



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ENERGETICKÝ ÚSTAV**

ENERGY INSTITUTE

**TECHNICKO-EKONOMICKÁ STUDIE HLAVNÍHO HOŘÁKU  
ROTAČNÍ PECE**

FEASIBILITY STUDY OF BURNER OF ROTARY CHAMBER

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bc. Kristína Galková**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. Martin Lisý, Ph.D.**

**BRNO 2021**





# Zadaní diplomové práce

Ústav: Energetický ústav  
Studentka: **Bc. Kristína Galková**  
Studijní program: Strojní inženýrství  
Studijní obor: Energetické inženýrství  
Vedoucí práce: **Ing. Martin Lisý, Ph.D.**  
Akademický rok: 2020/21

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

## **Technicko–ekonomická studie hlavního hořáku rotační pece**

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

Práce bude zaměřena na problematiku zpracování technicko – ekonomické studie výměny hořáku v rotační peci pro zpracování slinku. Výměna hořáku přináší ekonomické úspory a dochází ke snížení produkovaných emisí, což je aspekt environmentální.

### **Cíle diplomové práce:**

Zpracovat rešerši hořáků pro cementárenské účely.  
Zpracovat procesně technické porovnání nového a původního hořáku.  
Zpracovat ekonomické zhodnocení přínosů nového hořáku a jeho návratnost.  
Zpracovat ekologické aspekty a přínosy výměny hořáku.

### **Seznam doporučené literatury:**

BUDAJ, Florian. Parní kotle: podklady pro tepelný výpočet. 4. přeprac. vyd. Brno: Vysoké učení technické, 1992. Učební texty vysokých škol.

DLOUHÝ, Tomáš. Výpočty kotlů a spalinových výměníků. Vyd. 2. přeprac. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002. ISBN 80-01-02591-8.

ČERNÝ, Václav, Břetislav JANEBA a Jiří TEYSSLER. Parní kotle. Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1983. Technický průvodce.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

---

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

---

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



## **ABSTRAKT**

Táto diplomová práca sa zaoberá hlavnými horákmi rotačných pecí pre výpal slinku. Prvá časť je zameraná na rešerš horákov od celosvetových výrobcov. V ďalšej časti je spracovaný popis horákov M.A.S.<sup>©</sup> a Turbu-Flex<sup>TM</sup> používaných v pecnom systéme CEMMAC a.s.. V poslednej časti je analyzovaný vplyv zmeny horáka M.A.S.<sup>©</sup> za horák Turbu-Flex<sup>TM</sup> na pecný systém spoločnosti.

### **Kľúčové slová**

Horák, slinok, emisie, tepelná spotreba, návratnosť

## **ABSTRACT**

This master's thesis talks about main burners of clinker rotary kiln. The first part is focused on the review of burners designed by main global producers. Description of the burners M.A.S.<sup>©</sup> and Turbu-Flex<sup>TM</sup> used in kiln system CEMMAC a.s. is in the next part. The influence of the replacement of M.A.S.<sup>©</sup> burner by Turbu-Flex<sup>TM</sup> burner is analysed in the last part of this thesis.

### **Key words**

Burner, clinker, emissions, heat consumption, payback

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA**

GALKOVÁ, Kristína. *Technicko-ekonomická studie hlavního hořáku rotační pece*. Brno, 2021. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132099>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Martin Lisý.

## **PREHLÁSENIE**

Prehlasujem, že som diplomovú prácu na tému **Technicko – ekonomická studie hlavního hořáku rotační pece** vypracovala samostatne s použitím odbornej literatúry a prameňov uvedených v zozname, ktorý tvorí prílohu tejto práce.

---

Dátum

---

*Bc. Kristína Galková*

## **POĎAKOVANIE**

Touto cestou by som sa chcela poďakovať vedúcemu práce Ing. Martinovi Lisému, Ph.D za jeho užitočné rady a pripomienky pri vypracovaní diplomovej práce.

Taktiež ďakujem vedeniu spoločnosti CEMMAC a.s. za možnosť spracovania praktickej časti diplomovej práce v podmienkach podniku a zamestnancom za ich trpezlivosť, pomoc a rady pri jej spracovaní.

Obrovská vďaka patrí rovnako členom mojej rodiny a priateľom, ktorí mi počas štúdia pomáhali a podporovali ma.

