

doc. Ing. Michal Holubčík, PhD.

prof. Ing. Jozef Jandačka, PhD.

Ing. Patrik Nemeč, PhD.

**Vybrané študijné texty a ilustrácie k predmetom Technika  
ochrany ovzdušia, Energetické využívanie odpadov a  
Monitorovanie životného prostredia študijných programov  
Energetická a environmentálna technika a Technika  
prostredia**

(časť. Technológie spaľovania tuhých palív)

## **Pod'akovanie**

Tieto študijné texty vznikli vďaka podpore projektu 032ŽU-4/2022 Implementácia poznatkov o moderných spôsoboch znižovania záťaže životného prostredia pri energetickom využívaní tuhých palív a odpadov do pedagogického procesu. Autori ďakujú Kultúrnej a edukačnej grantovej agentúre Ministerstva školstva, vedy, výskumu a športu Slovenskej republiky.

## Obsah

1. Technológie spaľovania tuhých palív.....	4
1.1 Technológie roštového spaľovania paliva.....	4
1.1.1 Technológie s pevným roštom.....	4
1.1.2 Technológie s roštom s občasným premiestňovaním paliva .....	5
1.1.3 Technológie s roštom s neustálym premiestňovaním paliva .....	5
1.2 Technológie spaľovania so spodným prívodom paliva .....	6
1.3 Technológie spaľovania v suspenzii.....	6
1.3 Technológie fluidného spaľovania .....	7
1.4 Inovatívne technológie spaľovacieho procesu v malých zdrojoch tepla na tuhé palivá.....	8
1.4.1 Prevádzka a úprava zdroja tepla .....	8

## 1. Technológie spaľovania tuhých palív

Spaľovanie tuhých palív, resp. palív všeobecne, sa realizuje v kotloch. Kotol je zariadenie, ktoré je navrhované na premenu chemickej energie (v chemických väzbách paliva) na teplo. Konštrukcia bežného kotla štandardne pozostáva z plášťa kotla, horáka, spaľovacej komory, resp. ohniska, v ktorom sa spaľuje palivo, teplovýmenných plôch na prenos tepla z produktov spaľovania do teplotonosného média, napr. vody, ciest na prívod a rozvod spaľovacieho vzduchu, spalínového traktu na odvod spalín a radiaceho systému na reguláciu spaľovacieho procesu.

Kvalita kotla je daná predovšetkým materiálovým vyhotovením jeho komponentov (horák, kotlové teleso, výmenník tepla). Vo väčšine prevádzok so zdrojom tepla sa väčšinou využíva nepriamy transport tepla. Výhodou toho spôsobu prenosu tepla je rovnomerný, veľkoplošný prenos tepla, možnosť centrálného usporiadanie zdroja tepla a súčasná obsluha viac spotrebiteľov. (HOLUBČÍK, 2018).

### 1.1 Technológie roštového spaľovania paliva

Systémy roštového spaľovania (s pevným lôžkom) siahajú od jednoduchých sporákov až po veľké kotly, ktoré spaľujú tuhé palivo na rošte na diaľkové vykurovanie a výrobu elektrickej energie. Požadovanými cieľmi sú efektívne využitie paliva a regulácia tepelného výkonu a dobrá intenzita spaľovania (účinnosť spaľovania). Okrem samotného spaľovania je potrebné brať do úvahy manipuláciu s palivom a jeho privádzanie, zanášanie popola a tvorba nánosov (trosky) na vnútorných povrchoch, plynné emisie a emisie tuhých častíc v akomkoľvek type spaľovacieho zariadenia na tuhé palivo. Systémy s pevným lôžkom používajú relatívne veľké kusy paliva a vyžadujú najmenšie množstvo spracovania paliva na zmenšenie veľkosti paliva v porovnaní so spaľovacími systémami na práškové palivo a spaľovacími zariadeniami s fluidným lôžkom. Existuje niekoľko druhov roštového spaľovania tuhého paliva. Výhodou roštových kúrenísk je tzv. objemové horenie, ktoré nevyžaduje jemné mletie a homogenizáciu paliva. Spaľovanie paliva na rošte prebieha jednak vo vrstve paliva, ako aj nad jej povrchom, kedy horí prchavá zložka horľaviny (vzniká tzv. dlhý plameň). V technológiách s roštovým spaľovaním paliva predstavuje strata nedopalom v popole a v emisiách tuhých častíc približne 1 %. Vyhorenie uhlíkových jemných častíc možno zlepšiť starostlivým dizajnom vzduchových dýz pre sekundárne a terciárne spaľovanie. Zvýšenie celkového prebytku vzduchu nemusí nevyhnutne zlepšiť spaľovanie uhlíka a môže ho zhoršiť, ak je teplota príliš nízka.

Roštové kúreniská podľa technického riešenia pohybu paliva v kúrenisku sa rozdeľujú do troch skupín:

- pevné rošty,
- rošty s občasným premiestňovaním paliva (šikmé a vratisuvné),
- pohyblivé rošty s neustálym premiestňovaním paliva, (pásové, reťazové, vibračné).

