, dojdeme k závěru, že Jihomoravský zemní plyn má nižší spalné teplo, a to o 10,9 % oproti zemnímu plynu Alžírského typu (porovnání s Alžírským plynem bylo záměrné, neboť má největší hodnoty spalného tepla a výhřevnosti).

$$Q_{sN}^0 = \frac{\sum Q_{si}^0 \cdot r_i}{100} \quad [\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3}], [\text{kWh} \cdot \text{m}^{-3}], (0^\circ \text{C}, 101,325 \text{ kPa}) \quad (2)$$

Q_{si}^0 – spalné teplo jednotlivých složek zemního plynu, které jsou v tab. 1.

r_i – procentuální objemové zastoupení jednotlivých složek zemního plynu, hodnoty nalezneme v tab. 1.

Přepočet spalného tepla v jednotkách $\text{kJ}\cdot\text{m}^{-3}$ na jednotky $\text{kWh}\cdot\text{m}^{-3}$ se stanoví dělením spalného tepla hodnotou 3600.

$$Q_{siN}^0(\text{kWh}\cdot\text{m}^{-3}) = \frac{Q_{si}^0(\text{kJ}\cdot\text{m}^{-3})}{3600} \quad (0^\circ\text{C}, 101,325 \text{ kPa}) \quad (3)$$

Výhřevnost Q_{iN}^0 – je množství tepla uvolněného úplným spálením 1 m^3 paliva při tlaku 101,325 kPa v adiabatických podmínkách za předpokladu, že spaliny se ochladí na teplotu výchozích látek a vodní pára obsažená ve spalínách je v plynném stavu [1, 11].

Výhřevnost se stanoví stejným způsobem jako spalné teplo. Vzorce jsou k dispozici [10]. Při porovnání výhřevností jednotlivých druhů zemního plynu, především Jihomoravského a Alžírského zemního plynu lze říci, že Alžírský plyn je o 12 % výhřevnější než zemní plyn českého původu. Porovnání je zobrazeno v Obr. 4.

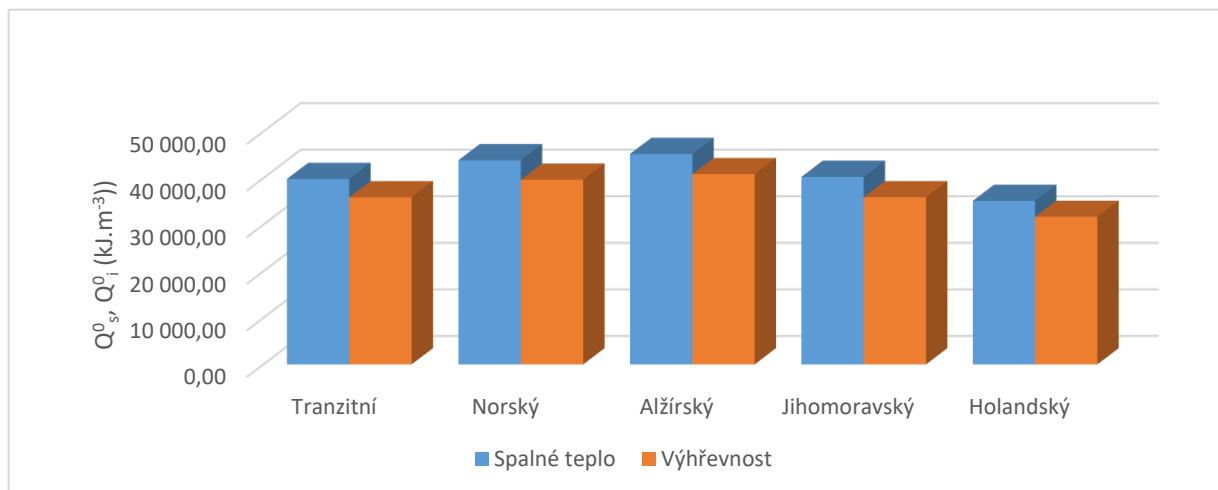
V tab. 2, jsou znázorněné vlastnosti zemního plynu za normálních podmínek (0°C , 101,325 kPa).

Tab.2 Složení zemního plynu, používaných v zemi EU a České republiky, hodnoty výhřevnosti a spalného tepla pro jednotlivé složky zemního plynu [11]

Složky ZP	Tranzitní r_i (%)	Norský r_i (%)	Alžírský r_i (%)	Jihomoravský r_i (%)	Holandský r_i (%)	Spalné teplo Q_s^0	Výhřevnost Q_i^0
Metan CH_4	98,39	85,8	86,9	97,7	81,31	39 819	35 883
Etan C_2H_6	0,44	8,49	9	1,2	2,85	70 293	64 345
Propan C_3H_8	0,16	2,3	2,6	0,5	0,37	101 242	93 25
Butan C_4H_{10}	0,07	0,7	1,2	-	0,14	134 061	123 810
Pentan C_5H_{12}	0,03	0,25	-	-	0,09	169 190	156 560
Dusík N_2	0,84	0,96	0,3	0,6	14,35	-	-
Oxid uhličitý CO_2	0,07	1,5	-	-	0,89	-	-

Tab.3 Hodnoty spalného tepla a výhřevnosti Tranzitního, Norského, Alžírského, Jihomoravského a Holandského zemního plynu za normálních podmínek, dopočítáno ze vztahů pro spalné teplo a výhřevnost [vlastní tvorba]

Zemní plyn	Spalné teplo Q_s^0		Výhřevnost Q_i^0	
	$\text{kJ}\cdot\text{m}^{-3}$	$\text{kWh}\cdot\text{m}^{-3}$	$\text{kJ}\cdot\text{m}^{-3}$	$\text{kWh}\cdot\text{m}^{-3}$
Tranzitní	39 793,79	11,05	35 869,72	9,96
Norský	43 822,55	12,17	39 653,00	11,01
Alžírský	45 170,11	12,55	40 840,00	11,34
Jihomoravský	40 252,89	11,18	35 876,46	9,97
Holandský	35 094,73	9,75	35 094,73	9,75



Obr. 4 Graf závislost spalných tepel a výhřevnosti na ZP používaným v EU a České republice [vlastní tvorba]

Tab.4 Vlastnosti zemního plynu používaného v zemích EU [11]

	Tranzitní ZP	Norský ZP	Alžírský ZP	Holandský ZP	Jednotky
Hustota zemních plynů	0,73	0,846	0,834	0,833	Kg.m ⁻³
Měrná tepelná kapacita	1,586	1,643	-	1,561	kJ.m ⁻³ .K ⁻¹
Tepelná vodivost	30,5	27,7	-	29,1	10 ³ .J.m ⁻¹ .s ⁻¹ .K ⁻¹
Dynamická viskozita	10,54	10,38	-	11,16	10 ⁶ .kg.m ⁻¹ .s ⁻¹

V následující tabulce jsou uvedeny fyzikální charakteristiky zemního plynu.

Tab.5 Fyzikální charakteristiky zemního plynu [4]

Vlastnosti zemního plynu	
Množství spalovacího vzduchu	9,56 m ³ vzduchu / m ³ zemního plynu
Mez výbušnosti	5-15 %
Zápalná teplota	650 °C
Teplota plamene	1957 °C

Rozdělení zemního plynu [1, 2]:

- Koksárenský plyn – směs plynů, vznikajících v koksárenských pecích při koksování černého uhlí. Před dalším využitím se musí koksárenský plyn odsířit a vyčistit. Odstraňované prvky jsou např. dehet, amoniak a benzol. Technicky čistý koksárenský plyn se nazývá svítiplyn, je tvořen prvky (H₂ – vodík, CO – oxid uhelnatý, CH₄ – metan a dalšími prvky), je bez zápachu, bez barvy a prudce jedovatý.
- Vysokopeční plyn – vzniká jako vedlejší produkt při výrobě surového železa ve vysokých pecích nedokonalým spálením koksu a uvolněním oxidu uhličitého CO₂ z vápence.

- Bioplyn – plyn vzniklý rozkládáním organického odpadu nevhodného pro spalování na kvalitní organické hnojivo a s výhřevností 20–22 MJ/kg. Dochází tu k biologickému odbourávání organických látek v tekutém stavu za nepřítomnosti vzduchu, ve tmě a při teplotě odpovídající teplotě trávicího traktu přežvýkavců (37 °C). Dominantní složkou je metan, jenž tvoří nadpoloviční část (45–70 % hm.), dále pak oxid uhličitý CO₂ (20–40 % hm.), vodík H₂ a oxid siřičitý SO₂.
- Vodní plyn – vzniká rozkladem vodní páry, která je vedena přes rozžhavený koks, který má vysokou teplotu.

Další plynná paliva jsou například generátorový plyn, topná směs PB (LPG), skládkový plyn, dřevoplyn, propan-butan a plynné odpady [1, 2].

1.4 Kotle na tuhá paliva

Kotle na tuhá paliva můžeme rozdělit podle ohniště, které ovlivňují výkon kotle.

Podle požadovaného výkonu [1]:

- Roštová ohniště – 0,025 MW_t po cca 150 MW_t,
- Fluidní ohniště se stacionární fluidní vrstvou – od 40 MW_t do 200 MW_t,
- Fluidní ohniště s cirkulující fluidní vrstvou – od 40 MW_t do 75 MW_t,
- Prášková ohniště – od 40 MW_t do nejvyšších výkonů.

Další kritéria ovlivňující návrh kotle jsou např. druh paliva, parametry kotle, regulační rozsah a dynamické vlastnosti kotle, s ohledem na požadované či povolené znečišťující látky a místní podmínky [1].

1.5 Kotle na kapalná a plynná paliva

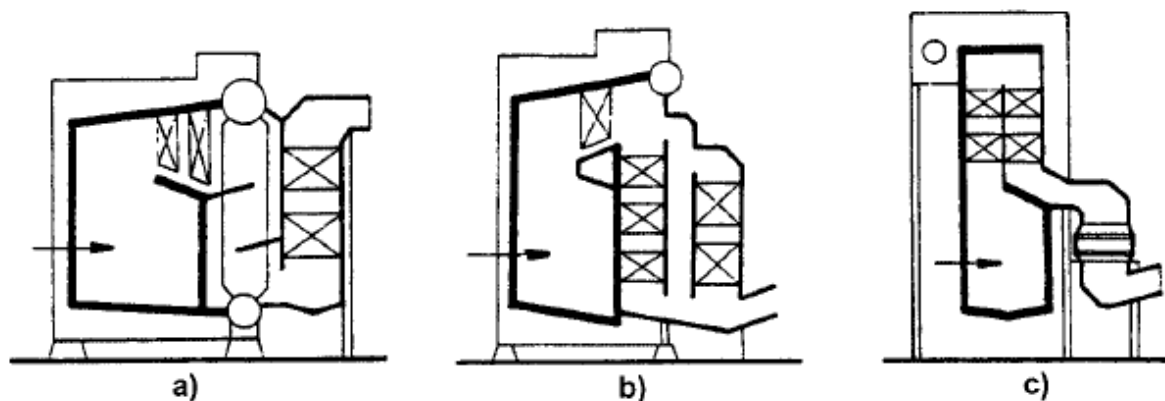
Hlavní výhodou ohnišť na kapalná paliva je možnost použití vysoce výhřevných paliv. Další výhody jsou např. snadná těžba, doprava a skladování paliv. U kotlů na kapalná paliva odpadá ztráta mechanickým nedopalem a ztráta citelným teplem tuhých zbytků.

Plynné kotle mají pouze ztráty fyzickým teplem tuhých zbytků a sdílením tepla, a to sáláním nebo vedením tepla do okolí. Komínová ztráta je velmi nízká, protože plyny je možno spalovat s velmi malými přebytky vzduchu $\alpha = 1,01$ a s nízkou teplotou výstupních spalin.

Ohniště na kapalná paliva umožňují dokonalé spalování při součinitelích přebytku vzduchu $\alpha = 1,05$ a i nižšími, spolu s menšími vzniklými objemy spalin má příznivý vliv na účinnost kotle. Účinnost kotlů na kapalná paliva dosahuje η_k 93–95 %. Kotle na plynná paliva dosahují účinnosti η_k 96–97 %. Ohniště uvedených spalovacích zařízení jsou velmi pružná, mají veliký regulační rozsah a jednodušší palivové hospodářství. Samotné najetí kotle na plný výkon trvá 1–2 hodiny. V porovnání s práškovými kotli má vyšší najížděcí dobu – ze studeného stavu najede během 4–5 hodin [1, 2, 13].

Nevýhodou tepelných zdrojů s kapalnými a plynnými palivy je nutnost počítat se zvýšenou tvorbou NO_x a SO_x při spalování za vysokých teplot a se vznikem nízkoteplotní koroze, ke které dochází při podkročení rosného bodu spalin na stěnách výměníku [2, 13].

Ukázka typických kotlů spalujících kapalně nebo plynné palivo:



Obr. 5 a) dvoububnový nízkotlaký kotel, b) jednobubnový středotlaký kotel, c) jednobubnový vysokotlaký kotel [13]

Vzhledem k současným cenám nízkosirnatých topných olejů je energie vyrobená z kapalných paliv velmi drahá.

Kotle na plynná paliva umožňují instalaci spalínového kondenzačního výměníku. Uvedený výměník umožňuje snížení spotřeby zemního plynu o 2–3 % za pomoci využití tepla spalín. Nevýhoda výměníku je především vyšší pořizovací cena a v některých případech také špatné využití nízkopotenciálního tepla vody, která je ohřátá na cca 60 °C při odchozí teplotě spalín cca 70–75 °C [1, 2].

Vliv síry na vznik nízkoteplotní koroze

U kapalných paliv může dojít ke vzniku kysličníku sírového, který se slučuje s vodní párou. Jejich reakcí vzniká kyselina sírová, která není v plynném stavu nebezpečná. Riziko nastane, pokud dojde k podkročení rosného bodu spalín, kdy začne pára kondenzovat. Jako kapalina je silně agresivní a napadá kovové stěny. Nejvíce postiženými částmi nízkoteplotní koroze jsou ohříváky vzduchu [1].

Opatření proti vzniku nízkoteplotní koroze [1]:

- Spalování s nízkým přebytkem vzduchu,
- Použití nekovových materiálů, nátěrů a ochranné vrstvy,
- Dodávání aditiv do topných olejů nebo spalín, snížení obsahu síry,
- Udržování stálé teploty v LUVO nad rosným bodem spalín, např. recirkulace vzduchu.

Vliv vanadu na vznik vysokoteplotní koroze

Popel obsažený v kapalných palivech obsahuje oxidy vanadu, zejména V_2O_5 a V_2O_3 . Mají nízký bod tavení (500–800 °C, maximum kolem 600 °C). Poškozenými plochami bývají ochranné vrstvy trubek, které jsou narušovány oxidy vanadu a následně jsou vystaveny spalínům a popílku. Dalšími opotřeбенými plochami bývají plochy přehříváků a přihříváků [1,5].

Opatření proti vzniku vysokoteplotní koroze [1]:

- Spalování s nízkým přebytkem vzduchu,
- Dodávání aditiv do topných olejů,
- Nepřekračování teploty teplosměnných ploch nad teplotu tavení vanadu.

Hospodářství kapalných paliv

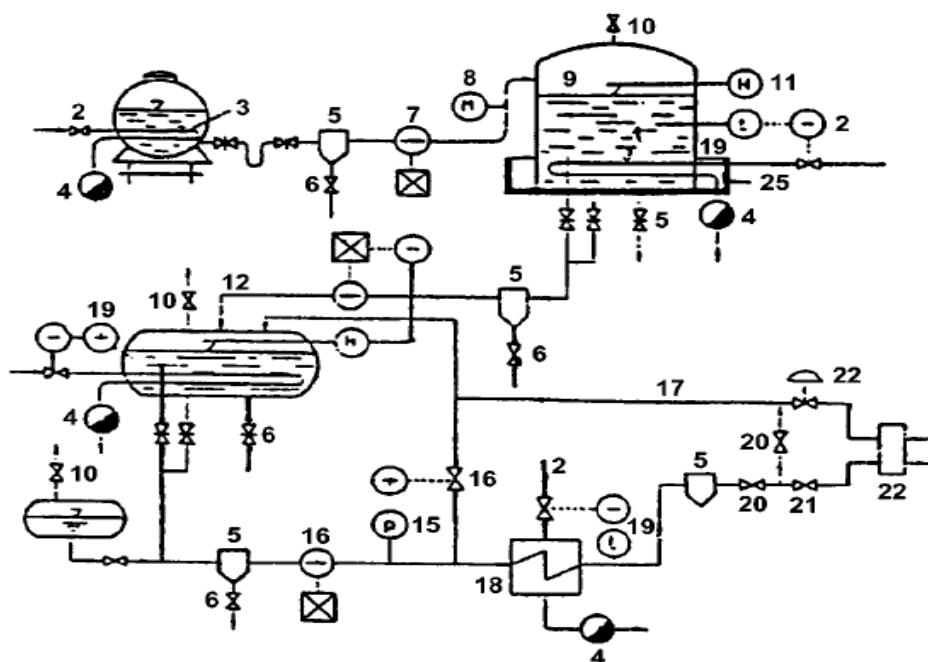
Palivové hospodářství kapalných paliv se skládá z vnějšího a vnitřního hospodářství (viz Obr. 4).

U vnějšího hospodářství se kapalné palivo musí ohřívat. Nejčastěji se zahřívá párou o přetlaku 0,6 MPa v množství 0,1–0,15 kg_{páry}/kg_{paliva} za účelem zvýšení viskozity při stáčení do zásobních nádrží. Nádrže mohou být umístěny nad zemí nebo pod zemí. Olejové potrubí je nutné izolovat, protože při případném odstavení by mohlo dojít k zatuhnutí paliva [2, 13].

Vnitřní palivové hospodářství je umístěno v oblasti kotle a je složeno z provozní nádrže, řady čerpadel, filtrů a ohřívací stanice, z které je palivo dopravováno do hořáku [13].

Návrh palivového hospodářství ovlivňují tyto parametry [13]:

- Výkon kotelný,
- Způsob dodávání kapalného paliva,
- Vlastnosti použitého kapalného paliva.



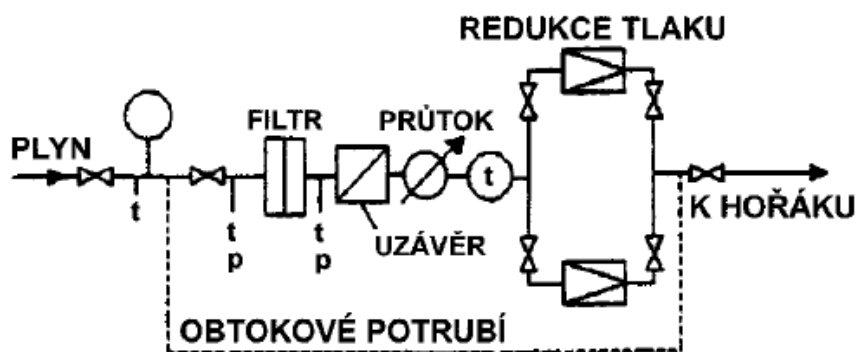
Obr. 6 Schéma palivového hospodářství olejové kotelný [13]

Vnější hospodářství: 1. cisterna, 2. topná pára, 3. topné hady, 4. odváděč kondenzátu, 5. filtr, 6. odvodnění vnější nádrže, 7. stáčecí čerpadlo, 8. průtokoměr, 9. hlavní zásobní nádrž, 10. odvzdušnění, 11. stavoznak, 12. dopravní čerpadlo.