## OBSAH

ÚVOD.....	12
1 Výpál slinku.....	13
1.1 Zloženie suroviny pre výpál slinku.....	14
1.2 Mineralogické zloženie slinku.....	14
1.3 Slinkové reakcie.....	14
2 Rotačná pec.....	16
2.1 Horák rotačnej pece.....	16
2.2 Spaľovací vzduch.....	16
2.3 Moment horáka.....	18
2.4 Stabilita plameňa.....	18
3 Historický vývoj dizajnu horáka.....	20
3.1.1 Jednakanálové horáky.....	20
3.1.2 Viackanálové horáky.....	20
3.1.3 Low-NO <sub>x</sub> horáky.....	21
3.1.4 Horáky na alternatívne palivá.....	22
4 Prehľad hlavných horákov.....	23
4.1 KHD Humboldt Wedag - Pyro-Jet® a PyroStream®.....	23
4.2 POLYSIUS (tkIS) - Polflame® VN.....	24
4.3 DYNAMIS - D-Flame.....	25
4.4 FLSmidth - Duoflex™ a Jetflex®.....	26
4.5 FIVES PILLARD - Novaflam®.....	28
4.6 A TEC-GRECO - Flexiflame™.....	29
4.7 Porovnanie dostupných horákov.....	30
5 Pecný systém CEMMAC a.s.....	32
5.1 UNITHERM CEMCON - M.A.S.©.....	33
5.1.1 Horák M.A.S.©/5/KO.EG.SO.X v CEMMAC a.s.....	34
5.1.2 Regulácia plameňa.....	35
5.1.3 Umiestnenie horáka v rotačnej peci.....	37
5.2 Projekt zmeny horáka.....	37
5.3 FCT COMBUSTION - Turbu-Flex™.....	39
5.3.1 Horák Turbu-Flex™ v CEMMAC a.s.....	41
5.3.2 Regulácia plameňa.....	42
5.3.3 Umiestnenie horáka v rotačnej peci.....	43
5.4 Technické porovnanie oboch horákov v CEMMAC a.s.....	43
6 Analýza vplyvu zmeny hlavného horáka na pecný systém.....	44
6.1 Procesné porovnanie.....	45
6.1.1 Produkcia slinku.....	45
6.1.2 Celková spotreba tepelnej energie.....	46
6.1.3 Efektívnosť pecného systému.....	48
6.1.4 Kvalita slinku.....	48
6.2 Ekologické zhodnotenie.....	49



6.2.1	Emisie CO <sub>2</sub> .....	49
6.2.2	Emisie CO a NO <sub>x</sub> .....	50
7	Ekonomické zhodnotenie a návratnosť .....	54
8	Záver.....	56
	ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV .....	58
	ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV A SKRATIEK .....	63
	ZOZNAM PRÍLOH.....	65

## ÚVOD

Technický a ekonomický rozvoj každé krajiny úzko súvisí s rozvojom stavebníctva. V celosvetovom meradle zaznamenávame i napriek veľkým medziročným a geografickým rozdielom prakticky stály rast stavebnej výroby. S tým je veľmi úzko spätá výroba stavebných materiálov, prefabrikátov, mált a betónov vyrábaných na báze cementu.

Technológia výroby cementu a predovšetkým technológia výroby slinku, ktorý je medziproduktom pri výrobe cementu, sa za posledné dve desaťročia výrazne zmenila. V minulosti boli hlavnými zdrojmi tepla potrebného pre výpal slinku v peci predovšetkým fosílna palivá ako uhlie, ropa a zemný plyn. Tieto palivá sa začali nahrádzať rozličnými alternatívnymi palivami. Alternatívne palivá sú palivá vyrábané z priemyselného alebo komunálneho odpadu. Ich využívanie má veľký význam pre spoločnosť, pretože dochádza k šetreniu zásob fosílnych palív, k redukcii množstva odpadu na skládkach a k redukcii emisií. Využívaním alternatívnych palív cementársky priemysel prispieva k trvale udržateľnému rastu a ochrane životného prostredia. Keďže sú ceny alternatívnych palív nižšie ako u fosílnych palív, ich využitie má i ekonomický význam pre jednotlivých výrobcov cementu, pretože prispievajú k znižovaniu výrobných nákladov. [1]

Potenciál využitia alternatívnych palív je veľký. Svetový cementársky priemysel v roku 2018 vyprodukoval 3,99 miliardy ton cementu, pri čom na každú tonu vyrobeného cementu je spotrebovaných 60 – 130 kg fosílnych a alternatívnych palív ekvivalentných uhlíu. [2]

Z celkovej celosvetovej spotreby energie spotrebuje cementársky priemysel približne 2 %. Zabezpečenie dostatočnej energie na výpal slinku predstavuje 30 – 40 % celkových výrobných nákladov cementárni. Na tonu slinku je potrebných približne 3 GJ tepla. Zdrojom tepla v rotačnej peci je hlavný horák, ktorý umožňuje spaľovanie rôznych druhov fosílnych a alternatívnych palív. Palivová zmes je veľmi bohatá na uhlík, čo spôsobuje produkciu emisií CO<sub>2</sub>. Ďalším zdrojom CO<sub>2</sub> je proces kalcinácie suroviny v pecnom systéme. Cementársky priemysel tak produkuje približne 5 % z globálnych emisií CO<sub>2</sub>. [1]

Alternatívne palivá majú fyzikálne a chemické vlastnosti odlišné od tradičných fosílnych palív a taktiež variabilita týchto vlastností je väčšia. To by mohlo nepriaznivo ovplyvňovať stabilitu procesu výpalu slinku, a tým i kvalitu slinku. Preto je potrebné optimalizovať pecný systém výmenou alebo úpravou niektorých zariadení. Veľmi dôležitou súčasťou pecného systému je hlavný horák, cez ktorý sú do pecného systému privádzané rôzne druhy alternatívnych a fosílnych palív, čo zvyšuje nároky na konštrukčné prevedenie týchto horákov.