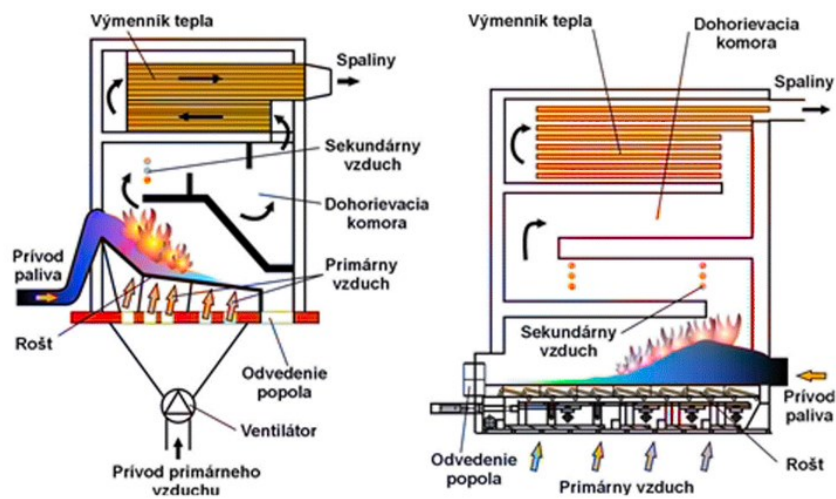
#### 1.1.1 Technológie s pevným roštom

Medzi zdroje tepla s technológiou spaľovania tuhých palív na pevnom rošte patria kuchynské sporáky, krby, krbové kachle, kachľové pece, prehorievacie a odhorievacie kotly. Vo väčšine prípadov sa jedná o zdroje tepla s manuálnym prikladaním paliva. Zdroje tepla s ručným prikladaním majú zvyčajne, vzhľadom na nízku cenu, jednoduchú konštrukciu. Najčastejším palivom spaľovaným v prehorievacích kotloch je kusové drevo a uhlie. Klasickým a najrozšírenejším konštrukčným riešením týchto zdrojov tepla je veľkoobjemové ohnisko (so spodným odhorievaním alebo prehorievaním), do ktorého sa môže pre čo najdlhšiu dobu prikladania naložiť naraz veľké množstvo paliva. Čerstvo priložené palivo sa postupne zohrieva, vysušuje a potom sa začína uvoľňovať prchavá horľavina, ktorej zapálenie predstavuje počiatok horenia. Proces spaľovania ďalej prebieha rôznou rýchlosťou. Palivo sa s premenlivou mierou kontroly odplyní a uvoľnená horľavina využije, je ale potrebná veľká roštová plocha potrebná pre dohorenie viazanej horľaviny. Zdroje tepla s ručnou obsluhou sa najviac využívajú v objektoch na vykurovanie s rozsahom tepelného výkonu do 50 kW. Pri týchto zdrojoch tepla je možné regulovať proces spaľovania veľmi ťažko. Je to možné len zmenou dávkovania paliva v kombinácii s reguláciou množstva spaľovacieho vzduchu, resp. jeho prerozdelením. Prívod primárneho vzduchu ovplyvňuje uvoľňovanie plynnej zložky paliva a sekundárnym vzduchom vyhorenie uvoľnených horľavých plynov. Ohniská pre spaľovanie kusového dreva majú obyčajne jednoduchú ručnú reguláciu

prívodu spaľovacieho vzduchu, preto je dodávka vzduchu spravidla viac menej konštantná (prietok sa môže líšiť v závislosti na meniacom sa ťahu v komíne). Nakoľko nie je možné jednoduchou, spoľahlivou a lacnou reguláciou zaistiť aktuálne potrebné množstvo spaľovacieho vzduchu, tento typ zdrojov tepla neumožňuje zníženie emisného zaťaženia životného prostredia.

### 1.1.2 Technológie s roštom s občasným premiestňovaním paliva

Pri zdrojoch tepla s horizontálnym posuvom paliva (obr. 1.1) sa dosiahne horizontálne palivové lôžko. Tento spôsob pohybu paliva zabráňuje nekontrolovateľnému nahromadeniu paliva. Táto technológia taktiež umožňuje homogénnu distribúciu paliva na povrchu roštu. Konštrukčná výška zdroja tepla s horizontálnym posuvom paliva pri rovnakých výkonoch je nižšia ako je konštrukčná výška u zdrojov tepla so šikmým roštom. Hrúbka palivového lôžka sa väčšinou pohybuje medzi 10 – 20 cm. V prípade zmeny potreby tepelného výkonu sa zmení hrúbka vrstvy, rýchlosť posuvu paliva a množstvo a prerozdelenie spaľovacieho vzduchu. Oceľový rošt má otvory s priemerom približne 6 mm pre primárny spaľovací vzduch. Horiaci (sekundárny) vzduch sa privádza cez dýzy v bočných stenách, aby sa dokončilo spaľovanie nad lôžkom paliva. Pre palivá z biomasy je pomer primárneho a sekundárneho vzduchu zvyčajne 40/60, zatiaľ čo pri uhlí sa používa viac primárneho vzduchu a menej sekundárneho vzduchu, pretože uhlie má menej prchavých látok ako biomasa.



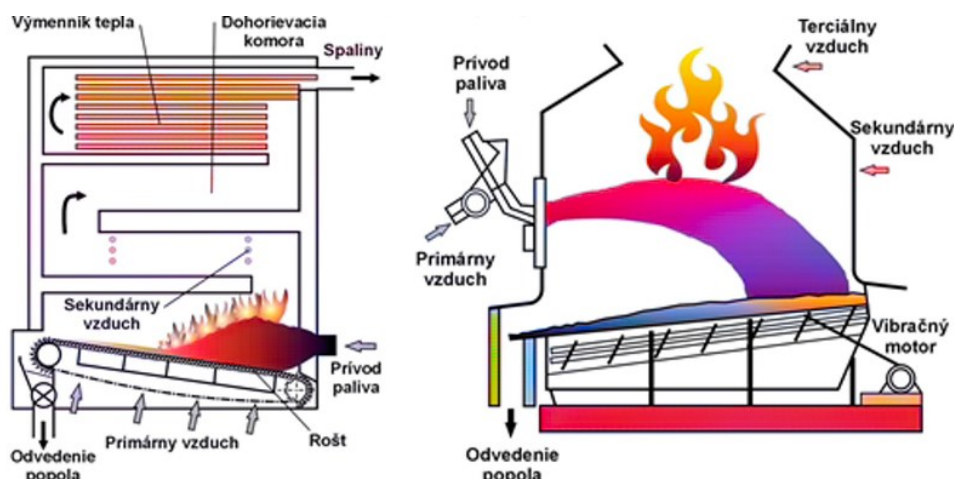
**Obrázok 1.1 :** Kotel so šikmým roštom (vľavo) a kotel s horizontálnym posuvom paliva (vpravo) (JANDAČKA, 2007)

### 1.1.3 Technológie s roštom s neustálym premiestňovaním paliva

Snaha po zvýšení výkonu roštových kúrenísk viedla k vývoju kúrenísk so spaľovaním paliva v pohyblivej vrstve (obr. 1.2). Pre tento spôsob spaľovania paliva bol vyvinutý reťazový rošt a neskôr pásový rošt. V oboch prípadoch sa jedná o pohyblivý, nekonečný pás. Samotné palivové lôžko sa nepohybuje ale je transportované pomocou roštu. Nevýhodou reťazového typu roštu bolo a je to, že pri výmene prehorenej (poškodenej) roštnice je potrebné celý rošt rozobrať. Tvorba škvary je potlačovaná vibračným pohybom roštu. Táto technológia je obzvlášť vhodná pre palivá náchylné na vytváranie škvary. Nevýhodou tejto technológie je väčšie množstvo oxidu uhoľnatého v spalinách a tvorba väčšieho množstva popolčeka, ktorá je spôsobená vibráciami.