Vnitřní hospodářství: 13. denní nádrž, 14. hořáková čerpadla, 15. manometr, 16. přepouštěcí ventil, 17. recirkulační potrubí, 18. průtokový ohřívák oleje, 19. teploměr, 20. uzavírací ventil, 21. rychlouzavírací ventil, 22. hořák, 23. regulační ventil, 24. nádrž na topnou naftu, 25. betonová vana pod hlavní nádrž (minimální obsah 1/3 objemu nádrže).

Palivové hospodářství plyných paliv

Palivové hospodářství kotelny na plynná paliva, zejména zemního plynu, patří mezi nejjednodušší palivová hospodářství. Příprava zemního plynu spočívá v redukci tlaku, odstranění nečistoty a vlhkosti. Nízkovýhřevné plyny se musí předeřhřívát na teplotu 200 °C kvůli snazšímu zapálení a hoření plynu. Malé kotle s atmosférickými hořáky můžeme připojit k domovnímu rozvodu plynu, veškeré potřebné elementy jsou součástí kotle. Kotle s většími výkony mají samostatné palivové hospodářství zobrazené na Obr. 7. Plyn je přímo odebírán z plynárenské soustavy a má vyšší tlakovou úroveň [1, 13].



Obr. 7 Plynové hospodářství [13]

1.6 Výměníková část kotle

Výměníky tepla jsou nezbytnou součástí kotle. Dochází v nich k průběžnému nebo přerušovanému předávání tepelné energie pomocí proudících teplotnosných médií. U parních kotlů je výměníková část složitější než u kotlů teplovodních, které obsahují pouze jeden výměník (spaliny – voda) [2].

U parních kotlů se výměníková část skládá z:

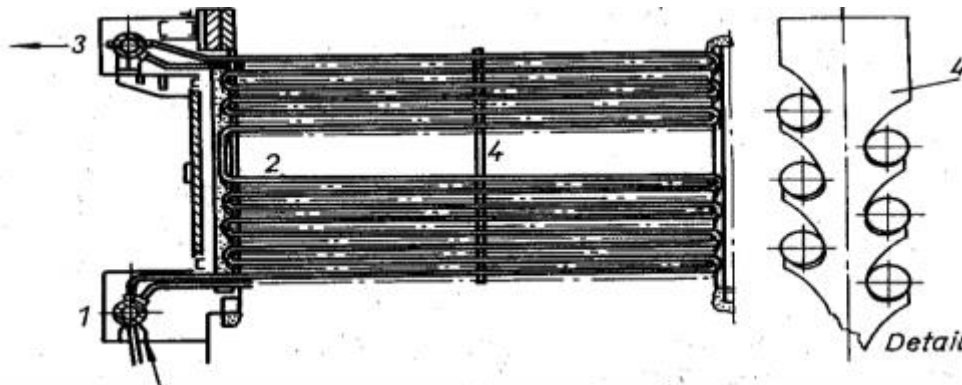
- Ohříváku vody (ekonomizér),
- Výparného systému,
- Přehříváku páry.

1.6.1 Ohřívák vody – ekonomizér

Jedná se o jednoduchý nízkoteplotní výměník parního kotle, umístěného v oblasti nejnižších teplot spalin. Ekonomizér bývá poslední výhřevnou plochou ze strany spalin, pokud neuvažujeme ohřívák vzduchu, a první teplosměnnou plochou ze strany vody. U bubnových kotlů se voda ohřívá (z teploty napájecí vody) na teplotu blízké bodu varu (20–30 °C pod teplotu varu) v závislosti na tlaku. Patří k nejvíce poruchovým a údržbově náročným výměníkovým plochám. Poruchovost je většinou způsobena abrazivním opotřebením materiálu trubek

a následně dochází k prošlehávání. Abrazivní účinek vzniká zejména u velmi popelnatého uhlí [5, 6].

V současné době, se u většiny kotlů konstruuji ohříváky vody ze svařovaných ocelových hadů (viz Obr. 8), které jsou plošně nebo prostorově vinuté. Materiál bývá tvořen z uhlíkových nebo legovaných perlitických trubek o průměru 28–38 mm [6].



Obr. 8 Ohřívák vody konstruovaných z ocelových hadů [6]

1. spodní komora, 2. vlastní armatury, 3. horní komora, 4. závěs trubek.

1.6.2 Výparný systém

Výparný systém je nejsložitější výměňkovou částí kotle. Nachází se v oblasti s nejvyšší teplotou spalín, v oblasti ohniště (membránové stěny – varné trubky jsou propojeny podélným žebrováním, u kterých nedochází k velkým tepelným ztrátám do okolí). Jedná se o sálavou plochu kotle.

Sdílení tepla se nejvíce projevuje přestupem tepla sáláním. Výparný systém se skládá z bubnu, zavodňovacích komor, varných trubek (na stěnách spalovací komory), sběrných komor, trubek a případných dodatkových ploch. Ve výparníku dochází k odpařování vody a k přeměně na sytou páru. Voda je obvykle přiváděna z ohříváku vody (ekonomizéru). Buben je tlustostěnné tlakové zařízení, ve kterém se odděluje pára od vody, dochází k odluhu (odstraňuje se z vody sůl), a udržuje se zásoba vody ve výparníku na konstantní hladině [1, 6].

Velikost výparníku lineárně roste společně s výkonem zařízení, protože střední součinitel prostupu tepla a střední teplotní rozdíl jsou přibližně stejné [5].

1.6.3 Přehřívák

Přehřívák je zařízení, které slouží ke zvýšení účinnosti cyklu a snížení vlhkosti po expanzi v turbíně. Jedná se o poslední teplosměnnou plochu před tím, než voda opustí kotel. Pára se musí přehřívát na konstantní teplotu, která se pohybuje od 250 °C do 600 °C. U průtočných nadkritických kotlů se teplota pohybuje okolo 670 °C [1, 6].

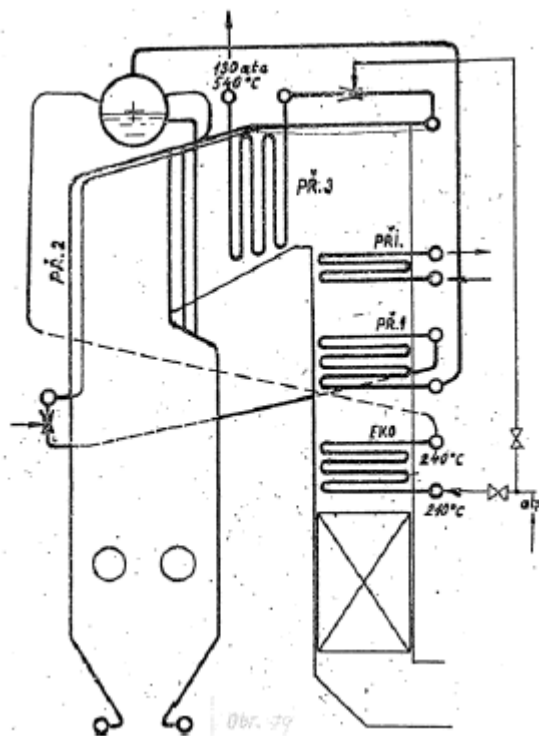
U kotlů pracujících s vysokými parametry páry (tlak >14 MPa a teplota větší než 565 °C) se přehřívák stává nejtěžší částí tlakového systému kotle. Pokud kotel obsahuje tlakový systém přehřívák (mezipřehřívák), může celková hmotnost přehřívacích ploch překročit 50 % hmotnosti tlakového systému kotle [5, 6].

Základní dělení přehříváku je podle šíření tepla do okolí, a to [1]:

- Sálavé (stěnové, sálavé) – zásadním přestupem tepla je sálání, sálavé přehříváky jsou umístěny v ohništi kotle,
- Konvekční – zásadním přestupem tepla je konvekce, přehříváky jsou tvořeny hady, jenž jsou umístěny v oblasti druhého tahu, kde je nižší teplota spalin.

Typy přehříváků [1, 6]:

- Svazkové – trubky přehříváku jsou umístěny paralelně nebo sériově a vyrábějí se svislé a vodorovné trubky, které jsou zavěšeny na vodou chlazených potrubích,
- Deskové – trubky jsou vinuté do vodorovných nebo souvisle svislých ploch s větší roztečí mezi deskami, aby nedocházelo k zastruskování a následnému snížení životnosti přehříváku,
- Stěnové – využívají se zejména u vysokotlakých kotlů s tlakem od 6,4 do 22,5 MPa, a trubky jsou uloženy na stěně nebo stropu kotle jako výparný systém.



Obr. 9 Typy přehříváku [6]

Př. 1 svazkový přehříváky, Př. 2 stěnový přehříváky, Př. 3 deskový přehříváky

1.7 Kotle s relativně velkým obsahem vody (velkoprostorové)

Kotle s relativně velkým obsahem vody se konstruují pro nízkotlaké nebo středotlaké kotle nízkých výkonů, v kterých neprobíhá cirkulace vody. Slouží především pro výrobu syté páry. Velkoprostorové kotle jsou tvořeny velkým horizontálním válcem, který slouží jako zásobník vody, udržuje konstantní hladinu ve výparníku, odděluje páru od vody a dochází

v něm k odluhu. V bubnu dále najdeme žárové trubky, kterými proudí horké spaliny a plamenec. Pára poté odchází ventilem v horní části bubnu [1, 5].

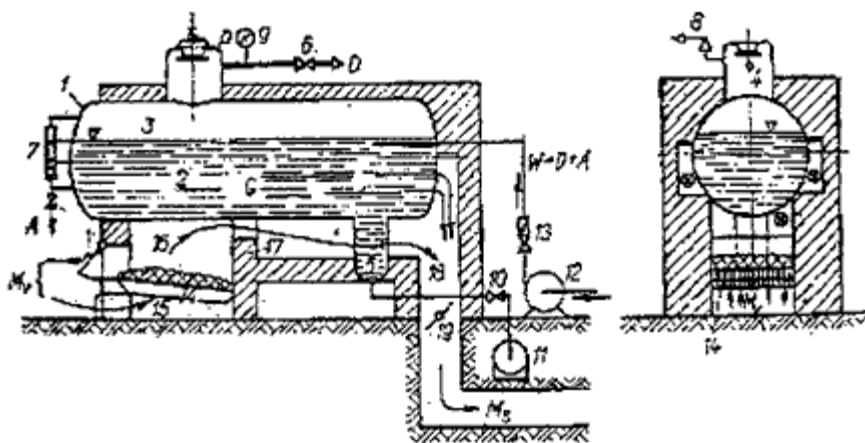
Velkoprostorové kotle rozdělujeme na [5]:

- Válcové,
- Plamencové,
- Žárotrubné,
- Kombinované z předchozích typů.

1.7.1 Kotle válcové

Válcový kotel vznikl na přelomu 18. – 19. století, patří mezi nejjednodušší a nejstarší typy parních kotlů s relativně velkým obsahem vody. Využíval se v podnicích, v nichž byla požadována proměnlivá spotřeba páry a tyto kotle se stavěly do 25 m² výhřevné plochy. Postupem času byly tyto kotle nahrazeny trubnatými kotli. Samotný válcový kotel se stal součástí složitějších kotlových konstrukcí [5, 18].

Tlustostěnná nádoba je charakteristickým znakem uvedených kotlů a je namáhána vnitřním přetlakem. Pod válcovou nádobou je umístěno roštové ohniště, které přímo ohřívá nádobu po celé délce a na dvou třetinách obvodu až do úrovně žarorysu. Žarorys je vodorovná myšlená čára na tlakové nádobě parního kotle vedená nejvyšším místem, kam smějí zasahovat spaliny a určuje minimální výhřevnou plochu kotle [5, 13].



Obr. 10 Kotel válcový [18]

1.7.2 Kotle plamencové

Plamencový kotel vznikl kvůli zvětšení výhřevných ploch. U válcových kotlů byl malý poměr ohřívané teplosměnné plochy k jeho vodnímu obsahu a spaliny odcházely do komína s nevyužitou teplotou 300 °C a více. Tento kotel má vyšší účinnost, jelikož došlo ke snížení ztrát mechanickým nedopalem. U kotlů spalující pevná paliva dosahuje účinnost 60–70 %, zatímco u kotlů spalující plynná a kapalná paliva dosahuje účinnosti 76 % [5, 18].

Kotel je konstruován až ze tří plamenců, které jsou uloženy v oblasti bubnu. V plamenci bývá umístěno ohniště. Pokud tomu tak není, slouží jako tah kotle a je namáhán vnějším přetlakem vodního prostoru [18].

Plamencové kotle se staví do limitních parametrů [5]:

- Hmotnostní tok syté páry do 3,5 t/h,
- Tlak páry do 2 MPa a teplota páry do 210 °C.

1.7.3 Kotle žárotrubné

U žárotrubných kotlů došlo k dalšímu zvětšení výhřevných ploch, a to žárovými trubkami za studena zaválcovaných do trubkovnic kotle. Žárovými trubkami proudí horké spaliny z ohniště a voda proudí ve vodním prostoru válce mimo žárových trubek. Uvedené trubky umožnily zvětšení výhřevné plochy kotle 3×–4×, oproti plamencovému kotli. Také se zmenšila doba najíždění kotle v důsledku menšího průměru trubek a větší rychlosti spalin. S vyšší rychlostí spalin se zvýšil součinitel přestupu tepla α na straně spalin [5, 18].

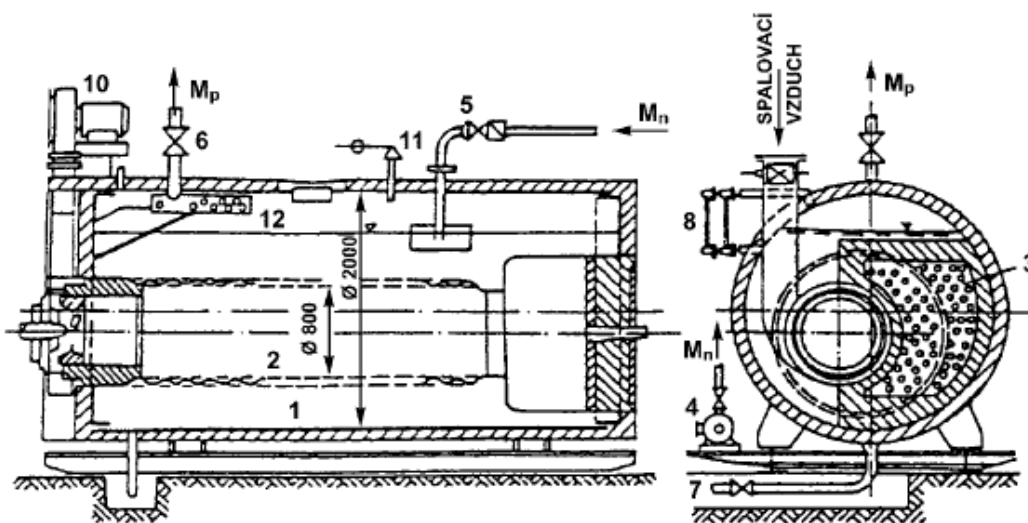
Rozdělení žárotrubných kotlů podle způsobu provedení [5]:

- Ležaté – tato poloha trubek je vhodná pro lepší přestup tepla, protože pára proudí kolmo na trubky,
- Stojaté – kotle se používají po páru s větší suchostí. Páru vysouší žárové trubky s teplotou spalin 300–500 °C. Stojaté žárotrubné kotle jsou tvořeny stojatým válcovým pláštěm, do kterého je vložena soustava svislých žárových trubek. Vrchní část je zaválcovaná do trubkovnic a spodní oblast do skříňové plamenice.

1.7.4 Kotle kombinované

Nejčastější kombinací bývají kotle plamencové a žárotrubné, díky čemuž vznikly různorodé konstrukce malých výkonů. V současné době se vyrábějí pouze kombinované kotle [5, 13].

Balený kombinovaný kotel – jedná se o kombinovaný plamenco–žárotrubnatý kotel s přetlakovým spalováním a přirozenou cirkulací. Je vhodným zdrojem tepla pro topenářské a technologické účely. Má minimální obestavěný prostor, nízké nároky na úpravy, elektroinstalaci, měření, regulaci a také je charakteristický svojí kompaktností, snadnou přepravou a instalací. Maximální účinnost kotle se pohybuje od 87 % do 89 %. Schéma kotle je znázorněno na Obr. 11 [5, 13, 18]



Obr. 11 Plamenco-žárotrubný kotel [13]

1 – buben, 2 – plamenec, 3 – žárové trubky, 4 – napáječka, 5 – napájecí hlava, 6 – hlavní uzavírací ventil, 7 – odkalovací ventil, 8 – vodoznak, 9 – hořák, 10 – vzduchový ventilátor, 11 – pojistný ventil, 12 – parní směšovací trubka s oddělováním vlhkosti, 13 – obrátová komora.

1.8 Kotle s relativně malým obsahem vody (vodotrubnaté)

Vodotrubnaté kotle se stavěly s větší výkonem, vyššími parametry tlaku a teplotou přehřáté páry (parametry se mohou pohybovat od atmosférického tlaku a teploty 120 °C až po nadkritické parametry 22,5 MPa a 374 °C) v porovnání s velkoprostorovými kotli. Ve vodotrubnatých kotlích dochází k cirkulaci vody [1, 5].

Výparný systém se skládá z většího počtu trubek menšího průměru, který umožňuje zvětšit výhřevnou plochu. Ohniště v kotli s relativně malým obsahem vody poskytuje spalování širokého spektra paliva, od podřadných až po nejkvalitnější paliva. Kotle tohoto typu mají rychlé najíždění ze studeného stavu, ale jsou obtížné na regulaci (stabilita dodávky paliva a úprava napájecí vody) [5].

Dělení kotlů s relativně malým obsahem vody [1]:

- S přirozeným oběhem ve výparném okruhu,
- S nuceným oběhem ve výparníkovém okruhu,
- Průtočné.

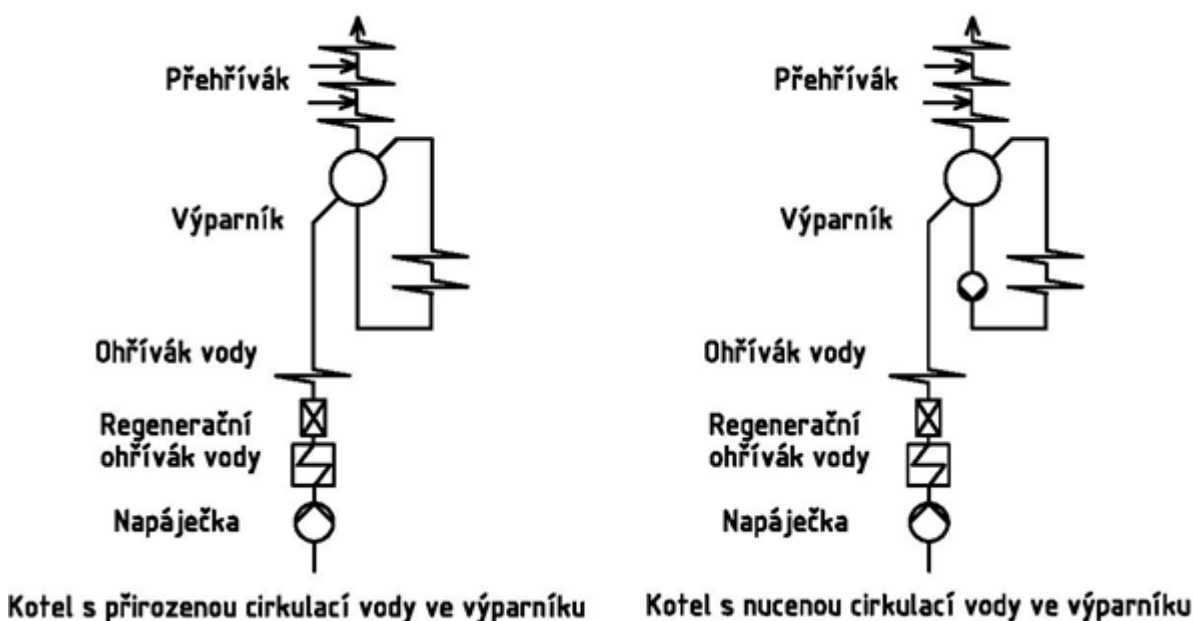
1.8.1 Kotle s přirozeným oběhem vody ve výparném okruhu

Strmotrubnaté kotle jsou úzce spjaté se stupněm technické dokonalosti v odstraňování vodního kotelního kamene z kotlových trubek. Přirozený oběh je vhodný pro menší soustavy. Půdorysně jsou kotle málo rozlehlé, což snižuje tlakové ztráty v jednotlivých okruzích. Konstruují se s většími výškovými rozdíly mezi otopnými tělesy a zdrojem tepla. V současné době se strmotrubnaté kotle využívají minimálně [5, 6].