Moja diplomová práca je v prvej časti zameraná na technické a konštrukčné porovnanie horákov od hlavných svetových výrobcov. V druhej časti je spracované porovnanie prevádzky pecného systému v CEMMAC a.s. s horákom M.A.S.<sup>®</sup> od firmy Unitherm Cemcon a s horákom Turbu-Flex<sup>™</sup> od spoločnosti FCT Combustion. V závere je ekonomické zhodnotenie zmeny hlavného horáka spolu s výpočtom návratnosti investície.

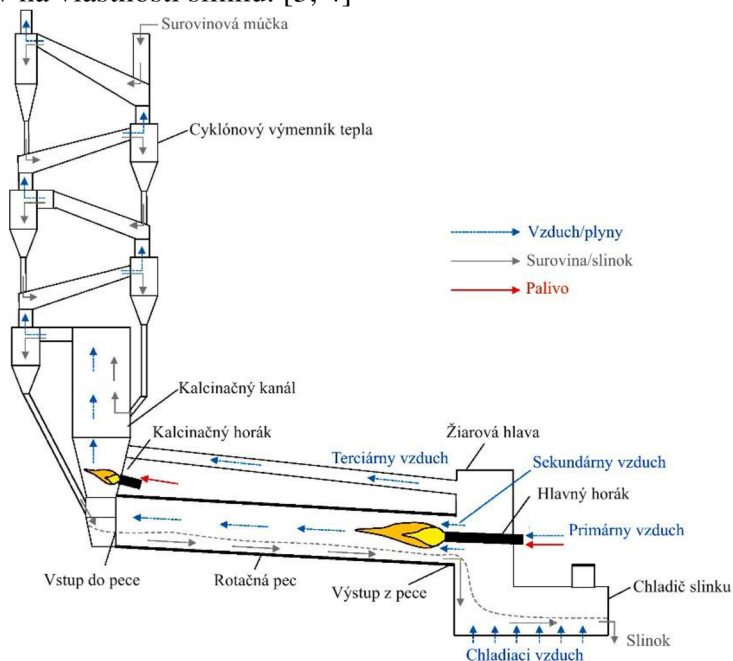
## 1 Výpal slinku

Základným procesom pri výrobe cementu je výpal slinku prebiehajúci v peci. Výpal slinku je energetický náročný proces a predstavuje najväčšiu časť nákladov na výrobu cementu, preto je veľmi dôležité optimalizovanie spaľovacieho procesu, čo má pozitívny vplyv i na výkon pece ako aj na kvalitu slinku a vyprodukované emisie.

Schéma procesu výpalu slinku, ktorý spĺňa požiadavky BAT (z angl. Best Available Techniques) je znázornená na obrázku 1.1. Surovinová zmes vhodná pre výpal slinku musí obsahovať uhličitan vápenatý  $\text{CaCO}_3$ , oxid kremičitý  $\text{SiO}_2$ , oxid hlinitý  $\text{Al}_2\text{O}_3$  a oxid železitý  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Pomer týchto jednotlivých oxidov je daný technologickým predpisom. Takto pripravená surovinová zmes sa v mlyne zomelie na surovinovú múčku. Surovinová múčka sa presne dávkuje do pecného systému a postupne prechádza cez výmenník tepla, kalcinačný kanál, pec a chladič slinku. [3]

Múčka je v cyklónovom výmenníku predhrievaná na kalcinačnú teplotu prostredníctvom horúcich plynov z pece a z kalcinačného kanála. V priestore kalcinačného kanála je zmes čiastočne skalcinovaná. Energiu potrebnú pre túto endotermickú reakciu dodáva kalcinačný horák spaľovaním vhodného paliva. Prívod terciárneho vzduchu z chladiča slinku a horúcich plynov z rotačnej pece zabezpečuje dostatočné množstvo kyslíka na spaľovanie tak, aby prebehla kalcinačná reakcia. Čiastočne skalcinovaná surovinová múčka vstupuje do rotačnej pece, ktorá funguje ako protiprúdový výmenník. Potrebná energia na priebeh endotermických reakcií v rotačnej peci je generovaná v hlavnom horáku pece a vyprodukované teplo z horáka spolu so spaľovacím vzduchom prúdi proti smeru suroviny. [3]