Výhodou vibračného roštu je, že má menej pohyblivých častí ako posuvný rošt, a preto vyžaduje menej údržby. Tiež vibrácie majú tendenciu rozložiť palivové lôžko rovnomernejšie, a teda prúdenie vzduchu je rovnomernejšie v celom palivovom lôžku. Vplyvom sklonu a vibrácií roštu sa palivo pohybuje pomaly zo zadnej strany dopredu za približne 30 až 60 minút. Vo všeobecnosti v zadnej časti palivového lôžka dochádza k sušeniu a uvoľňovaniu prchavých zložiek paliva a v prednej časti palivového lôžka (v blízkosti odstraňovania popola) dochádza k doháraniu pevného uhlíka. Primárny vzduch je zónovaný tak, aby mal rôzne prietoky pod rôznymi časťami roštu.

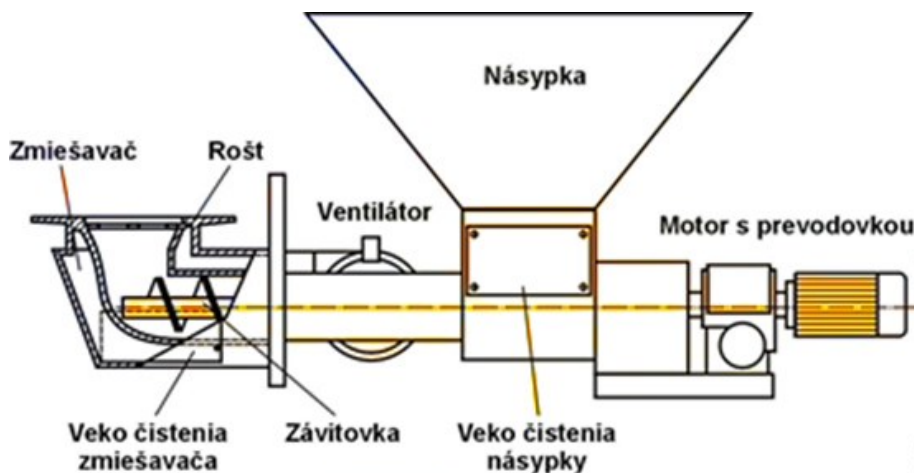
Existujú i ďalšie špecifické technológie, ako napr. s rotujúcim roštom, valcovým roštom, s rotujúcim kuželovým roštom, atď.



Obrázok 1.2 : Kotel s pohyblivým roštom (vľavo) a kotel s vibračným roštom (vpravo) (JANDAČKA, 2007)

## 1.2 Technológie spaľovania so spodným prívodom paliva

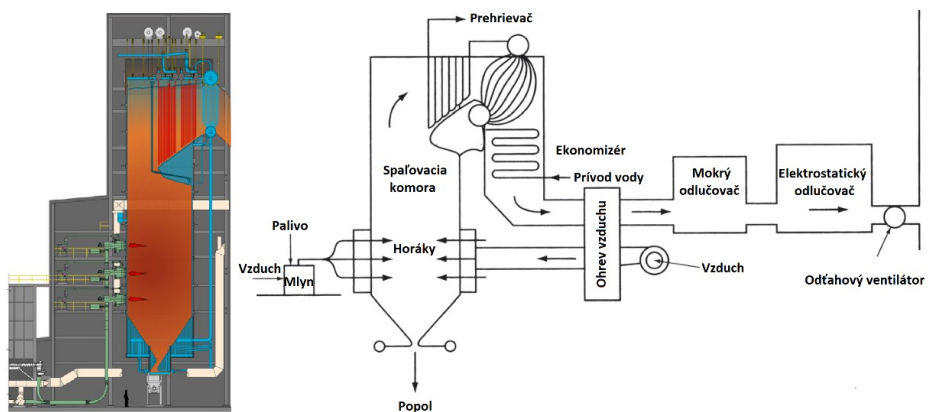
Pri zdrojoch tepla so spodným prívodom paliva (obr. 1.3) je palivo z násypky vytláčané závitkovým dopravníkom do kolena (retorty), z ktorého sa palivo vytláča na kruhový rošť. Retorta je umiestnená v zmiešavači, do ktorého je pomocou ventilátora privádzaný spaľovací vzduch, a to drážkami medzi retortou a roštom priamo do vrstvy paliva. Takéto kúreniská s retortovým horákom sa používajú na palivá s vyšším obsahom vlhkosti, resp. vyšším obsahom prchavých zložiek paliva, napr. pri spaľovaní drevnej štiepky a drevných peliet.



Obrázok1.3 : Kotel so spodným prívodom paliva (JANDAČKA, 2011)

## 1.3 Technológie spaľovania v suspenzii

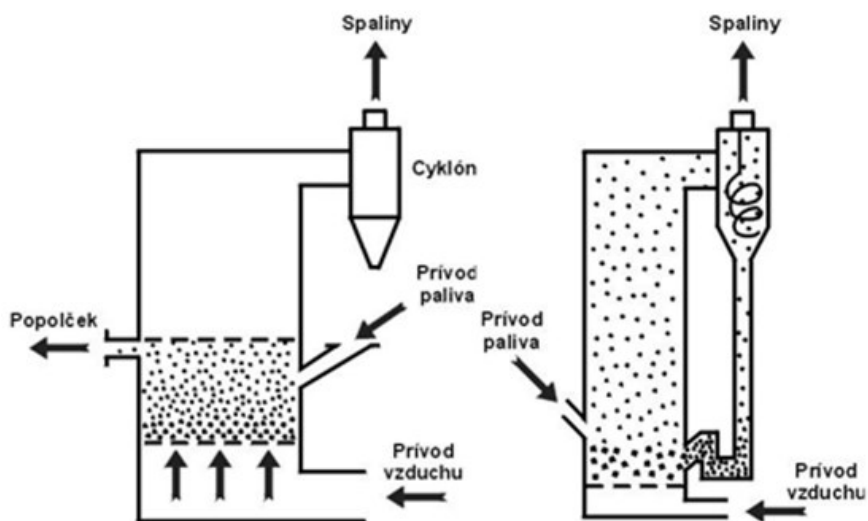
Zdroje tepla využívajúce technológiu spaľovania v suspenzii (obr. 1.4) spaľujú práškové palivové častice, ktoré sú dávkované cez dýzy horáka do objemu spaľovacej komory, ktorá je dostatočne veľká na to, aby umožnila vyhorenie zuhoľnateného paliva. Práškové uhlie a biomasa sa spaľujú oddelene alebo spoločne (spoluspaľovanie) v suspenzii, keď malé častice paliva prúdia cez spaľovaciu komoru. Uhlie sa relatívne ľahko drví, pretože je krehké, zatiaľ čo biomasa, ktorá je vláknitá, sa drví ťažšie. Preto je väčšina zdrojov tepla využívajúca túto technológiu prevádzkovaná s palivami na báze uhlia. Veľkú časť elektrickej energie v dnešnom svete vyrábajú parné elektrárne spaľujúce práškové uhlie. Výhodou suspenzného spaľovania oproti spaľovaniu na pevnom lôžku je, že systém môže byť zväčšený až na veľmi veľké veľkosti a je citlivejší na požadované zmeny v záťaži (tepelného výkonu). Veľké spaľovacie systémy sú zložitejšie ako systémy s pevným lôžkom kvôli potrebe rozdrviť palivo a všeobecne zložitejšiemu parnému cyklu.