Výparník kotle se skládá z rozváděcích komor (jsou mimo prostor ohniště a bývají netopené), bubnu, spádových trubek a varných trubek, jenž se nalézají v oblasti ohniště.

Kotle s přirozeným oběhem vody ve výparníku jsou vyvozovány přetlakem. Proudění vody v uzavřeném okruhu se udržuje vlivem působení zemské gravitace na sloupec vody ve „spádovkách“ ve kterých má směs vody vyšší hustotu. Z této strany je vyšší hydrostatický tlak, který působí na sloupec směsi vody s menší hustotou. Vztlak způsobí pohyb vody v okruhu kotle a dojde k přirozenému oběhu vody. Z varnic přichází směs vody a páry do bubnu, kde dochází k jejich vzájemnému oddělení. Vzájemné odloučení se děje přirozenou sedimentací nebo v odlučovacích zařízeních. Kotel s přirozeným oběhem vody ve výparném okruhu je znázorněn na Obr. 12 [5, 6].

Oběh vody výparníkem je charakterizován oběhovým číslem „O“, které je definováno jako hmotnostní průtok v zavodňovacích trubkách ku hmotnostnímu průtoku ve výparníku. Číslo se mění podle průtoku páry [6].



Obr. 12 Kotel s přirozenou a nucenou cirkulací vody ve výparníku [19]

1.8.2 Kotle s nuceným oběhem vody ve výparném okruhu

Nucený oběh vody ve výparníku se liší od přirozeného oběhu přidáním bezucpávkového oběhového čerpadla začleněného do zavodňovací části okruhu výparníku, kde vyvíjí dopravní přetlak 0,3 – 0,6 MPa. Přirozený oběh vody ve výparníku je málo účinný při působení vysokého tlaku (17 až 18 MPa). Při vzrůstajícím tlaku dochází k poklesu rozdílů hustot vody a syté páry, taktéž dochází i ke snížení přetlaku. Oběhové číslo se rychle zmenšuje a je tím menší, čím je menší výška oběhu. Při kolísavém zatížení kotle nastávají problémy s cirkulací vody [5, 6, 19].

Kotel s nuceným oběhem vody, jenž je zobrazen na Obr. 12, se v konstrukci neodlišuje od kotle s přirozeným oběhem vody. Oba využívají rozsah tlaku od 14 do 18 MPa a rozdíl je pouze v použití oběhového čerpadla, které vytlačuje vodu zpět do systému paralelně řazených přímých svislých varnic.

Použití čerpadla umožnilo zmenšení trubek výparníku na hodnotu kolem 30 až 38 mm. K zajištění rovnoměrnějšího průtoku v jednotlivých paralelně řazených trubkách výparníku se všechny trubky clonkují a umožňují tlakové ztráty v potrubí ve výparníku vyrovnat tlakové ztrátě hadu. Jednotlivé clonky se instalují na vstupy do jednotlivých sekcí [5, 6, 19].

1.8.3 Kotle průtočné

Průtočný kotel neobsahuje buben, díky čemuž se stává lehčí, pružnější a lze ho provozovat i v nadkritických hodnotách teplot a tlaků vyrobené páry. Napájecí čerpadla umožňují stabilní průtok vody kotlem a kryjí veškeré tlakové ztráty kotle [5, 6].

Ve výparníku dochází k odpařování napájecí vody, která prochází do přehříváku a na konci vystupuje sytá pára. Tento kotel nemá pevné body konce vypařování a má složitou výkonovou regulaci. Napájecí voda musí být chemicky upravená a u vysokotlakých kotlu plně demineralizovaná. K tomu dochází v poslední části výparníku v tzv. přechodníku. Přechodník nahrazuje funkci bubnu, a umísťuje se v oblasti menších tepelných příkonů. Voda se upravuje

především kvůli vzniku nánosu soli na přehřívačku, dále kvůli nerovnoměrnému hmotnostní toku v jednotlivých hadech přehřívačky, které mají vliv na výstupní teplotu páry. Průtočné kotle nemají zavodňovací trubky ve výparníku, tudíž se soustava skládá z paralelních varnic a rozdělovacích nebo sběrných komor. Oběžné číslo průtočného kotle je jedna [5, 6].

2 Kotel BOSH

Parní kotel BOSCH je třítahový, plamenco-žárotrubný kotel UNIVERSAL, typ UL-SX, který slouží k výrobě přehřáté páry. Specifické parametry kotle jsou znázorněny v Tab. 6.

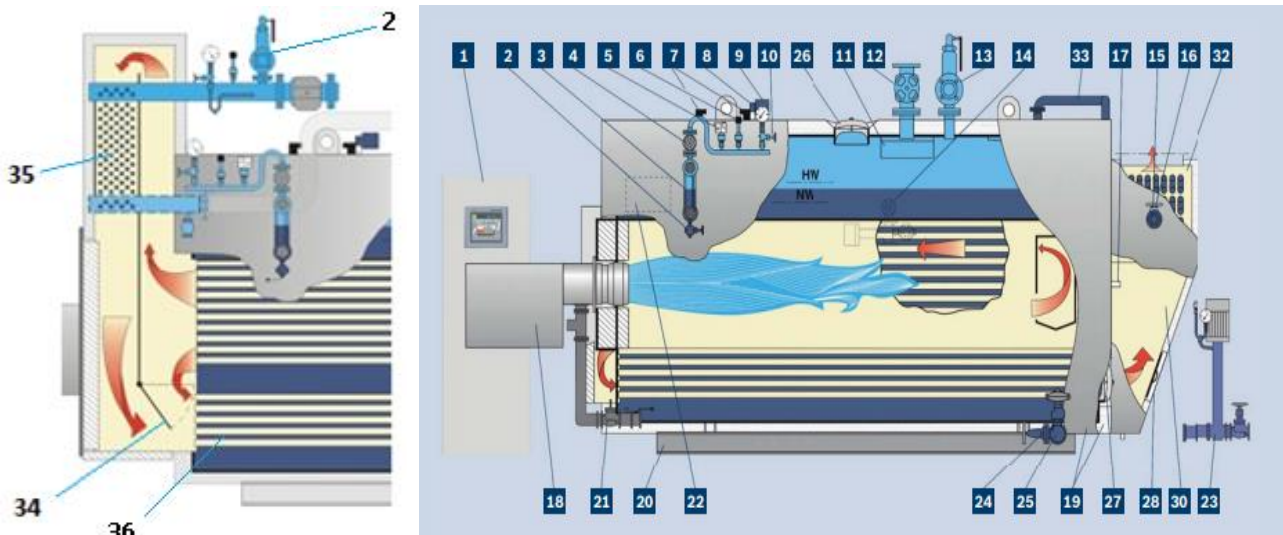
Tab.6 Parametry kotle BOSCH [32]

Kotel BOSCH UNIVERSAL, typ UL-SX		
Výkon	Hodnota	Jednotka
Parní (jmenovitý) výkon	10 000	kg/h
Parní výkon při 100 °C	10430	kg/h
Tepelný výkon brutto (jmenovitý)	6 726	kW
Celkový tepelný výkon spalovacího zařízení (plyn)	7040	kW
Účinnost		
Účinnost pro plyn (podle EN 12953 část 11 – nepřímá metoda)	95,5	%
Médium–přehřátá pára		
Střední teplota přehřáté páry (plné zatížení)	220	°C
Střední přetlak přehřáté páry (plné zatížení)	12,3	bar
Maximální přípustný provozní přetlak	16	bar
Střední provozní přetlak	13	bar
Palivo		
Zemní plyn – typ H, norma paliva DVGW G260		
Výhřevnost HN (tlak 101,325 kPa, teplota 0 °C)	10	kWh/mn ³
Přetlak plynu	900	mbar
Všechny hodnoty se vztahují na obsah O ₂ v such. spal.	2,1	%
Výstupní teplota spalin cca. (plyn)	117	°C
Napájecí voda		
Teplota napájecí vody	103	°C

2.1 Popis středotlakého parního kotle

Tlaková nádoba se skládá z válcového pláště kotle, předního a zadního dna, asymetricky vpravo ležícího plamence (1. tah), jenž spojuje obě dna. Dále se skládá z vnitřní vodou chlazené obrátové komory a dvou svazků žárových trubek (2. a 3. tah). Asymetricky umístěný plamenec, horizontální zadní a vertikální přední obrat spalin umožnily zvětšení teplosměnné výhřevné plochy a zmenšení vnějších rozměrů konvenční výhřevné plochy s velkým parním prostorem. Elastická dna jsou propojena velkým průchozím plamencem a pláštěm kotle pomocí velkého počtu rohových kotev za účelem dodržení stejnoměrného rozložení zátěže. Vzájemná spolupráce sálavé a konvenční výhřevné plochy vyvíjí razantní cirkulaci vody a umožňuje zrychlit dopravu parní bubliny do parního prostoru [28, 30].

Středotlaký parní kotel se dále skládá ze zařízení sloužící pro vysoušení páry, z výhřevných ploch, sady zabezpečení vůči přetlaku, napájení, měřících senzorů tlaku a montážních, popř. vestavěných dílů.



Obr. 13 Popis kotle BOSCH typ UL-SX [převzato z 20]

Tab.7 Příslušenství kotle UL-SX [20]

1.	Rozvaděč kotle s řízením BCO	17.	Průhledítko do plamence
2.	Odvzdušnění	18.	Hořák
3.	Reflexní ukazatel hladiny vody	19.	Izolace s ochranným opláštěním
4.	Uzavíratelný ventil s manostatem, bezúdržbový	20.	Základový rám
5.	Omezovač tlaku	21.	Plynová regulační řada
6.	Převodník tlaku (4-20 mA)	22.	Svorkovnice
7.	NW-Omezovací elektroda	23.	Napájecí modul
8.	Manometr	24.	Vypouštěcí uzavírací ventil
9.	Převodník hladiny (4-20 mA)	25.	Odkalovací rychlouzavírací armatura
10.	Manometrový uzavírací ventil	26.	Revizní otvor na straně páry
11.	Odlučovač vlhkosti z páry	27.	Revizní otvor na straně vody
12.	Hlavní parní ventil	28.	Revizní otvor na straně spalín
13.	Pojistný polozdvíhový ventil	30.	Spalinová komora
14.	Plně automatické měření vodivosti a odluhu	32.	Spalinový výměník ECO
15.	Zpětný ventil napájecí vody	33.	Spojovací potrubí ECO/Kotel
16.	Uzavírací ventil napájecí vody, bezúdržbový	34.	Výkyvné dveře obrátové komory
35.	Přehřívák	36.	Žárové trubky

2.1.1 Výhřevné plochy kotle

V kotli je mnoho výhřevných ploch, mezi které patří:

- Ekonomizér (EKO1),
- Zařízení pro přehřívání páry.

Ekonomizér (EKO1) – Spalinový tepelný výměník je zařazený za kotlem a používá se k „suchému“ provozu (ohřívání napájecí vody). Tepelný výměník je vysoce účinný pro přenos tepla na principu protiproudů. Konstrukce ekonomizéru je podle evropské směrnice pro tlakové nádoby DGRL (97/23EG) a je také vhodný pro vysokotlaké parní kotle [31, 33].

V ekonomizéru se z (teplejších) spalin z kotle získává teplo tím způsobem, že (chladnější) napájecí voda proudí trubkami tepelného výměníku a snižuje teplotu spalin. Takto získaná energie vede ke zvýšení účinnosti kotle, ke snížení spotřeby paliva a emisních škodlivin (oxidu uhličitého a oxidu dusíku) [29].

Tab.8 Parametry integrovaného ekonomizéru (typ EKO1) [32]

Ekonomizér	Hodnota	Jednotka
Výkon při provozu na plyn	413	kW
Výstupní teplota spalin (plyn)	117	°C
Výhřevná plocha	237	m ²
Průtok vody (plyn)	10000	kg/h
Teplota výstupní vody (plyn)	138	°C

Přehřívák páry – Přehřívák přehřívá sytou páru vzniklou v parním kotli na teplotu 117 °C, (viz tab. 8) a vyrábí tzv. přehřátou páru. Přehřívací zařízení je umístěno v nízkém teplotním rozsahu nad přední obratovou komorou. Umístění přehříváku je znázorněno na Obr. 13. Toto umístění zaručuje snadnou údržbu, montáž, pohodlné čištění a kontrolu 2. a 3. tahu kotle [33].

Tab.9 Parametry přehříváku [32]

Přehřívák	Hodnota	Jednotka
Dílčí zatížení (min výkon přehříváče)	50	%
Střední přetlak přehř. Páry (při plném zatížení)	12,3	bar
Střední teplota přehř. páry (při plném zatížení)	220	°C
Přepravní hmotnost přehříváku	1327	kg

Funkce přehříváku – Spaliny vystupují z 2. tahu kotle, jsou vedené vstupním kanálem přehříváče vzhůru, následně jsou přesměrovány a vedeny přehříváčem shora dolů. Uspořádání sběrače a zhotovení vedení spalin garantují protiproudý přenos tepla. Spaliny vystupující z přehříváče procházejí do 3. tahu. Vysoká životnost přehříváku je zaručena díky nízkému teplotnímu zatížení výměníku. Nastavení požadované teploty přehřáté páry nad rámec stanovené teploty páry s následným ochlazením páry se u tohoto systému nepoužívá. Aplikace regulace na straně spalin se teplota trubek přehříváče udržuje na nízké úrovni. K regulaci teploty přehřáté páry se používá měřicího teplotního čidla [31].

3 Hořáky

Hořáky jsou nezbytnou součástí kotlů. Rozprašují palivo, které se vypařuje v části ohřívané sáláním z ohniště [1].

Požadavky na hořáky [28]:

- Dokonalé spalování paliva při optimálním přebytku vzduchu,
- Bezpečné zapálení směsi paliva vzduchu a požadovaný průběh hoření,
- Při použití různých druhů paliv by měla být zajištěna snadná regulace výkonu,
- Plamen by měl vyplňovat celý spalovací prostor,
- Připravit homogenní směs paliva a spalovacího vzduchu,
- Minimální tlakové ztráty a odolnost vůči vysokým teplotám,
- Minimální znečišťování výhřevných ploch,
- Minimální tvorba CO, NO_x, SO₂, PM₁₀, PM_{2,5}, popř. zamezit tvorbě těžkých kovů.

Podle druhu spalovaného paliva, dělíme hořáky na [28]:

- Práškové – proudové, směšovací a vířivé hořáky,
- Kapalné – rozprašovací hořáky,
 - s mechanickým rozprašováním,
 - rozprašování pomocí cizího média,
- Plynné – směšovací a vířivé hořáky na zemní plyn,
- Kombinované – kombinované hořáky spalující kapalinu, popř. plyn.

Rozdělení podle účelu použití [28]:

- Hlavní,
- Zapalovací – slouží k zapalování a najíždění kotlů ze studeného stavu,
- Najížděcí – Dimenzují se na 25-30 % tepelného příkonu v základním palivu a slouží ke stabilizaci procesu hoření, hlavně při nízkých výkonech.

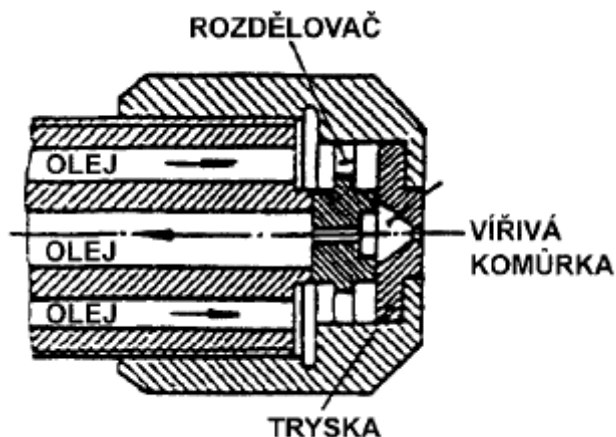
3.1 Hořáky na kapalná paliva

Kapalné palivo v uvedených hořácích musí být před spálením rozptýleno na jemné částičky (atomizace), případně převedeno na páru, která umožní snadné, rychlé a dokonalé promísení palivové mlhoviny se spalovacím vzduchem a ve velmi krátké době shoří. Ohniště musí být navrženo tak, aby plamen vyplňoval celý obsah ohniště a aby nedocházelo k opalu (narážení plamene na chladné stěny). Dochází tak k vypuzování sazí z ochlazeného plamene, jenž vede ke zvýšenému namáhání stěn ohniště. Vzniklé saze zhoršují přestup tepla, protože dochází k jejich ukládání na výhřevných plochách a také odcházejí se spalinami do ovzduší a znečišťují ho [7, 13].

Rozdělení hořáků spalujících kapalná paliva:

- Hořáky s mechanickým rozprašováním – vířivé,
- Hořáky s cizím rozprašovacím médiem.

Kotle spalující kapalná paliva, nejčastěji používají olejové hořáky s tlakovým rozprašováním a recirkulací oleje. Obr. 14 přibližuje konstrukční provedení hořáku. Kapalně palivo je dopraveno do rozprašovací trysky a musí dojít k předúpravě rozprašovaného spalovaného paliva. Kapalina se předehřívá na teplotu, při které dojde ke snížení viskozity na $3 \cdot 10^{-5} [\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$ a méně, zároveň do rozprašovací trysky vstupuje kapalina s tlakem 2,5–7 MPa. Regulační rozsah hořáku uvedeného na Obr. 14 je relativně malý (1:2), protože tlak je přímo úměrný odmocnině tlaku paliva a s nízkým tlakem nastává špatné rozprašování paliva (velikost kapiček se pohybuje v rozmezí 30–50 μm). Zapalování hořáku se provádí elektricky, například vysunovací žhavenou sondou, nebo vysokonapětovými jiskrovými elektrodami [5, 13].



Obr. 14 Hlavice hořáku s tlakovým rozprašováním a recirkulací oleje [2]

Spalování kapalného paliva doprovází vznik nežádoucích látek znečišťující ovzduší. K zmenšení emisí NO_x se využívá například stupňovitého přívodu vzduchu do procesu spalování, který snižuje oxidy dusíku vznikající při spalování olejů s vyšším podílem palivového dusíku. [7].

Ke snižování emisí CO, sazí a VOC při spalování těžkých topných olejů přispívá použití vodní páry při atomizaci, tvorby emulze vody rozptýlené v palivu. Pro redukci uvedených emisí je doporučeno zmenšovat teploty plamene cestou ochlazování spalin [7].

Emise SO_x (SO_2 , SO_3) jsou dány obsahem síry a alkálií (Na, K, Ca) v kapalném palivu. Spalování při nižších teplotách, koncentrace kyslíku a katalýza oxidace SO_2 se sloučeninami vanadu vede ke snížení SO_x [7].