V peci prebiehajú zvyšné kalcinačné reakcie a tvorba slinkových minerálov  $\text{C}_2\text{S}$ ,  $\text{C}_3\text{S}$ ,  $\text{C}_3\text{A}$  a  $\text{C}_4\text{AF}$ . Tepelná energia v rotačnej peci sa prenáša predovšetkým prostredníctvom radiácie. Z časti pevných látok vzniká tavenina, ktorá vytvára povlak (nálepek) chrániaci výmurovku rotačnej pece pred vysokými teplotami. Horúci slinok vypadáva z pece do chladiča slinku, kde sa prostredníctvom vzduchu z ventilátorov chladí na teplotu približne  $80 - 100^\circ\text{C}$ . Predhriaty vzduch z chladiča pece vstupuje do pece ako sekundárny vzduch a časť sa privádza cez terciárne potrubie do kalcinačného kanála. Chladienie slinku je veľmi dôležitou časťou výroby slinku, pretože v ňom slinkové minerály dostávajú svoju formu, disperziu a orientáciu, čo má výrazný vplyv na vlastnosti slinku. [3, 4]



Obrázok 1.1 – Schéma technologického zariadenia na výpal slinku [5]

### 1.1 Zloženie suroviny pre výpal slinku

V procese výpalu slinku vznikajú slinkové minerály. Nevyhnutným predpokladom pre ich vznik je dosiahnutie potrebného zloženia vstupnej suroviny. Podiel jednotlivých zložiek vstupných surovín určuje európska norma EN 197-1. Táto norma predpisuje, že 2/3 hmotnosti slinku majú byť tvorené kremičitanmi vápenatými, pomer CaO k SiO<sub>2</sub> nesmie byť menší ako 2 a obsah MgO nesmie prekročiť 5 %. [6]

### 1.2 Mineralogické zloženie slinku

Správne pripravená surovinová zmes a správny priebeh procesu výpalu slinku zaručuje, že vyrobený slinok bude mať zloženie jednotlivých minerálov uvedené v tabuľke 1.1.

Tabuľka 1.1 Mineralogické zloženie slinku [7,8]

Skratka	Chemický vzorec	Názov	Min - max	Typická koncentrácia
C <sub>3</sub> S	(CaO) <sub>3</sub> · SiO <sub>2</sub>	trikalciumsilikát (alit)	40 - 80 %	65 %
C <sub>2</sub> S	(CaO) <sub>2</sub> · SiO <sub>2</sub>	dikalciumsilikát (belit)	10 - 50 %	15 %
C <sub>3</sub> A	(CaO) <sub>3</sub> · Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	trikalciumaluminát (aluminát)	0 - 15 %	10 %
C <sub>4</sub> AF	(CaO) <sub>4</sub> · Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> · Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	tetrakalciumaluminátferit (ferit)	0 - 20 %	10 %

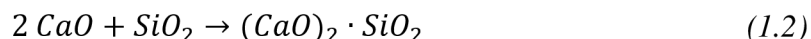
Každý z týchto hlavných slinkových minerálov je nositeľom charakteristickej vlastnosti a ich vzájomný pomer určuje konečné vlastnosti cementu. Alit prudko hydratuje, čím sa podieľa na vysokých počiatkových pevnostiach cementu. Belit, ktorý reaguje s vodou pomalšie, prispieva k pevnosti v neskorších dňoch. Aluminát ovplyvňuje rýchlosť tuhnutia cementu. Ferit je dôležitý iba v procese slinovania, pretože sa vysokou mierou podieľa na tvorbe taveniny, ktorá je dôležitá pre rýchlu tvorbu slinkových minerálov. Nezreagovaný oxid vápenatý sa v cementovom slinku vyskytuje ako voľné vápno. [9]

### 1.3 Slinkové reakcie

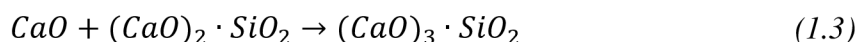
Tvorba rôznych fáz slinku pri prechode pecným systémom je znázornená v zjednodušenom fázovom diagrame na obrázku 1.2. Prvá fáza tvorby cementového slinku prebieha v cyklónovom výmenníku a kalcinátore, kde dochádza k rozkladu uhličitanu vápenatého na oxid vápenatý [10]:



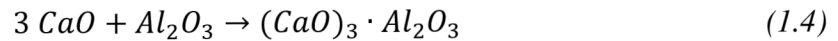
Táto reakcia je silno endotermická a spotrebuje až 60% celkovej požadovanej energie. Vstupom horúcej surovinovej zmesi do rotačnej pece sa zostávajúci CaCO<sub>3</sub> rozloží a začína prebiehať tvorba slinkových minerálov. Slinkové reakcie prebiehajú v tepelnom rozmedzí 700 – 1 450 °C. Belit sa začína formovať pri teplotách okolo 700 °C. Reakciu možno zjednodušeným spôsobom zapísať ako [10]:



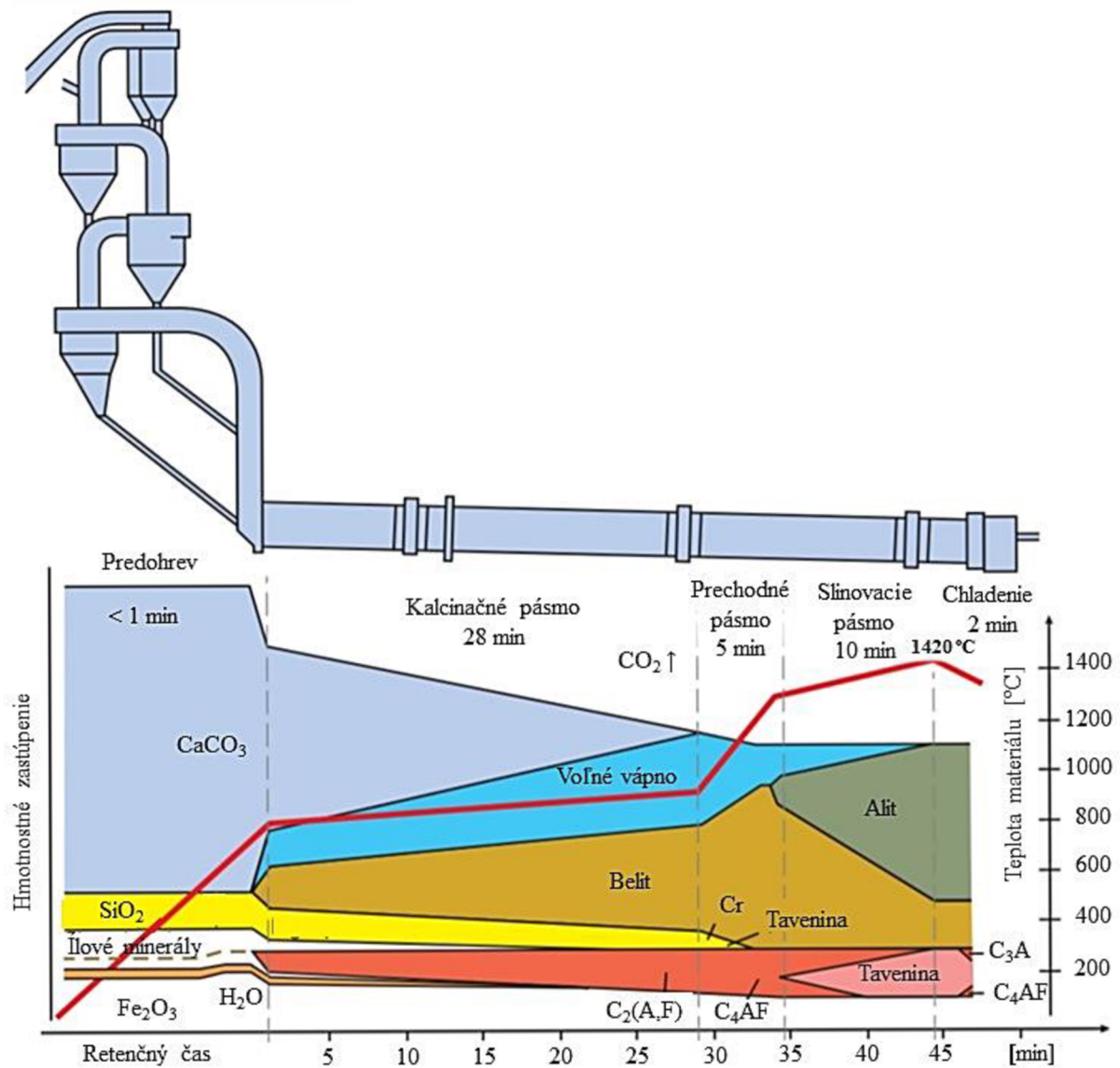
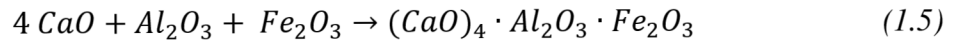
Oxid hlinitý a oxid železitý nie sú podstatnými zložkami slinku, ale slúžia ako tavidlá, ktoré znižujú energetickú náročnosť procesu. Pri teplotách okolo 1 300 °C sa začína vytvárať kvapalná fáza obsahujúca tieto oxidy, ktorá slúži k urýchleniu slinkových reakcií v dôsledku rýchlej difúzie v kvapalnej fáze, ktorá je podstatne rýchlejšia ako v tuhej fáze. Tým dochádza k rýchlejšej tvorbe alitu z kryštálov belitu a voľného vápna [10]:



Na kvalitný výpal slinku je potrebné, aby teplota predkalcinovanej suroviny v peci dosiahla slinovaciu teplotu 1420 °C a vzniknutý slinok je následne nutné rýchlo ochladiť, aby nedošlo k čiastočnej premene alitu späť na belit a voľné vápno. Pri poklese teploty zhruba na 1200 °C sa z kvapalnej fázy vykryštalizuje aluminát a ferit. Aluminát vzniká reakciou medzi CaO s Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [10]:



Ferit sa tvorí pri reakcii CaO s Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> a Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [10]:



Obrázok 1.2 – Transformácia surovinovej múčky na slinkové produkty. Hrubá červená čiara predstavuje teplotný profil materiálu. [11]