**Obrázok 1.4 :** Princíp činnosti zdroja tepla so spaľovaním v suspenzii (JANDAČKA, 2011)

### 1.3 Technológie fluidného spaľovania

Z dôvodu vysokej účinnosti spaľovacieho procesu a nízkym emisiám sa používajú fluidné spaľovacie technológie (obr. 1.5). Fluidný jav je možné charakterizovať ako vznášanie sa drobných častí uhlia pôsobením dynamického účinku pretekajúceho tzv. fluidizačného média, ktorým je pri spaľovaní najčastejšie vzduch. Fluidná vrstva, v ktorej prebieha spaľovanie, je tvorená palivom, popolom a vzduchom. Pri spaľovaní vo fluidnej vrstve sa uplatňujú tri rôzne fyzikálno–chemické procesy: fluidizácia tuhej vrstvy, prenos tepla vo fluidnej vrstve a prenos hmoty vo fluidnej vrstve, prípadne mimo vrstvu. U kotlov menšej veľkosti sa pre spaľovanie tuhých palív častejšie používajú fluidné kotly so stacionárnou vrstvou, ktoré sú vhodné hlavne pri spaľovaní nehomogénnych biopalív. Kotly s cirkulujúcou fluidnou vrstvou, sa zvyčajne používajú vo väčších objektoch a pre vykurovanie rozsiahlejších areálov, kde je dôležitá schopnosť vyhorenia paliva. Líšia sa od spaľovania v stacionárnej fluidnej vrstve v zrnitosti materiálu vo vrstve. Pri vhodnej úprave dávkovania palív je možné v týchto kotloch spaľovať i kaly.



**Obrázok 1.5 :** Kotel so stacionárnou fluidnou vrstvou (vľavo) a kotel s cirkulujúcou fluidnou vrstvou (vpravo) (JANDAČKA, 2007)

Fluidné kúrenisko má výhodu v jednoduchom regulovaní výkonu i teploty v spaľovacom priestore. Fluidné systémy sa môžu prevádzkovať aj ako splyňovacie jednotky. Niekedy je potrebné navrhnuť jednotku tak, aby časť spalín po vychladení mohla byť recirkulovaná, pre zaistenie dostatočného množstva plynu pre správnu fluidizáciu. Určitou nevýhodou fluidných ohnísk je citlivosť na parametre vstupného paliva. Prevádzka fluidných ohnísk je nákladnejšia oproti kúreniskám roštovým, a to vzhľadom k väčšej spotrebe vzduchu nutného pre zaistenie fluidizácie. Na znižovanie prachu z fluidných kotlov sa v súčasnosti stále častejšie používajú tkaninové filtre a elektrostatické odlučovače.

## 1.4 Inovatívne technológie spaľovacieho procesu v malých zdrojoch tepla na tuhé palivá

Okrem už spomínaných technológií existuje aj viacero inovatívnych prístupov k zvyšovaniu efektivity spaľovania v malých zdrojoch tepla na tuhé palivá v domácnostiach. Mnohé z týchto metód sa nachádzajú vo fáze vývoja, patentovania alebo vynálezu a sľubujú značné zlepšenie efektivity a redukciu emisií:

- **Pyrolytické spaľovanie:** Pyrolytické spaľovanie je dvojfázový proces, pri ktorom sa palivo najprv zahrieva bez prístupu kyslíka na oddelenie plyných a pevných produktov. Plyny (syngas - zmes oxidu uhoľnatého, vodíka a metánu) sa potom spaľujú v druhej fáze s vysokou účinnosťou a nízkou tvorbou emisií. Táto metóda umožňuje flexibilné využitie rôznych typov palív a znižuje produkciu popola. Pyrolytické spaľovanie sa od splyňovacích kotlov líši v dvoch aspektoch: Pyrolytické spaľovanie prebieha pri nižšej teplote (450 °C až 550 °C) v porovnaní so splyňovacími kotlami, ktoré pracujú pri teplotách okolo 800 °C až 1000 °C. V pyrolytickom spaľovaní sa tuhý uhlík odvádza a môže sa využiť ako palivo v iných procesoch, zatiaľ čo v splyňovacích kotloch sa celé palivo spaľuje priamo v spaľovacej komore.
- **Viacstupňové spaľovanie:** Viacstupňové spaľovanie rozdeľuje proces spaľovania na viacero etáp s rôznymi teplotami a pomermi vzduchu a paliva. Typické stupne spaľovania zahŕňajú:
  - **Predspaľovanie:** Palivo sa predhreje a čiastočne spaľuje s nízkym pomerom vzduchu a paliva.
  - **Hlavné spaľovanie:** Predhriate plyny z predspaľovania sa miešajú s prívodom vzduchu a spaľujú sa s vysokým pomerom vzduchu a paliva.
  - **Dospálenie:** Do spalín sa pridáva dodatočný vzduch na dopálenie nespáľovaných plynov a zníženie emisií.  
To umožňuje efektívnejšie spaľovanie paliva a znižuje tvorbu emisií NO<sub>x</sub> a CO.
- **Spaľovanie v fluidnom lôžku:** Spaľovanie v fluidnom lôžku využíva suspendované pevné častice, ako je piesok, na vytvorenie fluidného lôžka, v ktorom sa palivo spaľuje. Táto metóda umožňuje rovnomerne spaľovanie paliva a znižuje tvorbu emisií NO<sub>x</sub> a pevných častíc.
- **Plazmové spaľovanie:** Plazmové spaľovanie využíva plazmu na zapálenie a udržiavanie spaľovania paliva. Táto metóda umožňuje dosiahnuť vysoké teploty spaľovania a znižuje tvorbu emisií NO<sub>x</sub> a CO.
- **Spaľovanie s okysličením:** Spaľovanie s okysličením spočíva v pridávaní kyslíka do spaľovacej komory na zlepšenie efektivity spaľovania a zníženie tvorby emisií. Táto metóda môže byť obzvlášť užitočná pri spaľovaní palív s nízkym obsahom uhlíka, ako je biomasa.