3.2 Hořáky spalující plynná paliva

Plynné palivo v hořácích lze spalovat s nízkým přebytkem vzduchu ($\alpha = 1,05 - 1,01$) při vysoké účinnosti (96–97 %). Dané palivo se totiž dobře mísí se vzduchem a vznikne vhodně promíchaná směs pro spalování [5,13].

Vysoká účinnost zařízení je dána [1]:

- Snížením komínové ztráty – nižší teploty rosného bodu spalin (teploty pod 70 °C) a spalování s nízkým přebytkem vzduchu,
- Odpadá ztráta hořlavinou ve spalinách a v tuhých zbytcích,
- Odpadá ztráta citelným teplem tuhých zbytků,

- Částečné využití kondenzačního tepla vodních par ve spalínách

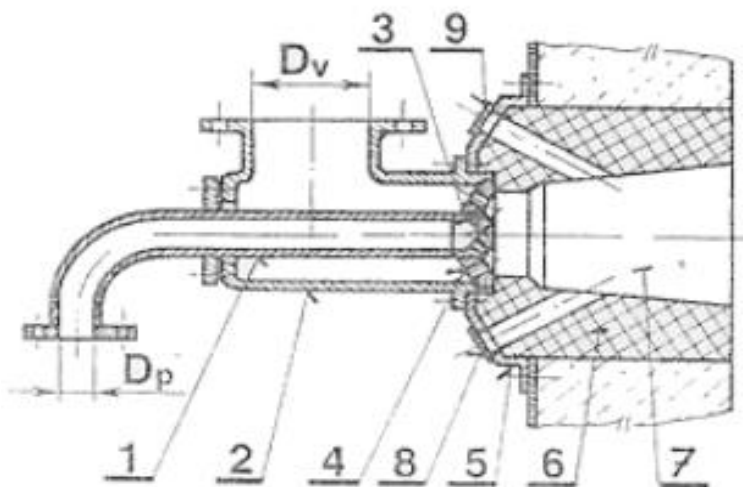
Plynové hořáky jsou navrhovány takovým způsobem, aby kinetická energie proudu vzduchu a plynu byla přibližně stejná [1].

Hořáky rozdělujeme podle směšování paliva na [1, 8]:

- Směšovací – směs se připraví v hořáku; do směšovacích hořáku patří:
 - ejektorové spalovací – vzduch je přiváděn ejekčním účinkem,
 - vířivé v hořáku – dochází k částečnému smísení vzduchu se směsí,
- Proudové – proud par plynů se mísí až v ohništi.

Další rozdělení hořáků můžeme nalézt v [8], kde jsou podrobně popsány jednotlivá rozdělení hořáku spalující plyná paliva (výhradně zemní plyn).

Vířivý hořák uvedený na Obr. 15, se nejčastěji využívá pro topení v kotlích bez větších nároků na rovnoměrnost ohřevu. Jako hnací médium se využívá vzduch o tlaku 4 kPa a přisává plyn pod nízkým přetlakem 8 kPa. Tento hořák obsahuje speciální regulátor, který udržuje konstantní tlak plynu. Ústí hořáku je osazeno mřížkou proti zpětnému prošlehnutí (může vzniknout změnou tlaku plynu a tahu v ohništi). Otvary vzduchových trysek bývají skloněny k ose hořáku a tangenciálně natočeny. Směs paliva a vzduchu vstupuje do ohniště vířivým pohybem, kde dojde k jeho spálení [1, 9].



Obr. 15 Vířivý hořák s plynovými a vzduchovými tryskami [8]

1 – plynové těleso hořáku, 2 – vzduchové těleso hořáku, 3 – plynová tryška, 4 – vzduchová tryška, 5 – hořáková deska, 6 – hořáková tvarovka, 7 – spalovací kanál, 8 – zapalovací otvor, 9 – pozorovací otvor

Emise škodlivin plynových hořáků:

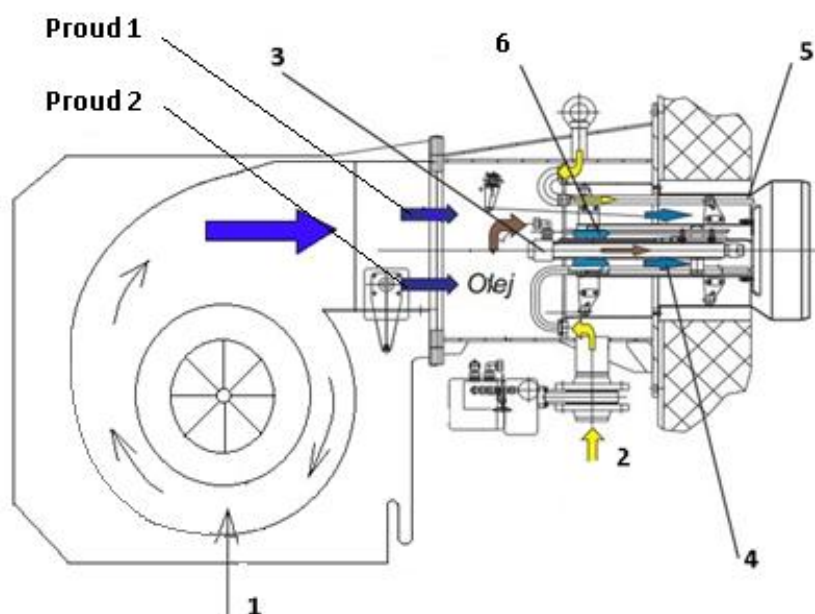
NO_x (NO, NO₂) – Ke snižování NO_x se využívá stupňovitého přívodu vzduchu, snižování vstupní koncentrace kyslíku částečnou recirkulací spalin a zabránění spalování při vysokých teplotách (přes 1300 °C). Při spalování zemního plynu nedochází ke vzniku VOC a sazí. Pokud není zajištěn dostatečný přívod vzduchu, dochází ke špatnému promíchávání vzduchu při spalování zemního plynu a mohou vznikat emise CO, formaldehydu, metanolu aj. [7].

4 Hořák TEMINOX GLS 95–30a

Monoblokový hořák TEMINOX GLS 95–30a s integrovaným ventilátorem do hořáku slouží výhradně k výrobě tepla spalováním zemního plynu. Hořák je robustní, založený na technologii tlakového rozprašování, a dodržuje nejmenší emisní limity pro NO_x. Nízké limity oxidu dusíku lze splnit, i když je použit přehřátý vzduch. Emisní hodnoty jsou dosaženy dělením hořlavého průtoku na primární a sekundární proudění plynu. Princip je znázorněn na Obr. 16 [21,34].

Tab.10 Parametry hořáku TEMINOX GLS 95–30a [32]

Hořák SAACKE TEMINOX GLS 95–30a		
Veličina	Hodnota	Jednotka
Maximální výkon hořáku	9,5	MW
Jmenovitý výkon motoru dmýchadel (elektrický)	30	kW
Plynový odpor hořáku (plyn)	160	mbar
Hmotnost hořáku, vč. tlumiče hluku a ventilátoru	1040	kg
Teplota nasávaného vzduchu	25	°C
Druh regulace	plynulá	
Regulační rozsah hořáku (plyn)	7	
Maximální regulovatelný rozsah	1:3	
Minimální regulovatelný rozsah	1:7	
Hladina akustického tlaku 1 m od hořáku (bez tlumiče hluku)	98	dB(A)



Obr. 16 Schéma vedení vzduchu a paliva v monoblokovém hořáku GLS [21]

1. spalovací vzduch primární, 2. hlavní palivo plyn, 3. olejová tryska, 4. sekundární vzduch, 5. plynová tryska, 6. vnitřní vzduch.

Dle Obr. 16 je patrné, že spalovací vzduch je přiváděn pomocí ventilátoru a následně rozdělen na dva hlavní proudy. Primární vzduch proudí s velkou rotací do spalovací komory, tím se zajistí dobré promíchání paliva se spalovacím vzduchem a zabezpečí se dostatečné omezení teploty plamene.

Sekundární vzduch v Obr. 16 je zaznačen číslem 4. Je veden tryskami, které ho usměrňují okolo spalovacího vzduchu. Trysky působí jako injektor a zajišťují recirkulaci v reakční komoře.

V blízkosti ústí hořáku, v malých zónách nesmí plamen překročit vysoké teploty nad 1300 °C. Při překročení vzniká největší podíl termického oxidu dusičného s následným vznikem okamžitého NO. Vyrovnané teplotní pole ve spalovací zóně zamezí vzniku termického NO pomocí vířivého plamene. Na Obr. 17 je znázorněn vířivý plamen s malými teplotními rozdíly, které odstraňují teplotní špičky a vyrovnávají teplotní pole [22].

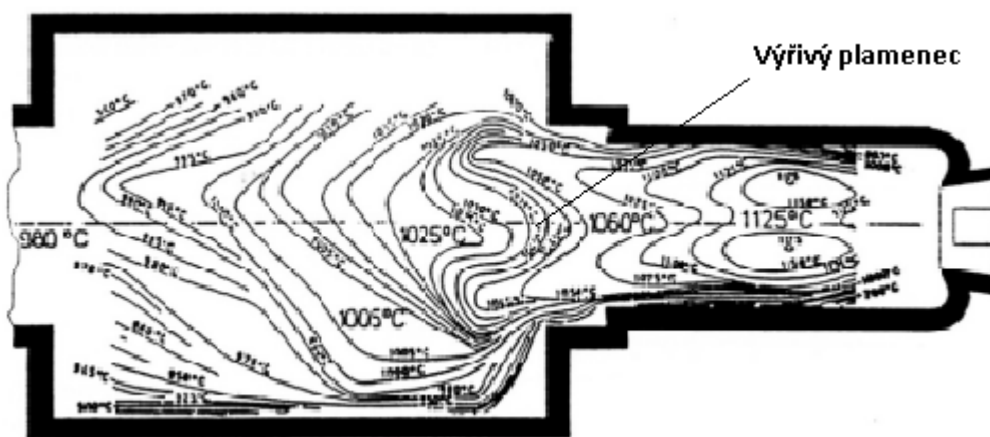
Maximální přípustné hodnoty emisí vznikající v hořáku nám ukazuje Tab. 11. Hodnocení emisí je podle uvedené normy.

Tab.11 Emisní hodnoty hořáku [32]

Emisní hodnoty	Provoz s použitím zemního plynu	Jednotky
Přípustné emise NO _x	95 *	mg/m ³ _N
Přípustné emise CO	50 *	mg/m ³ _N
O ₂ velké zatížení	3,5 - 5,0 **	obj. %
O ₂ malé zatížení	1,5 - 3,0 **	obj. %
Hodnocení emisí podle	EN 267/676	

* Při 3 objemových procentech kyslíku O₂ v suchých spalínách

** Podle skutečného regulačního rozsahu



Obr. 17 Teplotní pole silně rotujícího plamene [22]

4.1 Popis hořáku TEMINOX

Hořák se skládá ze zapalovacího zařízení, zařízení pro regulaci poměru vzduch-palivo, zdvojenou bezpečnostní uzavírací armaturou paliva. Dále z převodníku tlaku, který reguluje výkon, ventilátoru spalovacího vzduchu s motorem, jenž je zabudován na hořáku. Spalovací automat řídí hořák na plyn pomocí mikroprocesoru a kontroluje plamen v trvalém provozu podle EN 12953. Pomocí regulace otáček je možné ventilátor spalovacího vzduchu optimálně provozovat ve všech pracovních bodech. Zabrání se vysokým ztrátám škrcením u vzduchové klapky a tím se sníží příkon, uspoří proud, sníží hlučnost a zatížení sítě během spouštění. Celý monoblokový hořák včetně ventilátoru je zvukově zaizolován [30, 33].

Regulace kyslíku je zajištěna pomocí měřící sondy kyslíku, hlídacího a regulačního modulu kyslíku s lambda-převaděčem. Použitím regulace kyslíku se zvýší úspora paliva až o 2 % v důsledku udržování konstantního poměru zbytkového kyslíku ve spalínách. Kompenzuje rušivé vlivy na spalování, např. změnu teploty, tlak vzduchu a výhřevnost paliva. Kvalita spalování se kontroluje pomocí měření obsahu kyslíku ve spalínách [30, 33].

5 Znečišťování ovzduší

Lidské činnosti různého typu ovlivňují kvalitativní i kvantitativní charakteristiky složek prostředí. S pojmem ovzduší souvisí různé pojmy, například znečištění, kvalita a ochrana životního ovzduší. Ochrana ovzduší má za cíl chránit vnější a vnitřní ovzduší před vnášením znečišťujících látek do troposféry prostřednictvím komplexních opatření vedoucí ke zmírnění, zastavení anebo ke snížení úrovně znečištění ovzduší. Česká republika se v minulosti řadila mezi největší znečišťovatele ovzduší v Evropě, avšak v posledních letech došlo k podstatnému zlepšení. Od roku 1990 do roku 2011 došlo k poklesu emisí NO_x o 44 % [14, 15].

Pojmem znečištění ovzduší se rozumí přítomnost látek v ovzduší neboli imise. Imise představují znečištěné látky volně rozptýlené v ovzduší. Projevují se nepříznivým vlivem na životní prostředí a mohou měnit vlastnosti zemské atmosféry. Měření se provádí v okolí zdroje znečišťování a měří se např. těžké kovy nebo znečišťující látky ukládající se v živých organismech nebo v půdě. Imisní limit je nejvyšší přípustná hodnota rozptýlených znečišťujících látek v ovzduší. Hodnota se uvádí se v $\mu\text{g}/\text{m}_N^3$ [14, 15].

Znečišťování ovzduší neboli emise je vypouštění látek z bodového zdroje znečištění kontaminující atmosféru. Podle původu zdroje se emise dělí na přirozené a antropogenní. Mezi přirozené zdroje znečištění se řadí zejména bakteriální činnost v půdě, sopečné a prašné bouře aj. Antropogenní zdroje jsou veškeré zdroje, které souvisejí s lidskou činností, především výroba elektrické energie, tepla, doprava, zemědělství a likvidace odpadu. Měření se provádí přímo u zdroje znečišťování. Emisní limit je nejvyšší přípustné množství znečišťujících látek, které lze dle platné legislativy vypustit do ovzduší a hodnota se uvádí v mg/m_N^3 [14, 15].

Při spalování plynných paliv vznikají především oxidy dusíku a oxid uhelnatý. Znečišťující látky se sledují kontinuálně nebo jednorázově při autorizovaném měření a jsou omezeny platnou legislativou specifickou pro spalování plynných paliv ve stacionárních zařízeních. Dalšími druhy plynných škodlivin jsou například chlorovodík, chlor, fluorovodík, uhlovodíky a oxidy síry, jejichž koncentrace jsou velmi nízké a zanedbávají se [7].

5.1 Oxid uhelnatý

Bezbarvý, hořlavý a prudce jedovatý plyn bez zápachu, lehčí než vzduch. Teplota varu oxidu uhelnatého činí $-192\text{ }^\circ\text{C}$. Je málo rozpustný ve vodě a hoří namodralým plamenem. Vzniká z nedokonalého spalování materiálů s obsahem uhlíku [32].

Zdrojem emisí jsou procesy založené na spalování uhlíkatých paliv za nízké teploty (nedochází k úplné oxidaci), na nedostatku spalovacího vzduchu (kyslíku), kdy nedochází k úplné oxidaci uhlovodíků na oxid uhličitý a vodní páru. Většina emisí pochází ze spalovacích motorů, ze spalování fosilních paliv v menších lokálních kotelnách, domácích topeništích a ohnišť [23, 32].

Mechanismus vzniku oxidu uhelnatého:

- Spalování uhlíku s malým množstvím páry,



- Reakce vodní páry s uhlíkem za působení vyšších teplot.

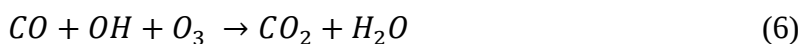


5.1.1 Vliv oxidu uhelnatého na životní prostředí

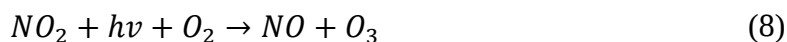
Oxid uhelnatý je velmi jedovatý plyn. Vstupuje vdechováním do krevního oběhu, váže se na krevní barvivo (hemoglobin) silněji než kyslík a je prostřednictvím hemoglobinu transportován do orgánů a tkání. Brání přenosu kyslíku a dochází k udušení organismu [32].

Malé koncentrace oxidu uhelnatého, které se mohou vyskytovat i běžně v ovzduší, např. ve městech, mohou způsobovat vážné zdravotní potíže. Delší expozice zvýšené koncentrace oxidu uhelnatého v ovzduší ($>100 \text{ mg/m}^3$) může snižovat pracovní výkonnost, manuální zručnost, schopnost studovat aj. V případě zvýšené koncentrace oxidu uhelnatého v ovzduší se otrava projevuje hnědočerveným zabarvením kůže, následují kóma, křeče a smrt [23, 33].

Oxid uhelnatý pomalu oxiduje s OH radikálem, charakteristická doba setrvání v troposféře je 1–4 měsíce. Mechanismus reakce je popsán v rovnici [14]:



Hydroperoxylový radikál reaguje v troposféře s oxidem dusnatým (viz rovnice 7, 8) [14]:



Průběh reakce zvyšuje koncentrace metanu a přízemního ozonu v ovzduší. Oxid uhelnatý lze označit díky jeho přeměně na oxid uhličitý jako skleníkový plyn, který přispívá k oteplování planety [32].

Ke snižování znečišťujících látek oxidu uhelnatého napomáhá vyšší teplota spalování (nad 850°C), dostatečný přísun okysličovadla do spalovacího procesu (nad 3–4 obj. % O_2) a delší setrvání spalin ve spalovací komoře (nad 1 s) [7].

5.2 Oxidy dusíku

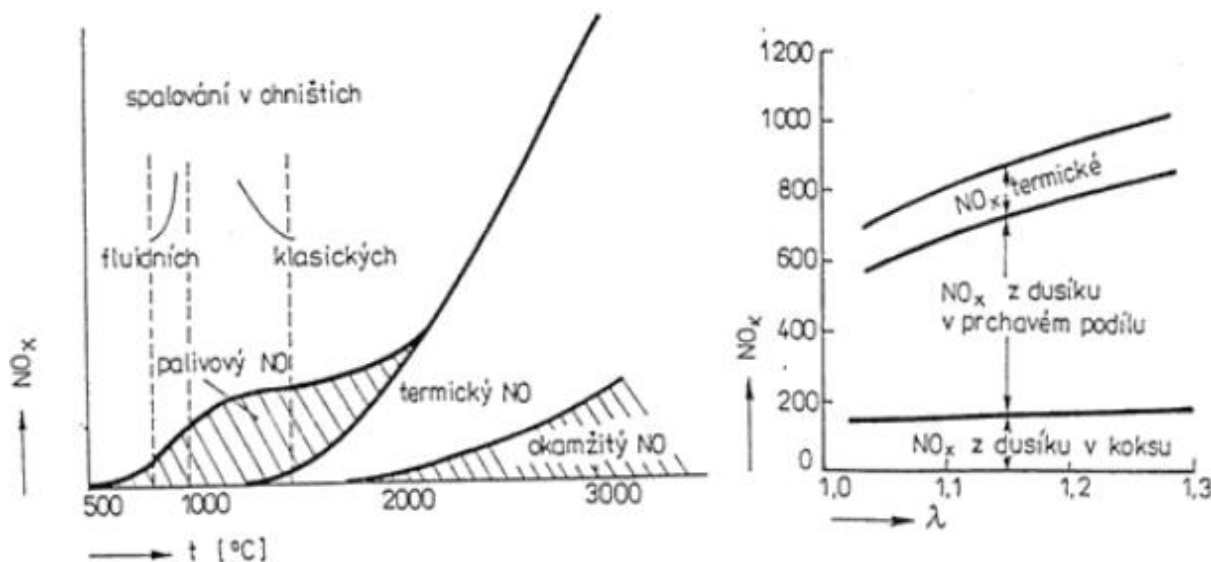
Označením oxidy dusíku rozumíme celou škálu oxidů dusíku. Nejčastěji se však odkazuje na tzv. „noxy“ – oxid dusnatý (NO) a oxid dusičitý (NO_2). Do této skupiny patří další oxidy dusíku – oxid dusitý (N_2O_3) a oxid dusný (N_2O). Tyto se vyskytují v ovzduší v tak malém množství, že nepředstavují potenciální riziko [24, 33].