## 2 Rotačná pec

Predkalcinovaná surovina vstupuje do rotačnej pece, v ktorej prebieha séria chemických procesov smerujúcich k tvorbe slinku. Pec, ktorá pracuje ako veľký tepelný výmenník, je dlhá naklonená valcová rúra, pozostávajúca z troch hlavných častí: pätný kus, plášť a žiarová hlava. Plášť rotačnej pece má po celej dĺžke rovnaký priemer, je pozváraný z oceľových plechov a zvnútra je chránený žiaruvzdornou výmurovkou, na ktorej sa v priebehu výpalu slinku vytvorí koróziivzdorná a oteruvzdorná ochranná vrstva. Predkalcinovaná surovina vstupuje do pece cez pätný kus, ktorý je statickou časťou rotačnej pece. Slinok z pece vypadáva cez spodnú časť žiarovej hlavy do chladiča. V hornej časti žiarovej hlavy je uložený hlavný horák pece. Žiarová hlava je uložená na kolesách a koľajniciach, čo v čase odstávky uľahčuje vstup do pece. Horák je uložený na samostatnom pohyblivom vozíku, ktorý umožňuje korekciu jeho polohy počas prevádzky a tým aj zmenu dĺžky slinovacieho pásma. Žiarová hlava je vybavená inšpekčnými otvormi, ktoré slúžia pre vizuálnu kontrolu plameňa. Na oboch koncoch rotačnej pece je tesnenie, zabráňujúce prisávaniu falošného vzduchu. Typická dĺžka modernej rotačnej pece je 40 – 100 m s priemerom 3 – 6 m a sklonom 1 – 3 °, ktorá sa otáča rýchlosťou 1 – 5 ot/min. Pohyb materiálu vo vnútri pece je zabezpečený pôsobením gravitácie a rotácie pece. Pece sú dizajnované na výrobnú kapacitu od 1 000 až po 12 000 t slinku za deň. [4]

### 2.1 Horák rotačnej pece

Hlavný horák pece musí poskytovať dostatočnú tepelnú energiu na výpal kvalitného slinku. Pre minimalizáciu spotreby energie v rotačnej peci je dôležité dosiahnuť efektívny proces spaľovania. Ideálny horák by mal byť schopný:

- vytvoriť krátky, úzky plameň s maximálnym prestupom tepla k surovine
- zaistiť vysokú kvalitu produktu a vysokú výrobnú kapacitu
- zaručiť rýchle spaľovanie a úplnú premenu paliva na tepelnú energiu
- produkovať minimálne množstvo škodlivých emisií
- spaľovať s minimálnym množstvom primárneho a transportného vzduchu
- pracovať s minimálnym prebytkom vzduchu
- byť flexibilný v používanom palive

Vlastnosti plameňa priamo ovplyvňujú kvalitu slinku, stabilitu a účinnosť spaľovacieho procesu. Nedostatočný prestup tepla k surovine môže zvýšiť obsah voľného vápna v slinku na úkor nižšieho obsahu alitu, čo vedie k nižšej pevnosti cementu. Dlhý vysokoteplotný plameň môže spôsobiť nežiaduce zvýšenie granulometrie slinku, čo zvyšuje množstvo spotrebovanej energie potrebnej na jeho drvenie a mletie. Príliš široký plameň narážajúci do stien pece môže viesť k rozpadu nálepkov, a tým k zníženiu životnosti žiaruvzdornej výmurovky. Spaľovanie s nadmerným množstvom vzduchu môže znížiť energetickú účinnosť. [12]

### 2.2 Spaľovací vzduch

Druhy spaľovacích vzduchov vstupujúcich do spaľovacieho procesu:

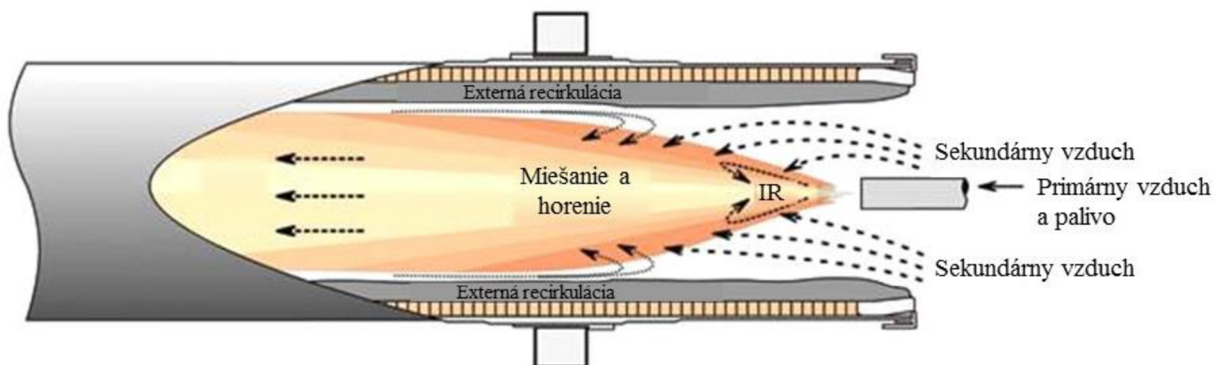
1. Primárny vzduch
2. Sekundárny vzduch
3. Terciárny vzduch