Očakávaná účinnosť spaľovania pri inovatívnych metódach sa líši v závislosti od konkrétnej technológie a typu paliva. Vo všeobecnosti sa však predpokladá, že tieto metódy dokážu dosiahnuť v závislosti na type spaľovacieho zariadenia o jednotky až 20% vyššiu účinnosť v porovnaní s tradičnými spaľovacími procesmi. Okrem toho by tieto metódy mali viesť k zníženiu emisií NO<sub>x</sub>, CO a pevných častíc o 50% až 80%. Inovatívne metódy spaľovania ponúkajú sľubný spôsob, ako zvýšiť efektivitu a znížiť emisie malých zdrojov tepla na tuhé palivá v domácnostiach. S pokračujúcim výskumom a vývojom sa dá očakávať, že tieto metódy sa stanú komerčne dostupnými a prispesú k udržateľnejšiemu vykurovaniu. Mnohé z týchto metód sa nachádzajú vo fáze vývoja a ich komerčná dostupnosť môže trvať niekoľko rokov. Náklady na implementáciu inovatívnych metód spaľovania môžu byť vyššie v porovnaní s tradičnými spaľovacími procesmi. Pred implementáciou akejkoľvek inovatívnej metódy spaľovania je dôležité zvážiť jej technické a ekonomické aspekty a splňanie emisných a bezpečnostných požiadaviek.

### 1.4.1 Prevádzka a úprava zdroja tepla

Proces spaľovania paliva, účinnosť spaľovacieho zariadenia, produkciu emisií a popola ovplyvňuje viacero aspektov, najmä parametre použitého paliva, konštrukcia spaľovacieho zariadenia a spôsob prevádzkovania spaľovacieho zariadenia. Niektoré tieto aspekty spolu súvisia a môžu byť vzájomne ovplyvňované, napr. množstvo potrebného spaľovacieho vzduchu závisí od parametrov paliva



a konštrukcie spaľovacieho zariadenia.

### **Vplyv parametrov paliva na spaľovací proces**

Vlastností a kvalita paliva sa menia v širokom rozsahu v závislosti od jeho druhu a použitej technológie spracovania. Spaľovací proces ovplyvňujú najmä nasledovné parametre tuhého paliva:

- **Relatívna vlhkosť paliva** - vlhkosť paliva privádzaného do ohniska sa pohybuje od hodnoty pod 10 % (pelety, koks) po hodnoty 25 ÷ 60 % (kôra, štiepka, piliarske odrezky). Obsah vlhkosti ovplyvňuje spaľovanie, adiabatickú teplotu spaľovania a objem produkovaných spalín na jednotku energie. Vlhké palivo potrebuje dlhšiu dobu zdržania v spaľovacej komore, aby sa palivo pred spaľovaním vysušilo, čo vyžaduje aj väčší objem spaľovacej komory. Vyšší obsah vlhkosti v palive tiež znižuje celkovú účinnosť spaľovacieho zariadenia.
- **Forma a veľkosť paliva** - Dôležitým fyzikálnym parametrom paliva sú rozmery a forma častíc paliva. V závislosti na spôsobe prípravy paliva z biomasy je dostupný v sypanej forme (štiepka, pelety) alebo ako kusový materiál (polená, brikety, balíky slamy). Častice sypaných palív s veľkosťou niekoľko milimetrov až centimetrov majú homogénne zloženie (pelety) alebo nehomogénne (nespracovaná kôra). Veľkosť častíc určuje príslušný dopravný systém a spaľovaciu technológiu.
- **Homogénnosť a kvalita paliva** - Kvalita paliva môže byť zlepšená vhodnou technológiou spracovania, čo však zvyšuje jej cenu. Na druhej strane, sú dostupné rôzne spaľovacie technológie pre palivá rozličnej kvality. V tejto súvislosti je dôležité spomenúť, že menej homogénne a kvalitné palivá vyžadujú sofistikovanejšie spaľovacie systémy. Z uvedeného a tiež ekonomických dôvodov je vhodné lacné palivá nižšej kvality spaľovať v spaľovacích zariadeniach stredného a vyššieho výkonu. Čím je spaľovacie zariadenie menšie, tým vyššie sú požiadavky na kvalitu a homogenitu paliva.
- **Obsah prchavej horľaviny** – významne ovplyvňuje dĺžku plameňa, čomu musí byť prispôsobený prívod a prerozdelenie spaľovacieho vzduchu, veľkosť spaľovacej komory a teplovýmennéj plochy na výmenníku tepla spaliny – teplotné médium. Vyšší obsah prchavej horľaviny majú tuhé palivá na báze biomasy, čomu musia byť prispôsobené zdroje tepla tak, aby sa nespálená prchavá horľavina v komíne vyskytovala v čo možno najmenšej miere.
- **Obsah popola** – za ideálnych podmienok by mal byť obsah popola čo možno najnižší. Spaľovanie tuhých palív s vysokým obsahom popola, napr. palivá na báze odpadov, môže byť neekonomické a väčšinou je využívané na minimalizovanie objemu vstupného paliva. Spaľovanie palív s vyšším obsahom popola vyžaduje transport vzniknutého popola.
- **Teplota tavitel'nosti popola** – je závislá na chemickom zložení popola. Teplota tavitel'nosti popola sa môže pohybovať v širokom rozsahu (700 °C – 1600 °C), pričom najmä biopalivá na báze steblovín a obilnín dosahujú teplotu mäknutia často pod 1000 °C. Táto teplota je v spaľovacom priestore často presahovaná a existuje riziko, že pri prekročení kritickej teploty dôjde k vzniku usadenín v ohnisku, na rošte a na stenách výmenníkov. Tieto nánosy popola môžu v spaľovacích zariadeniach spôsobovať rôzne problémy, napr. zabraňovať prenosu tepla vo výmenníkoch tepla, spôsobovať koróziu, znemožňovať čistenie a odstraňovanie popola, zabraňovať prívodu paliva a spaľovacieho vzduchu a mnohé iné problémy. Teploty tavitel'nosti popola sú veľmi závislé na chemickom zložení popola a na okolitej atmosfére v spaľovacom priestore. Príčiny rôznorodosti kvality paliva nie sú celkom známe. Množstvá jednotlivých prvkov tvoriacich popol biomasy sú veľmi rôznorodé v závislosti od:
  - typu biomasy (drevná, rastlinná, živočíšna biomasa),
  - úpravy biomasy (odkôrnenie, zušľacht'ovanie, atď.),
  - časti biomasy (kmeň, konáre, podzemná časť, atď.)
  - spôsobu pestovania biomasy (bez alebo so zásahom človeka, hnojenie, postrekovanie, atď.),
  - miesta pestovania biomasy (typ pôdy, nadmorská výška, spôsob dopadu slnečného žiarenia, atď.),
  - ostatných faktorov.