Oxidy dusíku se vytvářejí při spalování paliv v chemickém průmyslu při výrobě kyseliny dusičné a v dalších chemických procesech. Při spalování ve stacionárních zařízeních má největší podíl oxid dusnatý 90–99 %, z celkového obsahu NO_x [14, 15].

5.2.1 Mechanismy tvorby oxidu dusíku

Oxid dusnatý vznikající při spalování paliv lze rozdělit podle mechanismu vzniku do tří kategorií [15, 24]:

- Oxidace chemicky vázaného dusíku v palivu, tzv. promptní NO,
- Oxidace kyslíku při spalování za působení vysokých teplot, tzv. termický NO,
- Radikálové reakce na rozhraní plamene z chemicky vázaného dusíku, tzv. palivový NO.



Obr. 18 Vliv teploty a součinitele přebytku vzduchu na mechanismus tvorby NO při spalování [10]

Obr. 18 ukazuje, že čím je teplota vyšší při spalování, tím více oxidu dusíku vzniká. Výsledným produktem všech uvedených mechanismů je oxid dusnatý, který v přítomnosti kyslíku oxiduje na oxid dusičitý [24].

Termický NO – též nazývaný vysokoteplotní NO, vzniká uvnitř spalovací zóny radikálovou reakcí dusíku s kyslíkem. Termický oxid dusnatý vzniká za působení vysokých teplot přesahujících 1300 °C. Další faktor ovlivňující vznik je koncentrace atomárního kyslíku vzniklého disociací O₂ a doba zdržení v horké zóně [14, 15, 24].

Rozšířený modifikovaný Zeldovičův mechanismus popisuje vznik termického NO v následujících rovnicích [14]:

- Při přebytku kyslíku O₂:

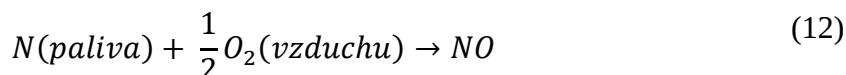


- Při přebytku paliva:



Omezení vzniku termického NO lze dosáhnout snížením teploty hoření, lokální koncentrace kyslíku v místě nejvyšších teplot a zkrácením doby zdržení v pásmu vysokých teplot [14].

Palivový NO_x – vzniká v oblasti plamene oxidací dusíku chemicky vázaného v palivu. Jeho vznik je doprovázen meziprodukty, amoniakem a kyanovodíkem, které oxidují na NO. Proces vzniku je přiblížen reakcí [25, 33]:



Promptní NO_x – též nazývaný okamžitý oxid dusíku, vzniká v oblasti nejvyšších teplot v počáteční fázi hoření a tvoří se na okraji plamene. Zde dusík reaguje s uhlovodíkovými radikály a produkt této reakce následně oxiduje na oxid dusnatý a celý proces je závislý na dostatečném přebytku spalovacího vzduchu a na vysoké teplotě spalování [25, 33].

Celkový podíl na obsahu NO_x je zanedbatelný, maximálně 10 obj. % z celkového obsahu NO_x.

Oxid dusičitý (NO₂) je červenohnědý dráždivý plyn, silně oxidující a je štiplavě, dusivě páchnoucí. Není příliš rozpustný ve vodě, v kombinaci s uhlovodíky a slunečním zářením NO₂ vytváří ozón a organické peroxidy i PAN (polyakrylnitrát). Vzniká spolu s oxidem dusnatým při spalování, avšak ve velmi malém zastoupení, průběh reakce je uveden v rovnici 13 [25, 33].

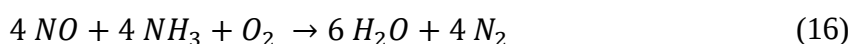
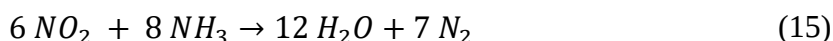
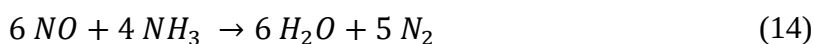


K omezení emisí oxidu dusíku se používají dvě metody [7]:

- Primární,
- Sekundární.

Primární metoda omezuje tvorbu NO, mezi nejužívanější přístupy patří. Vícestupňovité spalování paliva, částečná recirkulace spalin, úprava konstrukce hořáku, postupný přívod paliva s přesným dávkováním spalovacího vzduchu a omezením nejvyšší teploty plamene nebo spalování (chlazení paliva vzduchem). Primární opatření při spalování dosahují snížení emisí NO_x o 40–70 % [7, 15].

Sekundární metoda představuje rozklad již vytvořených oxidů dusíku za pomoci různých chemických reakcí. Nejčastěji používaná metoda je tzv. selektivní katalytická redukce NO_x, kde se do spalin přidává amoniak, čpavková voda nebo močovina, která reaguje s NO_x. Katalyzátor je tvořen materiály s účinnou látkou obsahující vanad, titan, molybden a jiné kovy [7]. Selektivní katalytická redukce probíhá za vyšších teplot (nad 220 °C), aby nedocházelo ke vzniku úsady amonných solí na katalyzátoru. Na povrchu katalyzátoru probíhají reakce, které jsou popsány v následujících rovnicích 14,15,16 [7]:



Sekundární opatření redukuje emise oxidu dusíku u spalovacích procesů o 70-85 %. [7].

5.2.1 Vliv NO_x na životní prostředí

Oxid dusičitý společně s kyslíkem a dalšími těkavými látkami přispívá ke vzniku přízemního ozonu, který se podílí na zhoršení fotosyntézy u rostlin. Oxidy dusíku, především oxid dusnatý a oxid dusný, se podílí na vzniku skleníkového efektu, který následně přispívá ke globálnímu oteplování (např. snižují poločas rozpadu metanu a freonů). Oxid dusičitý spolu s oxidy síry se podílí na vzniku kyselých dešťů, jejichž účinkem dochází k ničení vegetace, staveb a k acidifikaci půdy a vodních toků [25, 26, 33].

NO_x působí na buněčné úrovni oxidačním mechanismem, pravděpodobně reagují přímo s povrchovými lipidy membrán endotelových buněk a mění jejich funkce, s čím souvisí vznik mutagenních a karcinogenních onemocnění [33].

Oxid dusičný není příliš rozpustný ve vodě, snadno proniká do plicní periferie. Nitrosní plyny působí při vdechnutí velmi toxicky, vzhledem k plicnímu edému. Vysoká koncentrace vdechnutá člověkem může mít i smrtící efekt. Kontakt s kapalinou vyvolává poleptání kůže a očí, zároveň způsobuje pálení očí a slzení. Oxidy dusíku dráždí sliznici a vyvolávají kašel, následně může vzniknout dušnost. Chronické otravy mohou být příčinou větší kazivosti zubů, zánětu spojivek aj. Prahová koncentraci pachů je zhruba mezi 200 až 410 µg/m³ [24, 33].

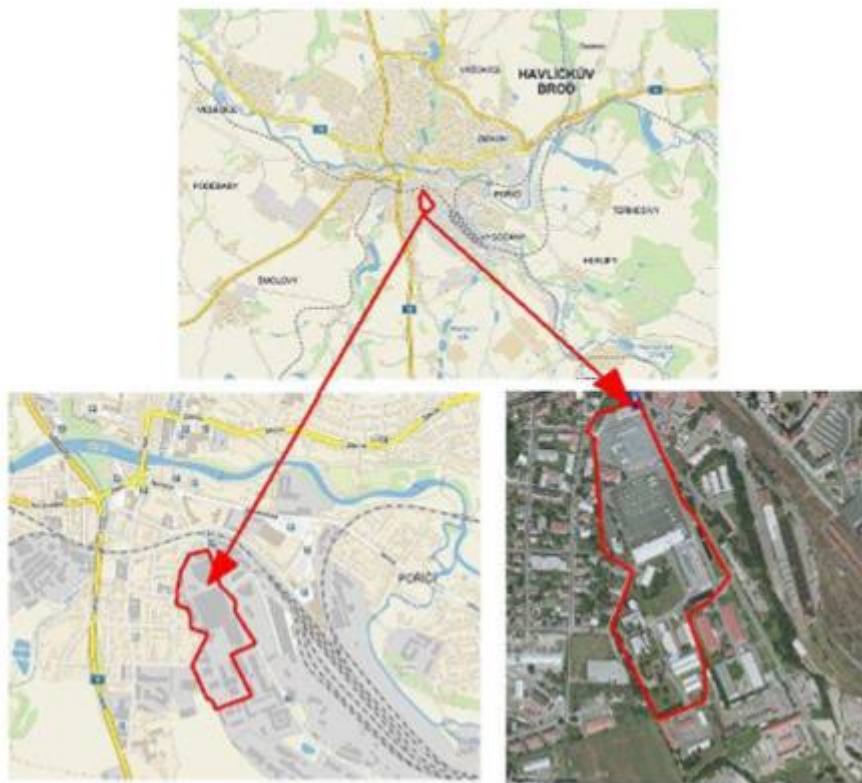
6 Experimentální část

Experimentální část této studie se zaměřuje na zhodnocení emisí, které byly měřeny jednorázovým autorizovaným měřením a následně porovnány s hodnotami při pětiletém provozu.

Měření bylo prováděno na středotlakém parním kotli spalující zemní plyn a vyrábějící sytou páru pro technologii výroby, vytápění aj. Měl jsem možnost zúčastnit se autorizovaného měření znečišťujících látek, které se provádělo na třech kotlích umístěných v kotelně firmy PLEAS a.s. Samotné měření probíhalo dva dny a byl jsem přítomen při všech měřeních. Technik mě seznámil s průběhem měření, následně vysvětlil, za jakým účelem se provádí a poskytl informace týkající se znečišťování ovzduší potřebné ke zpracování této práce. Během měření emisí byla pořízena fotodokumentace měřících přístrojů a kotle. Veškerá dokumentace, výkresová dokumentace, naměřené hodnoty znečišťujících látek a dokumentace měření emisí, které byly použity jako podklady při psaní této práce dodala firma PLEAS a.s. a firma TOP – ENVI Tech s.r.o.

6.1 Popis objektu

Společnost PLEAS a.s. se nachází v Havlíčkově Brodě při jihovýchodním okraji města, v blízkosti významného vodního toku Kraje Vysočina – řeky Sázavy. Průmyslový podnik se zaměřuje na výrobu jakostního denního a nočního prádla. Společnost zajišťuje ve vlastních provozech všechny výrobní činnosti na úseku pletárny, barevny a konfekce. Tato se dále dělí na střihárnu, vlastní konfekční zpracování a balírnu výrobků.



Obr. 19 Popis polohy objektu PLEAS a.s. [26]

6.1.1 Popis kotelny

Kotelna se nachází v areálu závodu. Výrobu zajišťují energetická spalovací zařízení o celkovém tepelném příkonu 20,631 MW. Spalovací zařízení se skládají ze tří kotlů K1, K2, K3 spalující zemní plyn z distribuční sítě. Jejich technické specifikace jsou uvedeny v Tab. 12.

V této práci bude pojednáno o kotli UNIVERSAL UL-SX o jmenovitém tepelném příkonu 7,043 MW. Výsledným produktem je technologická pára a horká voda pro výrobu TUV a pro potřeby UT. Uvedené kotle se neprovozují současně, ale střídají se podle potřeby odběru páry.

Kotle K1 a K2 jsou vybaveny nízkoemisními hořáky a jsou bez zařízení k odlučování nečistot ve spalínách. Parní kotel K3, jehož těleso kotle je tvořeno vlnitým plamenecem, přední a zadní obrátovou komorou a dvoutahovou teplosměnnou konvekční částí se využívá zřídka. Kotel se zařazuje do provozu při případném odstavení kotle K1 nebo K2, kde doplní stávající kotel, jenž je v provozu.

Odtah spalin od kotlů je řešen u kotlů K1 a K2 samostatnými izolovanými kouřovody vedoucí přes zeď haly do samostatných fasádních komínů. Spaliny z kotle K3 jsou samostatně odváděny původním ocelovým izolovaným kouřovodem přes zeď haly do továrního komína.

Tab.12 Technické údaje kotlů [29]

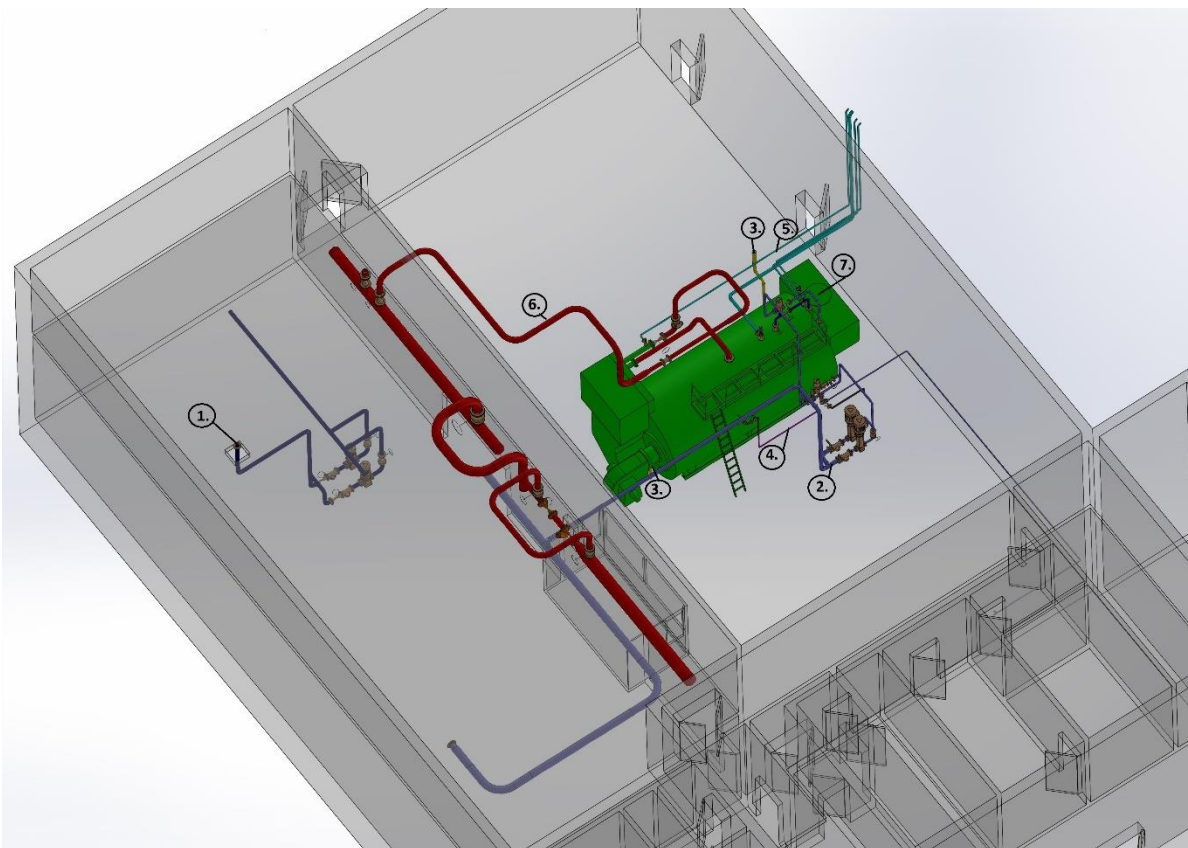
Označení kotle	K1	K2	K3
Výrobce	LOOS Bosch Group	BOSCH industriekessel	První brněnská strojírna
Typ	UL-SX 6000	UL-SX 10 000	12 I/H
Rok výroby	2011	2013	1974
Jmenovitý tepelný příkon	4,240 MW	7,043 MW	9,348 MW
Jmenovitý tepelný výkon	4,045 MW	6,726 MW	8,892 MW
Tepelná účinnost	95,40 %	95,50 %	89,50 %
Integrovaný ekonomizér	ano	ne	ne
Palivo	zemní plyn	zemní plyn	zemní plyn

Technické údaje hořáku	K1	K2	K3
Výrobce	SAACKE Bremen	SAACKE Bremen	První brněnská strojírna
Typ	GS 55-15	GS 95–30a	VKH 1000 - 1AR
Rok výroby	2011	-	1989
Jmenovitý výkon	4,040 kW	7,040 kW	11 MW

Umístění kotle K2 v kotelně zachycuje Obr. 20. Světle modrá barva potrubí, vycházejícího z kotle značí odplynění/odvzdušnění. Kouřovody, které jsou vedeny přes zeď do samostatných fasádních komínů, nejsou v Obr. 20 vyznačeny, pouze je označeno umístění vývodu spalin na ekonomizéru.

ČSN EN 1775 ed. 2 (2009) Zásobování plynem – Plynovody v budovách, udává barevné označení plynovodu. Plynovod je značen žlutou barvou a vstupuje do hořáku. Potrubí vedoucí technologickou párou dle ČSN 130072 - Označování potrubí podle provozní tekutiny, je určeno červenou barvou. Potrubí, které vede technickou párou, vystupuje z bubnu a je vedeno do přehříváku, kde se pára ohřívá na konstantní teplotu předtím, než opustí kotel a je vedena do provozu. Tmavě modrou barvou je značené potrubí napájecí vody. Voda přichází z nádrže napájecí vody přes napájecí čerpadla, regulace napájecí vody a vstupuje do ekonomizéru (EKO1), kde se ohřívá na teplotu 105 °C. Potrubí na levé straně značené modrou barvou je vývod kondenzátu. Voda prochází přes monitoring kondenzátu, kondenzátní nádrž, čerpadla a je tlačena do nádrže napájecí vody.

Odluhové potrubí na Obr. 20 zaznačené číslem 4 je označeno fialovou barvou. Odkalové potrubí je umístěno ve spodní části kotle a není zaznačeno na obrázku.



Obr. 20 Umístění kotle K2 v kotelně [vlastní tvorba]

1. kondenzátní potrubí, 2. napájecí voda, 3. potrubí se zemním plynem, 4. odluh, 5. odplynění, 6. potrubí vedoucí technologickou párou, 7. místo pro umístění kouřovodu.

6.2 Účel měření

Účelem jednorázového autorizovaného měření emisí bylo stanovení hmotnostních emisních koncentrací, hmotnostních emisních toků a měrných výrobních emisí znečišťujících látek. Měřený zdroj je zařazen jako stacionární vyjmenovaný zdroj podle přílohy č. 2 Zákona č. 201/2012 Sb. o ochraně životního prostředí a řazen podle kódu 1.1 – Spalování paliv v kotlích o celkovém jmenovitém tepelném příkonu nad 5 MW.

Autorizované měření proběhlo v rozsahu měřených látek oxidu dusíku vyjádřeného jako oxid dusičitý, oxid uhelnatý, kyslík a stanovení vzduchotechnických parametrů. Naměřené hodnoty z jednorázového měření se porovnály s předepsanými limity uvedenými ve Vyhlášce č. 452/ 2017 sb. v platném znění, která upravuje Vyhlášku č. 415/2012 Sb. o přípustné úrovni znečišťování a jejím zjišťování a o provedení některých dalších ustanovení Zákona o ochraně ovzduší. Veškeré měření proběhlo dle zákona o ochraně ovzduší č. 201/2012 sb. v platném znění, Vyhlášky č. 452 / 2017 Sb. v platném znění., příručky jakosti Laboratoře kvality ovzduší TOP-ENVI Tech Brno, s.r.o. a příručky kvality Zkušební laboratoře kvality ovzduší TOP-ENVI Tech Brno, s.r.o.