Primárny vzduch vstupuje do procesu cez hlavný horák. Do hlavného horáka je vháňaný ventilátorom alebo dúchadlom z okolitého prostredia a delí sa na transportný, axiálny a vírivý vzduch (nazývaný aj ako radiálny alebo tangenciálny). Transportný vzduch s rýchlosťou okolo 30 m/s slúži na vstrekovanie uhlia, práškových a tuhých alternatívnych palív do pece. Axiálny vzduch je do spaľovacieho prostredia vháňaný vysokou rýchlosťou a strháva horúci sekundárny



vzduch do jadra plameňa. Tento vzduch taktiež unáša plyny z plameňa ďalej do pece. Výsledná vonkajšia (externá) recirkulácia plynov má pozitívny vplyv na rýchlosť miešania plynov s palivami a na spaľovanie. Vírivý vzduch vytvára vnútornú (internú) recirkuláciu horúcich plynov, čo vedie k premiešaniu a rýchlemu zapáleniu paliva, a tým podporuje stabilitu plameňa. Pomocou axiálneho a vírivého vzduchu je možné regulovať tvar plameňa. Primárny vzduch predstavuje 5 – 15 % z celkového vzduchu potrebného na spaľovanie. [13, 14]

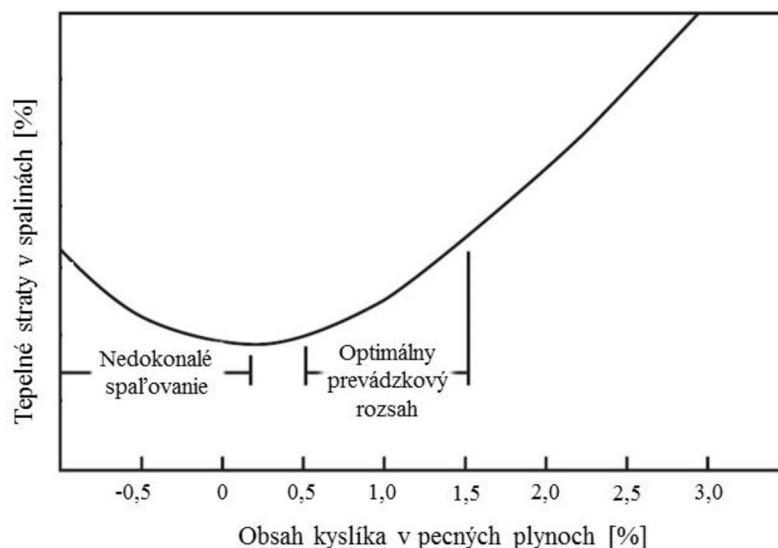
Do chladiča slinku je ventilátormi vŕhaný vzduch, ktorý ochladzuje slinku a takto predhriaty sekundárny vzduch prestupuje celým pecným systémom cez žiarovú hlavu, rotačnú pec až do cyklónového výmenníka. Jeho teplota v priestore žiarovej hlavy dosahuje cca 1000 °C. [13]



Obrázok 2.1 Plameň v rotačnej peci (IR – interná recirkulácia) [15]

Terciárny vzduch je ďalšia časť predhriateho vzduchu z chladiča slinku, ktorá je odsávaná cez tzv. prašnú komoru do kalcinačného kanála. [13]

Pri prevádzke pecného systému je snaha o dosiahnutie dokonalého spaľovania pri čo najnižšej úrovni prebytku kyslíka (vzduchu). Veľmi nízke množstvo prebytku kyslíka vedie k nedokonalému spaľovaniu a vzniku dlhého plameňa. Výsledkom sú zvýšené emisie CO a vysoké teploty výstupného plynu z pece. Ak je množstvo vzduchu príliš vysoké, zvyšuje sa spotreba tepla potrebná na ohriatie prebytočného vzduchu. Na obrázku 2.2 je znázornený vzťah medzi prebytkom kyslíka a tepelnými stratami v spalinách. [14]



Obrázok 2.2 – Vplyv obsahu kyslíka v pecných plynách na tepelné straty v spalinách [11]

### 2.3 Moment horáka

Hlavným aspektom ovplyvňujúcim rýchlosť spaľovania je proces miešania paliva a vzduchu. Pri správnej zmesi je možné dosiahnuť rýchle zapálenie s vysokou teplotou plameňa so silnými sálavými vlastnosťami.