Prítomnosť prvkov tvoriacich popol biomasy je výsledkom chemických procesov, príjmu minerálov z pôdy a spôsobu transportu biomasy. Niektoré z týchto prvkov sú potrebné pre rast rastliny. Prvky tvoriace popol biomasy sa rozdeľujú na makronutrienty (draslík, vápnik, horčík a fosfor) a na mikronutrienty (železo, mangán a chlór). Kremík, hliník a sodík nie sú pre rast rastlín zásadné. Počas vyšších teplôt pri spaľovaní biomasy dochádza taktiež k tvorbe draselných fosforečnanov s vysokým obsahom draslíku resp. s vysokým pomerom K/Ca. Tieto fosforečnany sa ľahko tavia počas spaľovania biomasy a výsledkom je vznik spekancov a tvorba aglomerácií. Bolo zistené, že vysoký obsah draslíka vo vytvorenej tavenine popola je hlavným dôvodom spekania popola počas spaľovania biomasy s vysokým obsahom fosforu (napr. pšeničnej slamy). Zmiešanie nízkotaviteľného K – Si – dominantného paliva s nízkotaviteľným K – P – dominantným palivom môže podporiť tvorbu fosforečnokremičitanov draselných. Tieto fosforečnokremičitany draselné majú ešte nižšiu teplotu tavenia v porovnaní s pôvodnými popolmi.

### **Vplyv konštrukcie spaľovacieho zariadenia na spaľovací proces**

Konštrukcia spaľovacieho zariadenia významne ovplyvňuje účinnosť spaľovania a produkciu emisií. Výkonové a emisné parametre spaľovacieho zariadenia ovplyvňujú najmä nasledovné konštrukčné časti:

- **Spaľovacia komora a dohorievacie cesty** – zdroj tepla na spaľovanie tuhých palív musí mať dostatočne veľkú spaľovaciu komoru a dlhé dohorievacie cesty s veľkým množstvom žiaruvzdornej výmurovky, aby bola doba zdržania zložiek prchavej horľaviny v spaľovacom priestore dlhšia ako 3 sekundy. Zároveň spaľovacia komora musí byť dostatočne veľká na zaplnenie tuhého zvyšku spaľovania – popola. Vhodnou konštrukciou spaľovacej komory je možné do určitej miery zlepšiť premiešanie paliva so spaľovacím vzduchom a obmedziť unášanie popolových častíc spalínami a zabezpečiť ich odvádzanie spolu s popolom. Veľkosť a tvar spaľovacej komory a dohorievacích ciest hrá dôležitú úlohu najmä v prípade prehorievacích zdrojov tepla, ako sú napr. krbové kachle alebo krbové vložky, kde často dochádza k nasledovným chybám v procese spaľovania v dôsledku konštrukcie spaľovacej komory alebo dohorievacích ciest:
  - Pri príliš veľkej spaľovacej komore sa v niektorých oblastiach dosiahne teplota, pri ktorej sa uvoľňuje prchavá horľavina, avšak teplota nedosiahne hodnotu zápalnej teploty – viac sa prejavuje pri vlhkom palive. Výsledkom je dymiaci vrstva paliva predstavujúca zmes sadzí z nedokonalého vyhorenia základnej vrstvy a vodných pár z vlhkého paliva.
  - Pri príliš malej spaľovacej komore môže v niektorých oblastiach dochádzať k príliš intenzívnemu splyňovaniu paliva, pričom nie je zabezpečený dostatočný prívod kyslíka k iniciácii prvotného zážihu a tak dochádza k veľkým stratám plynným nedopalom.
  - Prevádzkovanie prehorievacích kotlov bez dohorievacích ciest na spaľovanie tuhých palív s vyšším obsahom prchavých látok spôsobuje veľké straty plynným nedopalom, pretože proces vyhorenia prchavej horľaviny nemá, kde prebiehať.
- **Kúrenisko** - je časť zdroja na tuhé palivo, ktoré pozostáva z roštu a zo spaľovacieho priestoru. Pri malých zdrojoch tepla s ručnou obsluhou sa palivo dodáva do kúreniska cez nakladacie dvierka umiestnené zvyčajne v čelnej (prednej) alebo hornej strane spaľovacieho zariadenia. Konštrukcia kúreniska by mala rešpektovať energetické a mechanické parametre použitého paliva. Prevádzkovanie kúreniska s iným, ako odporúčaným, palivom vedie k nesprávnej prevádzke zdroja tepla s nízkou účinnosťou spaľovania, vyššou produkciou emisií, resp. k poruchovým stavom, napr. nánosy roztaveného popola na prívode spaľovacieho vzduchu. Vysoký sklon rastlinnej biomasy k tvorbe škvary je možné obmedziť znížením teploty spaľovania, napr. cez chladený rošt alebo chladením povrchu spaľovacieho priestoru vodou. Tvorbu škvary je taktiež možné čiastočne potlačiť využitím konštrukcií kúrenísk s kontinuálnym pohybom paliva a popola. Pri kúreniskách na obilie musí byť zabezpečená vyššia odolnosť voči korózii, najmä výmenníkovej časti.
- **Rozvody spaľovacieho vzduchu** – množstvo spaľovacieho vzduchu je závislé na stechiometrickom výpočte spaľovania (teoretické, minimálne), kde hlavnú úlohu zohráva

chemické zloženie paliva, najmä obsah prvkov horľaviny – uhlíka, vodíka a síry. Privedením teoretického množstva spaľovacieho vzduchu do spaľovacieho priestoru sa nezabezpečí dokonalý proces spaľovania v celom ohnisku, pretože v spaľovacom priestore sa vytvárajú oblasti s nedostatkom spaľovacieho vzduchu, čo spôsobuje nehomogénne spaľovanie. Aby sa zabezpečilo dokonalé spaľovanie a úplné vyhorenie paliva, spaľovací proces sa v skutočnosti realizuje s určitým prebytkom spaľovacieho vzduchu  $\lambda$ . Skutočný objem suchého spaľovacieho vzduchu sa vypočíta buď na základe nameraného, alebo predpokladaného prebytku vzduchu za poslednú teplovýmennou plochou kotla. Ani pri spaľovaní s prebytkom vzduchu nie je možné prakticky zaistiť dokonalé spálenie horľaviny. Ak horľavina nezhorí úplne hovoríme o nedokonalom spaľovaní. Identifikuje sa podľa produktov spaľovania, za ktoré sa považujú hlavne CO, sadze a polycyklické aromatické uhľovodíky (PAU). Uvažuje sa, že časť uhlíka nezhorí vôbec, odchádza zo spaľovacieho zariadenia spoločne s tuhými zvyškami po spaľovaní a ďalšia časť uhlíka zhorí nedokonale na plynnú zložku CO. Pre správny proces spaľovania tuhého paliva je potrebné zabezpečiť požadované množstvo spaľovacieho vzduchu na požadovanom mieste. Z tohto dôvodu musí byť konštrukcii a umiestneniu kanálov pre prívod spaľovacieho vzduchu v spaľovacom zariadení venovaná dostatočná pozornosť. Prívod spaľovacieho vzduchu sa preto najmä v zdrojoch tepla na spaľovanie biomasy delí na:

- *Primárny vzduch* - je vháňaný pod rošt ohniska. Má význam pri fázach sušenia, splyňovania paliva, čiastočného spaľovania horľavých plynov a dohorievania tuhého uhlíka. Je dôležitý hlavne pri regulácii spaľovania a rozhorievania paliva. Primárny vzduch však nestačí na spálenie celej prchavej horľaviny, pretože k tomu spravidla nie je dostatok kyslíka alebo dostatočne vysoká teplota. Pokiaľ sa pod rošt privádza príliš mnoho vzduchu, tak sa plameň príliš ochladí, pokiaľ je vzduchu naopak málo, nemôže dochádzať k úplnej oxidácii. Z tohto dôvodu je dobré zaistiť jednak, aby spaľovacia komora mala vysokú teplotu (tepelná izolácia, predohrev spaľovacieho vzduchu) a zároveň je nutné do plameňa pridávať aj ďalší, tzv. sekundárny vzduch.
- *Sekundárny vzduch* - je vháňaný nad rošt, pričom jeho podiel by mal byť tým väčší, čím väčší je obsah prchavej horľaviny v palive. Väčšinou je pridávaný dýzami do dvoch výškových úrovní, z prednej a zadnej steny (prípadne z bokov) spaľovacej komory. Sekundárny vzduch umožňuje dohorenie nespálených plynov, čím sa uvoľní i zvyšná energia obsiahnutá v palive a do komína tak odchádza len oxid uhličitý a vodná para (a zo vzduchu nespotrebovaný dusík). Do ohniska je tento vzduch pridávaný turbulentne, aby bolo zaistené čo najlepšie premiešanie s plynnou horľavinou. Sekundárny vzduch je pre spaľovanie biomasy veľmi dôležitý. Ak by nebol privádzaný, dochádzalo by k tepelným stratám v komínových plynoch, usadzovaniu uhlíka na vnútorných plochách zariadenia a kondenzácii dechtov.
- *Terciárny vzduch* - je dodávaný do ohnísk veľkých kotlov, ktorých plamene dosahujú výšku aj niekoľko metrov. Jeho úlohou je zaručiť vyhorenie plynov, ktoré neboli spálené pri sekundárnom spaľovaní, resp. často v krbových vložkách a krbových kachliach ako vzduch, ktorý oplachuje predné sklo a chráni ho pred znečistením sadzami a dechtmí.
- **Výmenník tepla** - časť zdroja, v ktorej odovzdávajú spaliny teplo teplonosnej látke, zvyčajne rúrkovými výmenníkmi tepla. Ako teplonosné médium sa najčastejšie využíva voda. Lokálne zdroje tepla majú teplovodný výmenník tepla len sporadicky. Pre správnu funkciu zdroja tepla musí byť výmenník tepla jednoduchej konštrukcie s malou tlakovou stratou na strane spalín, pričom by mal byť jednoducho čistiteľný. Teplota povrchu výmenníka tepla by mala byť koncipovaná tak, aby pri prevádzke zdroja tepla nedochádzalo ku kondenzácii spalín na jeho povrchu. V prípade palív s nízkou teplotou tavitelnosti popola by mala konštrukcia výmenníka tepla odolávať nánosom spekancov popola, napr. aplikáciou mechanických odstraňovačov. Nánosy popola môžu spôsobiť zníženie transportu tepla zo spalín do teplonosného média, resp. znížiť priechodnosť spalín, čo môže spôsobiť unikanie spalín do vykurovaného priestoru.
- **Spalinový trakt** (spalinové cesty) – sú priestory vo vnútri zdroja tepla určené k odvodu spalín do spalinovodu (komína). Spalinové cesty v zdroji tepla musia byť navrhnuté tak, aby tlaková strata spalín bola čo možno najnižšia a efektívnosť zachytávania tuhých znečisťujúcich látok (TZL) čo možno najvyššia. Zároveň musí byť umožnené jednoduché čistenie. Výrobcovia zdrojov tepla

vytvárajú rôzne spalinové labyrinty tak, aby dokázali zachytiť čo najmenšie častice, avšak bez použitia odlučovačov nie je možné vo väčšine prípadov zachytiť častice s veľkosťou pod 10 µm. Pokiaľ spalinový trakt nie je navrhnutý správne, tak môžu nastať dve kritické situácie:

- *Príliš zložitý spalinový trakt* s vysokou tlakovou stratou – zdroj tepla musí byť vybavený spalinovým, resp. komínovým ventilátorom, nakoľko tlaková strata je vyššia ako prirodzený ťah komína. V tomto prípade je množstvo zachytených častíc väčšinou vyššie.
- *Príliš jednoduchý spalinový trakt* – zdroj tepla nemá žiadny spalinový labyrint a spaliny po opustení spaľovacej komory v prípade lokálneho zdroja tepla, resp. výmenníka tepla v prípade teplovodného kotla, prechádzajú priamo do komína. V tomto prípade sa do komína dostávajú aj častice väčších rozmerov a teda produkcia TZL je omnoho vyššia.

Spaľovacie zariadenia na spaľovanie biomasy s nízkou teplotou tavitelnosti popola sú často konštruované tak, aby dokázali udržať teplotu v spaľovacej komore pod 900 °C. Tým je možné zabezpečiť zníženie tvorby strusky a formovanie roztavených aglomerátov. Neprekročenie stanovenej teploty je možné zabezpečiť vodou chladenými stenami spaľovacej komory i roštu a recirkuláciou spalín. Ďalšou potrebnou vlastnosťou spaľovacieho zariadenia je jeho správny návrh z hľadiska prúdenia spalín. Prúd spalín je nutné viesť tak, aby sa zabránilo kontaktu odchádzajúcich spalín, ktoré môžu obsahovať častice s nízkou teplotou tavenia, s povrchmi, ktoré majú vysokú teplotu.