Vyhláška č. 452/2017 která vstoupila v platnost 1. 1. 2018, upravuje Vyhlášku č. 415/2012. Novelizace s sebou přináší např. stanovení specifických emisních limitů pro látky, které obtěžují svým zápachem, vyhláška nově stanovuje (NO_x) jako oxid dusnatý a oxid dusičitý vyjádřené jako oxid dusičitý. Novela částečně upravuje vyhodnocování jednorázového a kontinuálního měření (§5 a §8), a také zpřísňuje emisní limity pro spalovací stacionární zařízení, které má celkový jmenovitý výkon vyšší než 0,3 MW a nižší než 50 MW.

6.3 Charakteristika použitých metod měření

Cílem měření bylo stanovení koncentrace plyných složek a kyslíku v emisích a stanovení vzduchotechnických parametrů. Posuzované koncentrace plyných složek byly měřeny kontinuálním analyzátozem HORIBA ENDA 661, jehož systém ENDA 661 je postaven na základě NDIR infraanalyzátorů HORIBA a umožňuje současně měřit koncentrace NO_x, SO₂, CO a O₂ jedním analyzátozem v kouřových plynech. Pro odstranění interferencí je v analyzátoru použit detektor kompenzující vlivy vlhkosti a CO₂. Pro odstranění koncentrace O₂ je v analyzátoru použit paramagnetický detektor. Analyzátor je vybaven konvertorem NO₂-NO typ COM 1, kde dochází k redukci oxidu dusičitého na oxid dusnatý. Měřené hodnoty byly zaznamenány a zpracovány měřicí ústřednou spojenou s osobním počítačem.



Tab.13 Zařízení HORIBA [35]

Název měřidla	analyzátor HORIBA
Typ měřidla	ENDA 661
Výrobce	HORIBA Ltd, Kyoto, Jap.
Rok výroby	1999

Měřená složka	měřicí rozsah č. 1
NO	250 ppm
SO ₂	300 ppm
CO	500 ppm

Měřená složka	měřicí rozsah č. 2
NO	1000 ppm
SO ₂	3000 ppm
CO	5000 ppm
O ₂	0–25 obj. % O ₂

Obr. 21 Analyzátor HORIBA [foto vlastní archiv]

Stanovení vzduchotechnických parametrů proběhlo pomocí výpočtu. Objemový průtok a vlhkost spalin byly stanoveny výpočtem ze spotřeby zemního plynu (měřen obsah kyslíku a teplota spalin). K výpočtu množství kouřových plynů, které vzniknou při spalování zemního plynu, bylo použito spalovací rovnice pro zemní plyn (použité složení ZP: 98,4 % CH₄, 0,4 % C₂H₆, 0,2 % C₃H₈, 0,1 % C₄H₁₀, 0,2 % CO₂, 0,2 % N₂) s obsahem kyslíku ve spalovacím vzduchu 20,90 obj. %. Stanovení pomocí výpočtu bylo provedeno z důvodu nemožného zvolení odběrového místa pro zjištění vzduchotechnických parametrů v úsecích kouřovodu tak, aby měření mělo význam.

6.4 Popis průběhu autorizovaného měření

Stanovování emisí bylo prováděno za standartního provozu. Bylo realizováno formou jednorázového kontinuálního šestihodinového měření plynných složek znečišťujících látek (viz kapitola 6.2) a alespoň tři jednorázových stanovení vzduchotechnických parametrů ze vzorkovacího průřezu.

Pracovní postup byl rozdělen do několika částí:

- Příprava před měřením,
- Příprava analyzátoru HORIBA k měření,
- Příprava odběrové trasy,
- Kalibrace analyzátorů,
- Zkouška těsnosti odběrové trasy,
- Vlastní měření analyzátozem.

6.4.1 Příprava před měřením

Před samotným měřením došlo k vizuální kontrole měřeného zdroje emisí a odběrových míst. Pomocí identifikačních štítků byly zapsány informace o měřeném kotli, zkontroloval se provozní deník měřidla a vytiskly se přípravy a interní formuláře.

6.4.2 Příprava analyzátoru k měření

Měřicí vůz byl zaparkován v blízkosti měřeného řezu na takovou vzdálenost, aby se silikonová trubice mohla připojit do analyzátoru spalin (max. vzdálenost 60 m). Po připojení analyzátoru do zásuvky 380 V byla zapnuta ústředna TRM 16J a počítač. Do zvlhčovače přístroje HORIBA byla přidána destilovaná voda pomocí injekční stříkačky, která naplnila nádobku do poloviny. Po zapnutí analyzátoru se zařízení nechalo temperovat po dobu 30 minut. Poté, co se zařízení ohřálo na určitou teplotu, byl analyzátor přepnut spínačem čerpadel a otápění primárního filtru na předúpravu. Během 10 minut byl přístroj zkontrolován, jestli se rotametry měřeného a referenčního plynu ustálily přibližně ve vyznačené části rozsahu, jenž je na pravé straně zařízení. Podle očekávaných koncentrací měřených plynů byly zkontrolovány hodnocené rozsahy jednotlivých měřených plynů.

6.4.3 Příprava odběrové trasy

Z automobilu byla vyložena otápěná sonda s měnitelnou odběrovou trubicí a keramickým filtrem, otápěná hadice a chladnička plynů (viz Obr. 23) a provedla se vizuální kontrola zařízení. Do místa odběru v kouřovodech byla umístěna měnitelná odběrová trubice vhodné

délky, jejíž rozměry byly stanoveny pomocí ocelové tyče a následně změřeny metrem. Od místa měření byla připravována odběrová trasa v pořadí: odběrová sonda, otápěná odběrová hlavice s keramickým filtrem, otápěná hadice, chladnička plynů, polyetylenová hadička od chladničky plynů vedoucí do analyzátoru.

Chladnička plynů se zapnula a připojila se zásuvka otápěné odběrové hlavice a hadice. Vzápětí se nechala temperovat na 100 °C. Teplotu jsme měli možnost kontrolovat na displeji, umístěného na chladničce plynů.

6.4.4 Kalibrace analyzátoru

Před samotnou kalibrací musí být přístroj k vyhodnocování naměřených veličin vytemperován a musí projít předúpravou – vizuální kontrola rotametrů a referenčního plynu (tj. ustálení hodnot měřených hodnot plynů zobrazených na displeji analyzátoru odpovídající přibližně čistému vzduchu). Prohlédla se hadička kalibrace analyzátoru, zda je volná a může nasávat okolní vzduch.

Kalibrace se prováděla příslušnými nulovacími a kalibračními plyny (nastavení přesné hodnoty nulového a koncového bodu). Jako nulovací plyn byl použit dusík a okolní vzduch sušený silikagelem. Kalibrační plyny jsou směsné, uloženy v tlakových lahvích (viz Obr. 22) a jejich koncentrace jsou zvoleny podle jednotlivých měřících rozsahů přístroje, které jsou uvedené v Tab. 14.



Obr. 22 Uložení kalibračních plynů v tlakových lahvích [foto vlastní archiv]

Tab.14 Rozsahy analyzátoru a kalibrační plyn [35]

Měřená složka	Měřicí rozsah	Koncentrace kalibračního plynu
oxid dusnatý NO	250 ppm	242 ppm
oxid siřičitý SO ₂	300 ppm	287 ppm
oxid uhelnatý CO	500 ppm	479 ppm
kyslík O ₂	0-25 obj. % O ₂	0 % (kalibrační plyn) 20,9 % (vzduch)

6.4.5 Zkouška těsnosti odběrové trasy

K provedení zkoušky se využívá dusík o čistotě 99,99 obj. % N₂ s obsahem kyslíku pod 0,004 obj. % O₂. Analyzátor byl spojen s chladničkou plynů pomocí silikonové hadičky. Na výstup redukčního ventilu se umístil T-kus (zajistí spojení s atmosférou), dále silikonová hadička s tlačkou (svorka vhodná pro pevné a spolehlivé uchycení hadic a trubic), orientační ukazatel podtlaku a polyetylenová hadička napojená přes plynotěsnou redukci na ústí odběrové sondy. Přes T-kus dochází k nastavení malého přetlaku dusíku proti atmosféře a počká se, než se celá trasa naplní dusíkem (díky čemuž dojde k poklesu koncentrace kyslíku pod 0,5 obj. % O₂). Následně se uzavře tlačka. Pomocí orientačního měřidla podtlaku je nastaven podtlak vůči atmosféře.

Zkouška těsnosti odběrové trasy probíhala zhruba dvě minuty. Za vyhovující podmínky se považuje, pokud měřená hodnota kyslíku klesne nebo zůstane na hodnotě 0,42 obj. % O₂ (odpovídá 2 % hodnoty koncentrace kyslíku ve vzduchu). V případě, že zjišťovaná hodnota kyslíku by byla vyšší než předepsaná hodnota O₂, musí se provést kontrola odběrové trasy, případné dotažení nebo přetěsnění všech spojení v měřené trase mezi odběrovou sondou a analyzátozem spalín. Ukončení zkoušky těsnosti odběrové trasy se provedlo uzavřením redukčního ventilu dusíku a odpojení hadičky s dusíkem od odběrové sondy.

6.4.6 Vlastní měření analyzátozem

Na začátku měření se změřil rozměr vzorkovacího průřezu, jenž byl určen pomocí kovové tyče, která se zasunula do kouřovodu a změřila se svinovacím metrem. Hodnota atmosférického tlaku se stanovila pomocí barometru a teplota nosného plynu byla měřena teplotním čidlem a vyhodnocena multifunkčním měřícím přístrojem TESTO.

Odběrová sonda, která je zobrazena na Obr. 23, byla vsunuta do odběrového místa v kouřovodu. Vzorek nosného plynu se nasával pomocí vyhřívané odběrové sondy HORIBA PSP 4000–H, která je opatřena keramickým filtrem (keramický filtr se mění v laboratoři 1× do měsíce). Vzorek byl veden otápěným odběrovým vedením (temperovaným podle potřeby až na 200 °C) do systému předúpravy vzorku HORIBA ES 600 P (viz Obr. 24). Předúprava vzorku v uvedeném zařízení je temperována na teplotu menší než 10 °C a skládá se z jemné filtrace, čerpadla a chladničky plynů sloužící k odloučení vlhkosti nosného plynu.



Obr. 23 Odběrová sonda HORIBA PSP 4000-H [foto vlastní archiv]

Vzorek upraveného nosného plynu je dopraven polyetylenovou hadičkou do analyzátoru HORIBA CMA 661. Analyzátor je vybaven kyselinovým filtrem a konvertorem NO₂–NO, typ COM 1, kde dochází na speciálním katalyzátoru k redukci NO₂ na NO při teplotě 190 °C. Signály ze sdruženého analyzátoru HORIBA 661 byly vedeny přes sběrnou kartu do měřicí ústředny TESO TRM 16J. Data přebíral počítač s programem WDAT 3,02, kde byly také vyhodnoceny. Program zaznamenával 30 minutové koncentrace jednotlivých analyzovaných látek a zobrazoval grafický záznam v průběhu zkoušky.



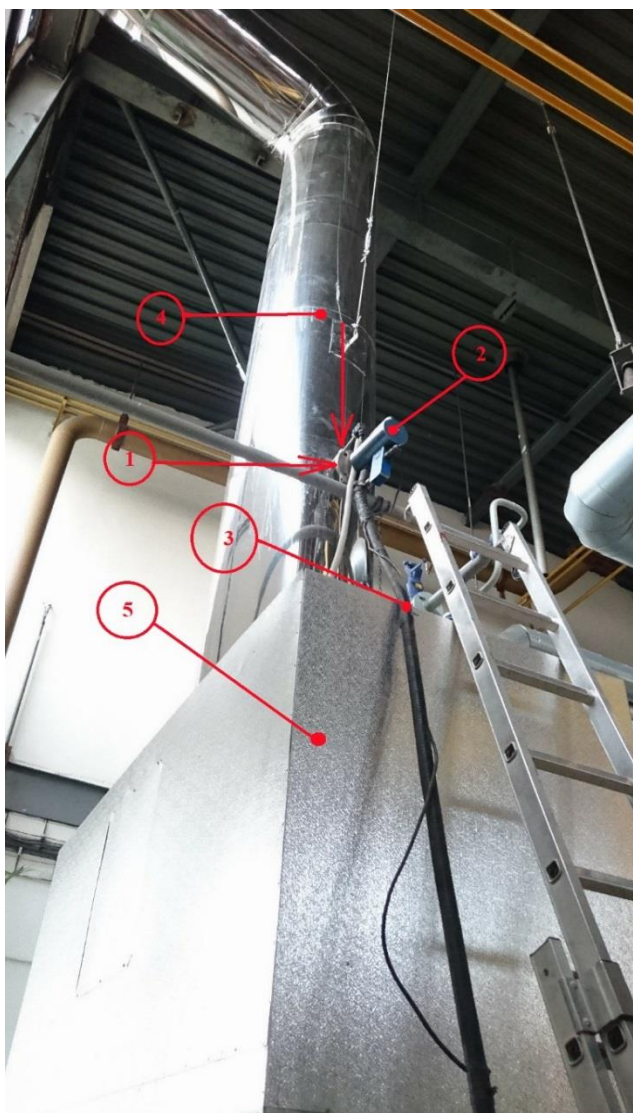
Obr. 24 Zařízení pro předúpravu vzorku HORIBA ES 600 P [foto vlastní archiv]

6.5 Popis odběrových míst

Odběrové místo spalín je umístěno za kotlem v kouřovodu ve výšce 5,5 m od podlahy kotelny a je znázorněno na Obr. 25.

Průřez je kruhový o průměru 0,5 m. Pomocí vztahu pro výpočet obsahu kruhového průřezu lze zjistit plochu vzorkovacího průřezu a následně zjistit teoretickou rychlost spalín v komíně.

$$S = \frac{\pi \cdot D^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0,5^2}{4} = 0,196 \text{ m}^2 \quad (17)$$



Obr. 25 Odběrové místo v kouřovodu [foto vlastní archiv]

1. odběrové místo, 2. odběrová sonda HORIBA PSP 4000–H, 3. Otápěná hadice, 4. kouřovod, 5. ekonomizér (EKO1).

6.6 Shrnutí výsledků za 5 let

Cílem této práce je především porovnání naměřených průměrných hodnot znečišťujících látek, zejména oxidu dusíku a oxidu uhelnatého s hodnotami z předešlých let. Autorizovaná měření jsou prováděná stejnou firmou a měření probíhalo na dvou měřicích zařízeních a to na: kontinuálním analyzátoru HORIBA typ ENDA 661 a kontinuálním analyzátoru plynů AO2000 pro monitorování koncentrací plyných složek pomocí IR spektrometrie modulem URAS-14. Přístroje byly na počátku měření zkalibrovány kalibračním plynem a po ukončení měření ověřeny, zda nedošlo k chybě při měření. Hodnoty kalibračních plynů zobrazené na displeji zařízení byly na konci měření stejné, nebo nižší. Lze říci, že ze strany firmy nedošlo k pochybení, a měření bylo správně provedené.

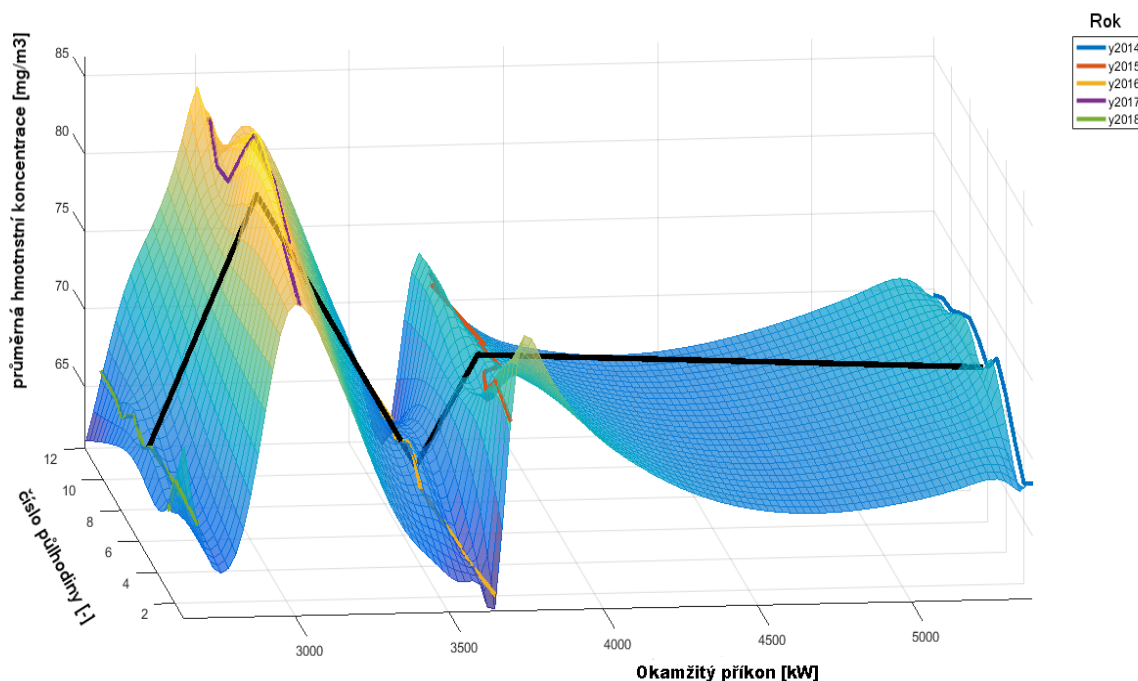
Na Obr. 26, lze vidět závislost aktuálního příkonu zařízení na času a na průměrné hmotnostní koncentraci NO_2 , která byla přepočítána na suchý plyn za normálních podmínek (101,325 kPa, 0 °C) a referenčního obsahu kyslíku v nosném plynu 3 obj. %.

Firma PLEAS a.s. vyrábí z 83 % technologickou páru a odběr není konstantní, což je možné vidět na příkonu – jeho křivka není konstantní. Kotle K1 a K2 umístěné v kotelně se vzájemně doplňují. V zimním období pracuje jako hlavní kotel K2 (10 t) a vedlejší kotel K1 (6 t) je považován za doplňující. V letním období je pořadí obrácené.

Na Obr. 26 je zřetelně vidět velký rozdíl mezi rokem 2017 a 2018, kde v roce 2017 došlo k nárůstu oxidu dusičitého o 24 % oproti roku 2018. Existuje celá řada faktorů, které mohly ovlivnit tak razantní skok. Mezi možné příčiny vzniku můžeme zařadit poruchy na hořáku (v průběhu spalování mohlo dojít ke zvýšení teploty v hořáku, avšak teplota v ústí hořáku je řízena automaticky a nelze dohledat teplotu spalin, která byla v průběhu měření), poruchy na kotli (kotel K1 mohl mít poruchu, a tedy veškerou výrobu páry převzal kotel K2, poté by byly nízkoemisní opatření neúčinné), porucha na recirkulovaných spalínách (mohlo dojít k většímu přehřátí vzduchu). Mezi další příčiny vzniku výkyvu NO_x , lze zařadit i možné pochybení servisního technika, který mohl špatně nastavit spalovací poměr vzduch / palivo.