### **Vplyv prevádzkovania spaľovacieho zariadenia na spaľovací proces**

Spôsob prevádzkovania spaľovacieho zariadenia ma pravdepodobne najväčší vplyv na spaľovací proces a teda aj na výkonové a emisné parametre zdroja tepla. Tieto aspekty zvyčajne súvisia s použitým palivom, nastavením regulácie zdroja tepla, lokalizovaním zdroja tepla, resp. s údržbou zdroja tepla. Nižšie sú popísané najčastejšie možné aspekty vplývajúce na spaľovací proces súvisiace s prevádzkovaním zdroja tepla:

- **Parametre použitého paliva** – Používateľ zdroja tepla by mal používať len palivo odporúčané výrobcem zdroja tepla. Akékoľvek alternatívne palivo ovplyvňuje spaľovací proces, pričom sa väčšinou mení menovitý tepelný výkon zdroja tepla, znižuje účinnosť spaľovania, zvyšuje produkcia plyných a tuhých emisií a mení množstvo popola po spaľovaní. Napr. na území Slovenska sa najčastejšie ako tuhé palivo využíva kusové drevo, kde užívatelia často využívajú menej kvalitné a vlhkejšie drevo.
- **Dávkovanie paliva** – resp. prikladanie paliva do spaľovacieho zariadenia pomerne výrazne ovplyvňuje spaľovací proces. Optimálnu dávku dreva je povinný stanoviť výrobca zdroja tepla v závislosti na tepelnom výkone. Jeden zo základných rozdielov medzi automatickými zdrojmi tepla a prehorievacími je vo viac než rádovo rozdielnom množstve paliva, ktoré práve horí v spaľovacej komore. Je to dané rozdielnym spôsobom transportu paliva. U prehorievacieho zdroja tepla je celá dávka paliva pre jednu spaľovací periódu (niekoľko hodín) priložená naraz do spaľovacej komory (desiatky kg paliva). V automatickom kotle je palivo do spaľovacej komory dopravované postupne (perióda dopravy je v desiatkach sekúnd) a množstvo paliva v spaľovacej komore je o dva rády menšie (stovky gramov) ako u prehorievacieho zdroja tepla. Palivo dopravené do ohniska prechádza rôznymi fázami (ohrev, sušenie, uvoľnenie prchavých látok a horenia tuhého zvyšku) a tieto fázy sa rôzne prekrývajú, ale so zväčšujúcou sa dávkou paliva dochádza k zvýrazneniu prechodu jednotlivých fáz, takže kvalita spaľovania je u prehorievacích zdrojov tepla výrazne horšia ako pri automatických. Pri častejšom prikladaní paliva v menších dávkach do prehorievacieho zdroja tepla sa k horľavine dostane dostatok vzduchu (plameň sa „neduší“), bude účinnosť spaľovania vyššia a produkcia CO a TZL nižšia. Dávkovanie paliva sa dá pomerne jednoducho regulovať napr. na automatickom kotle na pelety, kde sa zvyčajne prívod paliva riadi pomocou času státia a času prevádzky dopravníka. Vďaka tomu je možné dodávať požadované množstvo paliva pre požadovaný tepelný výkon zdroja tepla.
- **Množstvo a prerozdelenie spaľovacieho vzduchu** – je závislé najmä od chemického zloženia horľaviny, najmä obsahu uhlíka a vodíka, a taktiež od konštrukcie spaľovacieho zariadenia, z čoho vyplýva potrebný prebytok spaľovacieho vzduchu, kedy zariadenia pracuje s najlepšou účinnosťou. V bežných podmienkach je na spálenie 1 kg dreva potrebných približne 10 m<sup>3</sup>

vzduchu. Množstvo spaľovacieho vzduchu je ovplyvnené nielen nastavením všetkých regulačných prvkov pre prívod spaľovacieho vzduchu (klapky a pod.) a parametrami komína, ale tiež dôležitú úlohu zohráva tesnosťou spaľovacieho zariadenia. Pri uzavretí všetkých regulačných prvkov prívodu primárneho, sekundárneho, prípadne terciárneho spaľovacieho vzduchu (test tesnosti) by plameň nemal horieť ďalej. Pokiaľ dochádza k prívodu falošného spaľovacieho vzduchu, spaľovací proces nie je možné efektívne riadiť. V prípade tesnosti zdroja tepla je možné regulačnými prvkami potom nastaviť a ovplyvniť intenzitu a kvalitu spaľovania. Správnym nastavením regulačných prvkov sa umožní priviesť dostatočné množstvo vzduchu na to správne miesto v spaľovacom zariadení. V prípade nesprávneho nastavenia množstva a prerozdelenia spaľovacieho vzduchu môže dôjsť k nasledovným situáciám:

- *Množstvo spaľovacieho vzduchu je dostatočné a je privádzané do správnych miest* – ideálny stav, spaľovanie je efektívne s nízkou produkciou emisií.
- *Množstvo spaľovacieho vzduchu je dostatočné, ale nie je správne prerozdelené* – V niektorých miestach spaľovacej komory dochádza vplyvom nedostatku spaľovacieho vzduchu nedokonalému spaľovaniu, pričom vzniká oxid uhoľnatý. Tuhé palivo nie je správne spálené a môže vzniknúť väčšie množstvo chemického a tuhého nedopalu.
- *Množstvo spaľovacieho vzduchu je nedostatočné* – Takmer vo všetkých miestach spaľovacej komory dochádza vplyvom nedostatku spaľovacieho vzduchu nedokonalému spaľovaniu, pričom vzniká oxid uhoľnatý. Dochádza k zvýšeniu chemického a tuhého nedopalu, zvyšuje sa produkcia emisií CO, tvorba sadzí, dechtu a TZL.
- *Množstvo spaľovacieho vzduchu je nadmerné* - Veľké množstvo spaľovacieho vzduchu môže ochladiť plameň pod kritickú hranicu a spaľovací proces prerušiť. Výsledkom je zníženie účinnosti v dôsledku nedokonalého vyhorenia uhlíka. Vonkajším prejavom opísaného stavu je tmavý dym a sadzami zanesené steny kotlového telesa a komínový prieduch.
- ***Teplota a vlhkosť spaľovacieho vzduchu*** – závisia od miesta prevádzkovania zdroja tepla. Zvyčajne nie je možné užívateľsky tieto parametre príliš meniť. Záležia však od spôsobu zabezpečenia dodávky spaľovacieho vzduchu k zdroju tepla, napr. nasávanie vzduchu z vykurovaného priestoru, resp. prívod z exteriéru. S rastúcou teplotou a klesajúcou vlhkosťou spaľovacieho vzduchu rastie množstvo energie privádzané do spaľovacieho procesu, čím rastie teplota a rýchlosť spaľovania a zvyčajne rastie aj účinnosť spaľovania. S rastúcou teplotou zvyčajne klesá produkcia emisií CO, sadzí, dechtov a TZL a rastie produkcia emisií NO<sub>x</sub>.

V nasledovnej časti sú popísané experimentálne overené spôsoby úprav zdrojov tepla od jednoduchších konštrukcií s manuálnou obsluhou k najmodernejším komplexnejším automatickým zdrojom tepla.