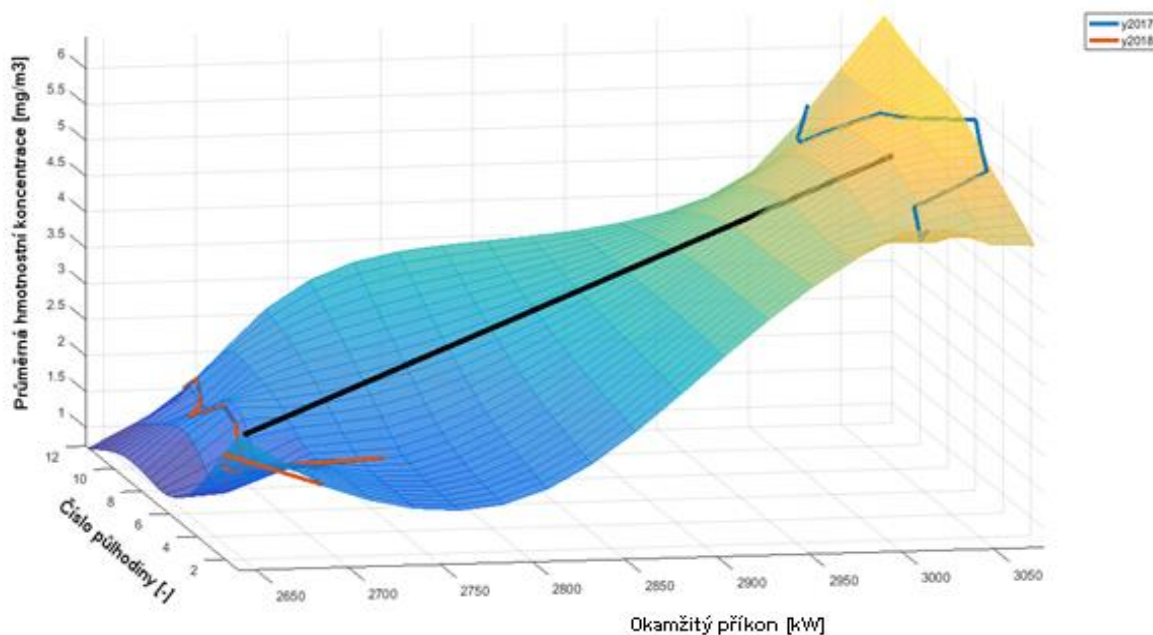
V průběhu měření nebyla zaznamenána chyba. Teplota a rychlost nosného plynu byla o 16 % vyšší (v průměru o 2 m/s a 7 °C). Zvýšení teploty a rychlosti spalin v kouřovodu lze přičíst vyššímu příkonu kotle oproti roku 2018. Také došlo k porovnání koncentrace kyslíku v nosném plynu a hodnoty se lišily o 0,11 %. To také nelze považovat za chybu.

Po prozkoumání možných příčin vzniku výkyvu jsem došel k závěru, že nelze přesně určit závalu, která ovlivnila nárůst emise NO_2 . Na tomto měření mě zaujal fakt, že při vysokém příkonu, kdy kotel pracoval na 77 % svého jmenovitého výkonu, byly daleko nižší emise, než v roce 2015, kde kotel K2 pracoval na 54 % a v roce 2017, kde příkon kotle byl 43 % jmenovitého příkonu. Důvodem je, že při servisu kotle se nastavuje spalovací poměr palivo / vzduch tak, aby při nejvyšším jmenovitém příkonu znečišťující látky vykazovaly co nejnižší hodnoty.



Obr. 26 Závislost průměrné hmotnostní koncentrace NO_x na výkonu a času [vlastní tvorba]

Na Obr. 27 je znázorněn průběh průměrné hmotnostní koncentrace oxidu uhelnatého. Zaznamenány jsou pouze dvě hodnoty, a to z roku 2017 a 2018. Emise CO z předešlých let byly pod prahem měřitelnosti a nelze je přesně určit. S jistotou lze říci, že kotel K2 splňuje emisní limity na oxid uhelnatý, jehož limit je 50 mg/m^3 . Z Obr. 27 je patrné, že v roce 2017 dosáhly emise oxidu uhelnatého nejvyšších hodnot v průběhu pěti let. Tato hodnota je desetina z limitující hranice a je patrné, že i v budoucnosti bude vyhovovat emisním limitům.



Obr. 27 Závislost průměrné hmotnostní koncentrace CO na výkonu a času [vlastní tvorba]

6.7 Porovnání měření z roku 2015 a 2018

Naměřené hodnoty koncentrací plynných znečišťujících látek, které jsou uvedené v Tab. 15 z roku 2015, byly porovnány s hodnotami nosného plynu z roku 2018. Měření, které proběhlo v roce 2015, bylo prováděno zařízením AO2000 (čtyř komponentní analyzátor plynů pro monitorování koncentrací plynných složek pomocí IR spektrometrie modulem URAS-14).

Tab.15 Parametry nosného plynu, rok 2015 [převzato z firemních dokumentů]

Číslo půlhodiny	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
C _s O ₂ [%]	2,96	2,96	2,97	3,04	3,2	3,34	3,56	3,48	3,75	3	3,25	3,14
c O ₂ [%]	2,45	2,45	2,45	2,51	2,65	2,77	2,96	2,89	3,12	2,48	2,69	2,6
C _s NO [ppm]	36	36	36	35	34	34	33	34	33	36	35	35
C _{sn} NO ₂ [mg/m ³]	73,8	73,8	73,8	71,8	69,7	69,7	69,7	67,7	69,7	67,7	73,8	71,8
C _{sn3} NO ₂ [mg/m ³]	73,2	73,8	73,9	72,4	70,6	71,4	70,7	71,2	70,1	73	71,9	71,8
M [g/h]	0,273	0,273	0,274	0,267	0,261	0,262	0,26	0,265	0,26	0,274	0,27	0,27
c _s CO [ppm]	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5
C _{sn} CO [mg/m ³]	<6,3	<6,3	<6,3	<6,3	<6,3	<6,3	<6,3	<6,3	<6,3	<6,3	<6,3	<6,3
C _{sn3} CO [mg/m ³]	<6	<6	<6	<6	<6	<6	<6	<6	<6	<6	<6	<6
M [g/h]	<0,023	<0,023	<0,023	<0,023	<0,023	<0,023	<0,023	<0,023	<0,023	<0,023	<0,023	<0,023
b [Pa]	96400	96400	96400	96400	96400	96400	96400	96400	96400	96400	96400	96400
t [°C]	124,8	131,4	142,9	141,7	139,7	138	135,1	134,6	133,8	133,9	134,2	134,2
f _n [kg/m ³]	0,169	0,169	0,169	0,169	0,167	0,166	0,164	0,165	0,162	0,169	0,167	0,168
ρ _{sn} [kg/m ³]	1,32	1,32	1,32	1,32	1,32	1,32	1,32	1,32	1,32	1,32	1,32	1,32
ρ _n [kg/m ³]	1,23	1,23	1,23	1,231	1,231	1,232	1,233	1,232	1,233	1,23	1,231	1,231
ρ [kg/m ³]	0,809	0,795	0,774	0,776	0,78	0,784	0,79	0,79	0,793	0,791	0,791	0,79
v [m/s]	9,65	9,81	10,1	10,1	10,1	10,1	10,2	10,1	10,2	9,89	10	10
Q [m ³ /h]	6820	6930	7140	7140	7140	7140	7210	7140	7210	6990	7070	7070
Q _n [m ³ /h]	4480	4480	4490	4500	4520	4540	4620	4580	4630	4490	4540	4540
Q _{sn} [m ³ /h]	3700	3700	3710	3720	3740	3760	3840	3800	3850	3710	3760	3760

Tab.16 Parametry nosného plynu, rok 2015 [převzato z firemních dokumentů]

Číslo půlhodiny	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
c _s O ₂ [%]	3,49	3,2	3,25	3,51	3,88	3,43	3,47	3,49	3,4	3,5	3,53	3,52
c O ₂ [%]	2,89	2,65	2,69	2,92	3,24	2,84	2,68	2,89	2,82	2,91	2,93	2,92
c _s NO [ppm]	32	33	32	32	30	32	32	32	32	32	31	31
C _{sn} NO ₂ [mg/m ³]	65	68	65	65	62	65	65	65	65	65	64	64
C _{sn3} NO ₂ [mg/m ³]	67	69	66	66	65	67	66	67	66	66	66	66
M [g/h]	170	180	170	170	170	170	170	170	170	170	170	170
c _s CO [ppm]	1,5	1,8	1,4	1,3	1,3	1	1,4	1,5	1,2	1,2	1,4	1,2
C _{sn} CO [mg/m ³]	1,8	2,2	1,8	1,7	1,6	1,3	1,7	1,9	1,5	1,5	1,7	1,5
C _{sn3} CO [mg/m ³]	1,9	2,2	1,8	1,7	1,6	1,3	1,8	1,9	1,6	1,6	1,8	1,5
M [g/h]	4,8	5,8	4,8	4,6	4,4	3,5	4,6	5,1	4	4	4,6	4
b [Pa]	96400	96400	96400	96400	96400	96400	96400	96400	96400	96400	96400	96400
t [°C]	114	114	114	114	117	117	117	117	116	116	116	116
f _n [kg/m ³]	0,165	0,167	0,167	0,164	0,161	0,165	0,165	0,165	0,165	0,164	0,164	0,164
ρ _{sn} [kg/m ³]	1,32	1,32	1,32	1,32	1,32	1,32	1,32	1,32	1,32	1,32	1,32	1,32
ρ _n [kg/m ³]	1,232	1,231	1,231	1,232	1,234	1,232	1,232	1,232	1,232	1,232	1,233	1,232
ρ [kg/m ³]	0,827	0,826	0,827	0,827	0,822	0,822	0,821	0,821	0,823	0,823	0,823	0,823
v [m/s]	6,82	6,73	6,74	6,83	7,01	6,86	6,87	6,87	6,83	6,86	6,87	6,87
Q [m ³ /h]	4821	4757	4764	4828	4955	4849	4856	4856	4828	4849	4856	4856
Q _n [m ³ /h]	3236	3193	3198	3241	3300	3230	3234	3234	3224	3238	3243	3243
Q _{sn} [m ³ /h]	2686	264	2649	2691	2749	2680	2684	2685	2674	2688	2693	2693

Význam symbolů

c – relativní koncentrace

C – hmotnostní koncentrace

M – hmotnostní tok

Význam indexů

n – vlhký plyn, přepočten na 101,325 kPa a 0 °C

sn – suchý plyn, přepočten na 101,325 kPa a 0 °C

sn3 – suchý plyn, přepočten na 101,325 kPa, 0 °C
a obsah kyslíku v nosném plynu na 3 obj. %

Pro výše uvedené hodnoty byly použity následující výpočetní vztahy spolu s uvedením jednotlivých členů.

Fiktivní vlhkost plynu [35] – obsah vodní páry v plynu, výpočet byl stanoven kondenzačním způsobem:

$$f_N = \frac{m_v}{V_{SN}} \quad (18)$$

Hustota plynu za normálních podmínek (tlak 101,325 kPa, teplota 0 °C) pro spalovací procesy
ρ_{SN}: 1,320 kg/m³ při obsahu kyslíku <15 obj. % [35]:

$$\rho_N = \frac{\rho_{SN} + f_N}{1 + \frac{f_N}{\rho_{VPN}}} \quad (19)$$

Hustota vlhkého plynu za provozních podmínek [35]:

$$\rho = \rho_N * \frac{b + \Delta p}{101,325} * \frac{273,15}{173,15 + t} \quad (20)$$

Rychlost proudění plynu [35]:

$$v = K * \left(\frac{2 * p_d}{\rho} \right)^{1/2} \quad (21)$$

Objemový průtok vlhkého plynu za provozních podmínek [35]:

$$Q_p = v * S * 3600 \quad (22)$$

Objemový průtok vlhkého plynu za norm. podmínek (tlak 101,325 kPa a teplota 0 °C) [35]:

$$Q_N = Q_P * \frac{b + \Delta p}{101,325} * \frac{273,15}{273,15 + t} \quad (23)$$

Objemový průtok suchého plynu za norm. podmínek (tlak 101,325 kPa a teplota 0 °C) [35]:

$$Q_{SN} = \frac{Q_N}{1 + \frac{f_N}{\rho_{VPN}}} \quad (24)$$

Ve všech výše zmiňovaných výpočtech se používá hodnota pro $\rho_{VPN} = 0,804 \text{ kg/m}^3$.

Přepočet koncentrací na vztažné podmínky

Koncentrace vlhkého plynu za norm. podmínek (tlak 101,325 kPa a teplota 0 °C):

$$C_N = C * \frac{\rho_N}{\rho} = C * \frac{p_N}{p} * \frac{T}{T_N} \quad (25)$$

Přepočet z ppm na mg/m^3 např. u CO:

$$M_m = \frac{M}{V_m} \quad (26)$$

$$1 \text{ ppm CO} = \frac{12,01 + 16}{22,414} = 1,249 \text{ mg/m}^3$$

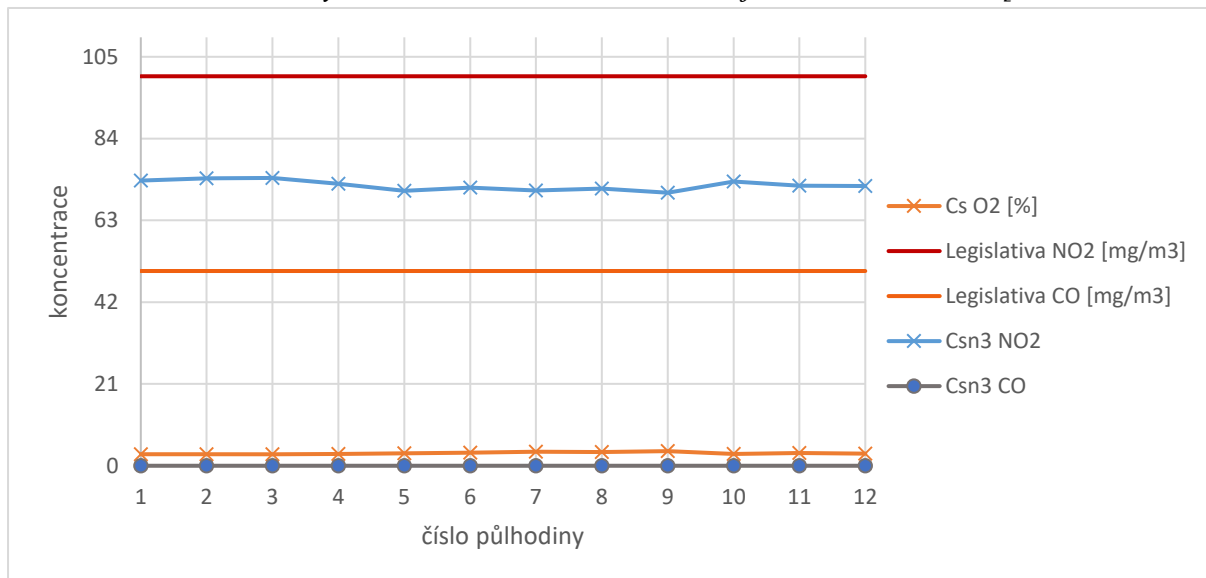
Koncentrace v suchém plynu za norm. podmínek (tlak 101,325 kPa a teplota 0 °C):

$$C_{SN} = C_N * \frac{100}{100 - f_N} \quad (27)$$

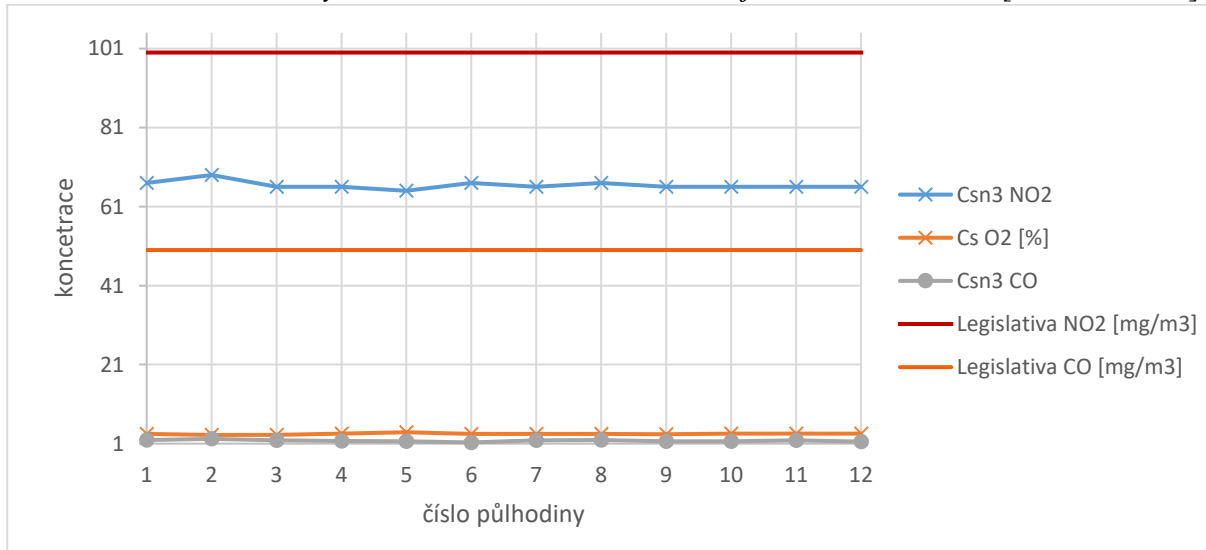
Koncentrace v suchém plynu za norm. podmínek přepočtená na referenční obsah kyslíku v nosném plynu 3 obj. %:

$$C_{SN,3} = C_{SN} * \frac{20,9 - O_{2\ ref}}{20,9 - O_{2\ m\check{e}r}} \quad (28)$$

Tab.17 Záznam naměřených hodnot koncentrace znečišťujících látek, r. 2015 [vlastní tvorba]



Tab.18 Záznam naměřených hodnot koncentrace znečišťujících látek, r. 2018 [vlastní tvorba]



Tabulky č. 17 a 18 znázorňují naměřené hodnoty jednotlivých složek znečišťujících látek a zároveň jsou ohraničeny limity znečišťujících látek uvedených ve Vyhlášce č. 452 / 2017 Sb., v platném znění.

Koncentrace oxidu uhelnatého v suchém plynu byla přepočtena na normální podmínky (tlak 101,325 kPa teplotu 0 °C a obsah kyslíku v nosném plynu 3 obj. %). Koncentrace oxidu uhelnatého zjišťovaná v roce 2015 byla velmi nízká a analyzátor spalín AO2000 ji nemohl vyhodnotit. Zmiňovaná koncentrace byla pod mezí stanovitelnosti (mezí stanovitelnosti pro

CO=1,2 ppm). Při zjišťování koncentrace dané složky nosného plynu by se mohl přístroj dopustit chyby a měření bylo by považováno za nepřesné. Při autorizovaném měření v roce 2018 bylo použito jiného analyzátoru spalin, který umožňuje naměření nízkých hodnot znečišťujících látek a uvádí přesné hodnoty oxidu uhličitého i při nepatrné koncentraci.

Vliv na vznik emisí má okamžitý příkon kotle, teplota přehřátého vzduchu, nastavení hořáku aj. Při kontinuálním měření v roce 2015 byly tyto parametry vyšší a projevíly se i na zvýšené tvorbě znečišťujících látek oxidu dusíku.

Znečišťující látky nesmí překročit emisní limity (CO – 50 mg.m⁻³ a NO_x – 100 mg.m⁻³) uvedené v tabulce 1.1 – Specifické emisní limity pro kotle a teplovzdušné přímotopné stacionární zdroje, která je součástí Vyhlášky č. 452/ 2017. Limitující parametry nebyly překročeny, což je zřejmé z obou grafů. Na základě naměřených hodnot byla udělena akreditace Českým institutem pro akreditaci pro provoz zařízení ve společnosti PLEAS a.s.

Závěr

Nezbytnou součástí lidského standardu je teplo a světlo, které jsou zprostředkovány pomocí elektrické a tepelné energie. Proces spalování je jeden z hlavních zdrojů vedoucí ke vzniku uvedených energií, avšak nejrozumnější metody spalování různých druhů paliv s sebou nesou povinnost brát zřetel na emisní látky vznikající při tomto procesu. Snižování a odstraňování emisí je velmi drahou záležitostí, a tak je současným trendem přecházet na plyné palivo, zejména zemní plyn. Jedná se o vysoce výhřevné palivo, jenž není náročné na přepravu a při jeho spalování vzniká nejmenší množství emisních látek.

V České republice jsou znečišťující látky vznikající při průmyslovém spalování paliv vypuštěných do ovzduší omezeny platnou legislativou. Jedná se především o zákon č. 201/2012 Sb., o ochraně ovzduší a Vyhlášku č. 452/2017 Sb., kterou se mění Vyhláška č. 415/2012 Sb., o přípustné úrovni znečišťování a jejím zjišťování. Novelizace vyšla v platnost 1. 1. 2018 a přinesla s sebou mnoho změn, mezi které lze zahrnout následující. Zpřísnění emisních limitů pro spalovací stacionární zdroje o celkovém jmenovitém příkonu vyšším než 0,3 MW a nižším než 50 MW. Při spalování plyných paliv snižuje emisní limit o 50 %. Dále stanovuje specifické emisní hranice pro pachové látky a nastaly mnohé změny v měření a vyhodnocování emisních látek.

V teoretické části studie byl kladen důraz na emisní látky vznikající při spalování plyných paliv, zejména zemního plynu. První část práce popisuje parní kotle, hořáky a přibližuje středotlaký parní kotel BOSCH a jeho hořák TEMINOX, na kterém bylo prováděno měření plyných znečišťujících látek. Praktická část je věnována popisu průběhu měření znečišťujících látek. Během experimentu byly měřeny emise oxidu uhelnatého, oxidů dusíku vyjádřeného jako oxid dusičitý a stanoveny vzduchotechnické parametry. Výstupem experimentální části jsou grafy vyhodnocující měření plyných znečišťujících látek za pět let provozu spalovacího zařízení. V experimentální části také nalezneme pojednání o firmě PLEAS a.s., o jejím technickém zázemí a kotelně umístěné v areálu společnosti. Jednorázové autorizované měření bylo uskutečněno firmou TOP-ENVI Tech s.r.o., se kterou jsem měl možnost spolupracovat v rámci autorizovaného měření.

Získaná data z měření poukázaly na velký skok oxidu dusičitého při posuzování emisí v roce 2017 oproti předešlým rokům. Nárůst byl také zaznamenán v grafu emisí oxidu uhelnatého, jenž nabyl desetin limitující hranice pro CO. Po prozkoumání možných příčin vzniku zvýšeného množství emisních látek jsem došel k závěru, že i přes nespočet poskytnutých informací společností PLEAS a.s., nebyla odhalena příčina vedoucí ke zvýšené tvorbě emisí. Jako jeden z možných faktorů, který mohl ovlivnit růst „noxů“ v roce 2017, lze přisoudit špatnému nastavení spalovacího poměru vzduch/palivo servisním technikem. Mezi další možné příčiny lze zařadit – poruchu na hořáku (zvýšena teplota v ústí hořáku) a poruchu recirkulovaných spalín (zvýšování recirkulačního poměru vede k nestabilitě hoření).

Ze získaných dat je patrné, že zařízení vyhovuje emisním limitům i poté, co došlo k jejich zpřísnění, které s sebou přinesla nová vyhláška. Předpokládá se, že v budoucnosti dojde k dalšímu snížení emisního stropu, a s tím souvisí i otázka, která může být předmětem dalšího zkoumání. Bude splňovat tento středotlaký parní kotel nejprísnejší emisní limity i po dalším zpřísnění emisních limitů?

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] BALÁŠ, Marek. *Kotle a výměníky tepla*. Vyd. 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2013. ISBN isbn978-80-214-4770-7.
- [2] OCHRANA, Ladislav. *Kotle a výměníky tepla*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. ISBN 8021428473.
- [3] Složení ropy: Kapalná paliva. *Petroleum* [online]. Vysoká škola chemicko-technologická, Praha 6 [cit. 2018-02-24]. Dostupné z: <http://petroleum.cz/ropa/slozeni-ropy.aspx>
- [4] BUDÍN, Jan. Zemní plyn-těžba, vlastnosti a rozdělení: Fyzikální charakteristiky zemního plynu. *Oenergetice* [online]. 2015, 12.4.2015 [cit. 2018-02-27]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/technologie/plynarenstvi/zemni-plyn-tezba-vlastnosti-a-rozdeleni/>
- [5] OCHRANA, Ladislav. *Kotle průmyslových tepelných centrál*. Brno: Vysoké učení technické, 1990.
- [6] POLACH, Vladislav. Parní kotle. *Fakulta strojní západočeské univerzity v Plzni, katedra energetických strojů a zařízení* [online]. Západočeská univerzita v Plzni [cit. 2018-02-27]. Dostupné z: https://kke.zcu.cz/export/sites/kke/about/projekty/enazp/projekty/01_Stavba-a-provoz-stroju_1-3/1_IUT/005_Parn-kotle---Polach---P0.pdf
- [7] SVOBODA, Karel a František KEPÁK. *Energetika a životní prostředí*. Ústí nad Labem: Univerzita J.E. Purkyně, 1998. ISBN 80-7044-214-X.
- [8] FÍK, Josef. Hořáky pro spalování zemního plynu: Vířivé hořáky. In: *Tzb-info: Vytápíme plynem* [online]. 2004, 13.10.2004 [cit. 2018-02-26]. Dostupné z: <https://vytapieni.tzb-info.cz/vytapime-plynem/2183-horaky-pro-spalovani-zemniho-plynu-iii>
- [9] FÍK, Josef. Hořáky pro spalování zemního plynu: Rozdělení hořáku na zemní plyn. *Tzb-info: Vytápíme plynem* [online]. 2004, 23.9.2004 [cit. 2018-03-27]. Dostupné z: <http://vytapieni.tzb-info.cz/vytapime-plynem/2153-horaky-pro-spalovani-zemniho-plynu-i>
- [10] HRDLIČKA, František a Jiří HEMERKA. Emise z kotlen a ochrana ovzduší: Oxidy dusíku. *Tzb-info: Vytápíme tuhými palivy* [online]. ČVUT Praha, 2004, 20.12.2004 [cit. 2018-03-28]. Dostupné z: <https://vytapieni.tzb-info.cz/vytapime-tuhymi-palivy/2294-emise-z-kotlen-a-ochrana-ovzdusi-i>
- [11] FÍK, Josef. *Zemní plyn: tabulky, diagramy, rovnice, výpočty, výpočtové pravítka*. Praha: Agentura ČSTZ, 2006. ISBN 80-86028-22-4.
- [12] Těžba paliv: Těžba zemního plynu. In: *Oenergetice: Statistiky* [online]. 2014, 1.3.2014 [cit. 2018-03-11]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/statistiky/ceska-republika-tezba-paliv/>
- [13] BAŠTA, Jiří. *Topenářská příručka: 120 let topenářství v Čechách a na Moravě* [online]. Praha: GAS, 2001 [cit. 2018-02-26]. ISBN 80-86176-82-7.

- [14] BRANIŠ, Martin a Iva HŮNOVÁ, ed. *Atmosféra a klima: aktuální otázky ochrany ovzduší*. V Praze: Karolinum, 2009. ISBN 978-80-246-1598-1.
- [15] VEJVODA, Josef, Pavel MACHAČ a Petr BURYAN. *Technologie ochrany ovzduší a čištění odpadních plynů*. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2003. ISBN isbn80-7080-517-x.
- [16] Naftová geologie: Tvorba uhlovodíků [online]. Hodonín [cit. 2018-02-24]. Dostupné z: http://mng.webz.cz/naftova_geologie.php
- [17] MAJLING, Eduard. Těžba ropy a zemního plynu v České republice: Mapa těžby zemního plynu v ČR. Oenergetice: Plynárenství [online]. 2016, 19.12.2016 [cit. 2018-03-27]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/ropa/tezba-ropy-a-zemniho-plynu-v-ceske-republice-historie-a-soucasnost/>
- [18] KLEPÁRNÍK, Jan. Parní velkoobjemové kotle: Válcový kotel. In: Mendelu: *Facultas silviculturae* [online]. [cit. 2018-03-12]. Dostupné z: http://user.mendelu.cz/xklepar0/fls/es/ko_pavel.htm
- [19] KLEPÁRNÍK, Jan. Parní bubnové kotle: Hydraulické schéma bubnového kotle s přirozeným a nuceným oběhem ve výparníku. *Mendelu: Facultas silviculturae* [online]. [cit. 2018-03-28]. Dostupné z: http://user.mendelu.cz/xklepar0/fls/es/ko_pabu.htm
- [20] Parní kotle: Kotel UL-SX. In: *Bosch-industrial: Nabídka válcových kotlů* [online]. Bosch Termotechnika s.r.o., 2012, 7/2012 [cit. 2018-03-28]. Dostupné z: https://www.bosch-industrial.com/files/mng/BR_SteamBoilers_cz.pdf
- [21] Hořák TEMINOX: Schéma hořáku TEMINOX. *OHNÚT: Nabídka hořáku firmy TEMINOX* [online]. OHNÚT spalovací technika s.r.o. [cit. 2018-03-24]. Dostupné z: <http://www.ohnut.cz/horak-teminoxgls>
- [22] SCHOPF, N., W. PETERS, B. KONIG, W. SMIT, K. BURMESTEN a R. SUNDERMANN. Nízkoemisní olejové a plynové spalování pro průmysl a teplárny: Hořák SAACKE. *Ohnut* [online]. [cit. 2018-03-24]. Dostupné z: <http://www.ohnut.cz/media/files/catalog/item/files-23/Teminox%20obecne.pdf>
- [23] Oxid uhelnatý. *Integrovaný registr znečišťování: Ministerstvo životního prostředí České republiky* [online]. [cit. 2018-03-25]. Dostupné z: https://www.irz.cz/repository/latky/oxid_uhelnaty.pdf
- [24] HAVEL, Milan, Vít VEBR a Petr VÁLEK. Oxidy dusíku. *Arnika: Chemické látky* [online]. [cit. 2018-03-28]. Dostupné z: <http://arnika.org/oxidy-dusiku>
- [25] Oxidy dusíku. *Integrovaný registr znečišťování: Ministerstvo životního prostředí Česká republika* [online]. Praha [cit. 2018-03-29]. Dostupné z: https://www.irz.cz/repository/latky/oxidy_dusiku.pdf
- [26] Mapa firmy Pleas a.s. In: *Google maps* [online]. 2018, 2018 [cit. 2018-03-28]. Dostupné z: <https://www.google.cz/maps/place/PLEAS+a.s./@49.6008224,15.5805774,17z/data=!3>

[m1!4b1!4m5!3m4!1s0x470d00c05634d1e7:0x30a62dd44e31a187!8m2!3d49.6008224!4d15.5827661](https://www.bosch-industrial.com/cz/stranka-produkty/parny-kotle/uls-ulsx.html)

[27] Parní kotle: Parní kotle UNIVERSAL UL-S, UL-SX. *Bosch-industrial: Bosch – průmyslové kotle a kogenerační jednotky* [online]. 2012 [cit. 2018-03-25]. Dostupné z: <https://www.bosch-industrial.com/cz/stranka-produkty/parny-kotle/uls-ulsx.html>

[28] BALÁŠ, Marek. Stavba a provoz energetických zařízení: Hořáky. *Vutbr: elearning* [online]. Brno [cit. 2018-03-24]. Dostupné z: https://moodle.vutbr.cz/pluginfile.php/355345/mod_resource/content/0/13_Horaky.pdf

[29] KOKTA, Roman. *Průvodní dokumentace, Pasport kotle: Typ UL-SX-IE 10000 x 16+ECO1*. Firemní dokument PLEAS a.s., 2013.

[30] *Provozní kniha pro válcové kotle: Dokumentace ke kotli K2*. 3. Firemní dokument PLEAS a.s., 2013.

[31] BĚHOUNEK, J. a Jan MANDZÁK. *Technická opatření ke snížení provozních nákladů energetického hospodářství v areálu PLEAS, Havlíčkův Brod: PS 01- kotelna- Technologická část*. Firemní dokument PLEAS a.s. Teplice, 2013.

[32] *Nabídka a doklady k prokázání splnění kvalifikace: Technická opatření ke snížení provozních nákladů energetického hospodářství v areálu PLEAS, Havlíčkův Brod*. Firemní dokument PLEAS a.s. Jablonec nad Nisou, 2013.

[33] TOP-ENVI TECH. *Provozní řád kotelna: Kotel K2*. Firemní dokument PLEAS a.s. Brno, 2014.

[34] LOOS, Bosch group. *Datenblatt: UNIVERSAL střeďo / vysokotlaký-Parní kotel UL-S*. Firemní dokument PLEAS a.s. 2011.

[35] TOP-ENVI TECH. *Průručky jakosti laboratoře kvality ovzduší: SOP 6*. Firemní dokument TOP-ENVI Tech Brno s.r.o. Brno.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Veličina	Jednotka
Q_{SN}	Objemový průtok suchého plynu za norm. podmínek	m^3/hod
Q_N	Objemový průtok vlhkého plynu za norm. podmínek	m^3/hod
Q_P	Objemový průtok vlhkého plynu za provozních podmínek	m^3/hod
T	Termodynamická teplota	K
C	Koncentrace za skutečného stavu plynu	ppm
C_N	Koncentrace ve vlhkém plynu za n. p. (101,325 kPa, 0 °C)	ppm
C_{SN}	Koncentrace v suchém plynu za normálních podmínek	mg/m^3
$C_{SN,3}$	Koncentrace v suchém plynu za normálních podmínek, přepočtená na referenční obsah kyslíku	mg/m^3
ρ_N	Hustota plynu za norm. podmínek	kg/m^3
ρ	Hustota vlhkého plynu za provozních podmínek	kg/m^3
ρ_{VPN}	Hustota vodní páry za norm. podmínek	kg/m^3
ρ_{SN}	Hustota vlhkého vzduch za norm. podmínek	kg/m^3
p_N	Tlak plynu za norm. podmínek	kPa
p	Tlak vlhkého plynu za provozních podmínek	kPa
T_N	Teplota plynu v potrubí za norm. podmínek	K
f_N	Fiktivní vlhkost	kg/m^3
$O_{2\ ref}$	Referenční stav kyslíku, přepočten na 3 obj. % O_2 v suchých spalínách	%
$O_{2\ m\check{e}ř}$	Skutečný obsah kyslíku	%
M_m	Měrná molární hmotnost	kg/m^3
M	Molární hmotnost	kg/m^3
V_m	Molární objem	$m^3/kmol$
V_{SN}	Prosátý objem suchého plynu za norm. podmínek	kg/m^3
v	Rychlost proudění plynu v potrubí	m/s
B	Barometrický tlak	kPa
Δp	Statický přetlak, resp. podtlak plynu v potrubí	kPa

p_d	Diferenční tlak plynu v potrubí	Pa
m_v	Hmotnost vody zachycené v záchytném zařízení	kg
K	Koeficient Prandtlovy sondy	-
Q_p	Objemový průtok vlhkého plynu za provozních podmínek	m^3/hod
S	Plocha měřicího řezu	m^2
Q_s^o	Spalné teplo	kJ/m^3
Q_i^o	Výhřevnost	kJ/m^3

SEZNAM OBRÁZKŮ

- Obr. 1 Graf rozdělení parních kotlů [vlastí tvorba]
Obr. 2 Tvorba uhlovodíku [16]
Obr. 3 Těžba zemního plynu v České republice [17]
Obr. 4 Graf závislost spalných tepel a výhřevnosti na ZP používaným v EU a České republice [vlastní tvorba]
Obr. 5 a) dvoububnový nízkotlaký kotel, b) jednobubnový středotlaký kotel, c) jednobubnový vysokotlaký kotel [13]
Obr. 6 Schéma palivového hospodářství olejové kotelny [13]
Obr. 7 Plynové hospodářství [13]
Obr. 8 Ohřívač vody konstruovaných z ocelových hadů [6]
Obr. 9 Typy přehřívačů [6]
Obr. 10 Kotel válcový [18]
Obr. 11 Plamenco-žárotrubný kotel [13]
Obr. 12 Kotel s přirozenou a nucenou cirkulací vody ve výparníku [19]
Obr. 13 Popis kotle BOSCH typ UL-SX [převzato z 20]
Obr. 14 Hlavice hořáku s tlakovým rozprašováním a recirkulací oleje [2]
Obr. 15 Vířivý hořák s plynovými a vzduchovými tryskami [8]
Obr. 16 Schéma vedení vzduchu a paliva v monoblokovém hořáku GLS [21]
Obr. 17 Teplotní pole silně rotujícího plamene [22]
Obr. 18 Vliv teploty a součinitele přebytku vzduchu na mechanismus tvorby NO při spalování [10]
Obr. 19 Popis polohy objektu PLEAS a.s. [26]
Obr. 20 Umístění kotle K2 v kotelně [vlastní tvorba]
Obr. 21 Analyzátor HORIBA [foto vlastní archiv]
Obr. 22 Uložení kalibračních plynů v tlakových lahvích [foto vlastní archiv]
Obr. 23 Odběrová sonda HORIBA PSP 4000–H [foto vlastní archiv]
Obr. 24 Zařízení pro předúpravu vzorku HORIBA ES 600 P [foto vlastní archiv]
Obr. 25 Odběrové místo v kouřovodu [foto vlastní archiv]
Obr. 26 Závislost průměrné hmotnostní koncentrace NO_x na výkonu a času [vlastní tvorba]
Obr. 27 Závislost průměrné hmotnostní koncentrace CO na výkonu a času [vlastní tvorba]

SEZNAM TABULEK

- Tab.1 Těžba zemního plynu v České republice [11]
Tab.2 Složení zemního plynu, používaných v zemích EU a České republiky, hodnoty výhřevnosti a spalného tepla pro jednotlivé složky zemního plynu [11]
Tab.3 Hodnoty spalného tepla a výhřevnosti Tranzitního, Norského, Alžírského, Jihomoravského a Holandského zemního plynu za normálních podmínek, dopočítáno ze vztahů pro spalné teplo a výhřevnost [vlastní tvorba]
Tab.4 Vlastnosti zemního plynu používaného v zemích EU [11]
Tab.5 Fyzikální charakteristiky zemního plynu [4]
Tab.6 Parametry kotle BOSCH [32]
Tab.7 Příslušenství kotle UL-SX [20]
Tab.8 Parametry integrovaného ekonomizéru (typ EKO1) [32]
Tab.9 Parametry přehříváku [32]
Tab.10 Parametry hořáku TEMINOX GLS 95–30a [32]
Tab.11 Emisní hodnoty hořáku [32]
Tab.12 Technické údaje kotlů [29]
Tab.14 Rozsahy analyzátoru a kalibrační plyn [35]
Tab.15 Parametry nosného plynu, rok 2015 [převzato z firemních dokumentů]
Tab.16 Parametry nosného plynu, rok 2015 [převzato z firemních dokumentů]
Tab.17 Záznam naměřených hodnot koncentrace znečišťujících látek, r. 2015 [vlastní tvorba]
Tab.18 Záznam naměřených hodnot koncentrace znečišťujících látek, r. 2018 [vlastní tvorba]