Kvalitu zmiešania horúceho sekundárneho vzduchu s chladnejším primárnym vzduchom popisuje moment horáka. Výrobcovia po celom svete definujú rôzne vzťahy na výpočet momentu horáka. Najužitočnejšia a najjednoduchšia definícia zahŕňa súčin hmotnostného toku primárneho vzduchu a rýchlosti primárneho vzduchu na hrote horáka vydelený tepelnou energiou. Dodaná tepelná energia predstavuje celkový prívod paliva do horáka. [15]

$$I_a = \frac{m_a * v_a}{P_{th}} \quad (2.1)$$

Kde  $I_a$  je axiálny moment horáka [N/MW]

$m_a$  je hmotnostný tok axiálneho vzduchu [kg/s]

$v_a$  je rýchlosť axiálneho vzduchu [m/s]

$P_{th}$  je tepelná energia dodávaná horákom [MW]

Pre rotačnú pec s výrobnou kapacitou 1000 – 12 000 ton slinku za deň sa vstupná energia pohybuje v rozmedzí 20 – 250 MW. Táto hodnota sa môže líšiť v závislosti od konštrukcie a účinnosti horáka. Typické hodnoty momentu horáka sú 4 – 12 N/MW, pričom najnižší moment je potrebný pre spaľovanie plynného paliva a najvyšší pre spaľovanie tuhého alternatívneho paliva. [12]

Vysoký moment horáka prispôsobený podmienkam pecného systému pomáha udržať polohu plameňa a zónu horenia v správnom rozmedzí teplôt. Vyšší moment horáka má niekoľko výhod [15]:

- stabilná prevádzka pece a palivová úspornosť
- krátka zóna horenia a lepšia reaktivita slinku
- konzistentná granulometria slinku súvisiaca s efektívnejšou prevádzkou chladiča slinku
- nižšia prchavosť a recirkulácia síry
- nižšia tendencia k tvorbe nálepkov
- vyššia výrobná kapacita pece

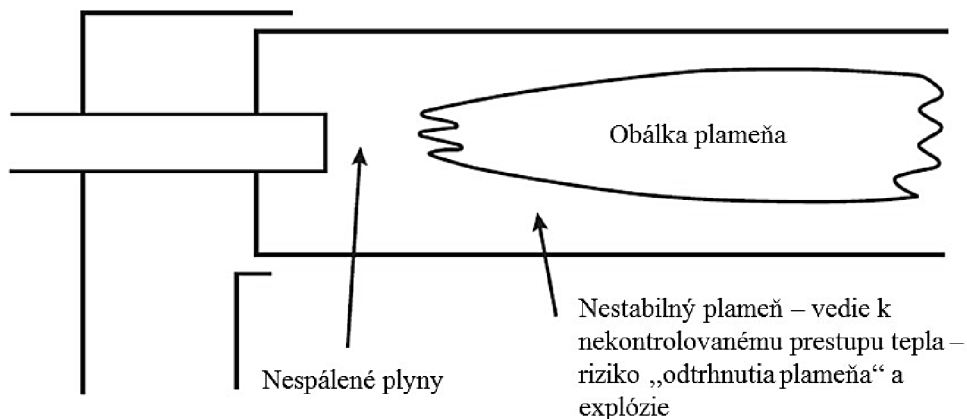
Moment horáka je veľmi užitočný parameter pre porovnanie rôznych typov horákov. Z rovnice 2.1 vyplýva, že hodnota momentu rastie so zvyšujúcim sa množstvom a rýchlosťou primárneho vzduchu. To má však za následok zvýšenú celkovú spotrebu tepla a vyššie náklady na energiu. Na dosiahnutie vyšších rýchlostí a väčšieho objemového toku primárneho vzduchu sú potrebné väčšie vysokotlakové ventilátory poprípade dúchadlá, ktoré sú však veľmi drahé. Z toho vyplýva, že vyšší moment horáka nemusí byť vždy lepší, preto je veľmi dôležité nájsť optimum. [15]

### 2.4 Stabilita plameňa

Nestabilný plameň nepriaznivo vplyva na pecnú linku a je nebezpečný pre jej prevádzku. Za nestabilný plameň je považovaný plameň s premenlivým miestom zapáľovania a meniacou sa vzdialenosťou od špičky horáka. Medzi špičkou horáka a miestom zapáľovania sa nachádza nevyhorené palivo, ktoré môže vzplanúť a následne explodovať. K tvorbe nestabilného plameňa sú viac náchylné plynové horáky, kvôli vysokej teplote zapáľovania, pomalej rýchlosti šírenia plameňa a užším hraniciam zapáľovania paliva.



Zabezpečenie včasného zapálenia paliva vstupujúceho do spaľovacej zóny podporí stabilitu plameňa. Pri niektorých aplikáciách to je dosiahnuté prostredníctvom kontinuálnej prevádzky zapalovacieho horáka, ale v rotačnej peci je najlepším spôsobom zapalovania paliva zabezpečenie recirkulácie horúcich plynov do privádzaného paliva. Keď je pec na prevádzkových teplotách, energia na zapalovanie paliva je poskytovaná aj radiáciou z výmurovky. [11]

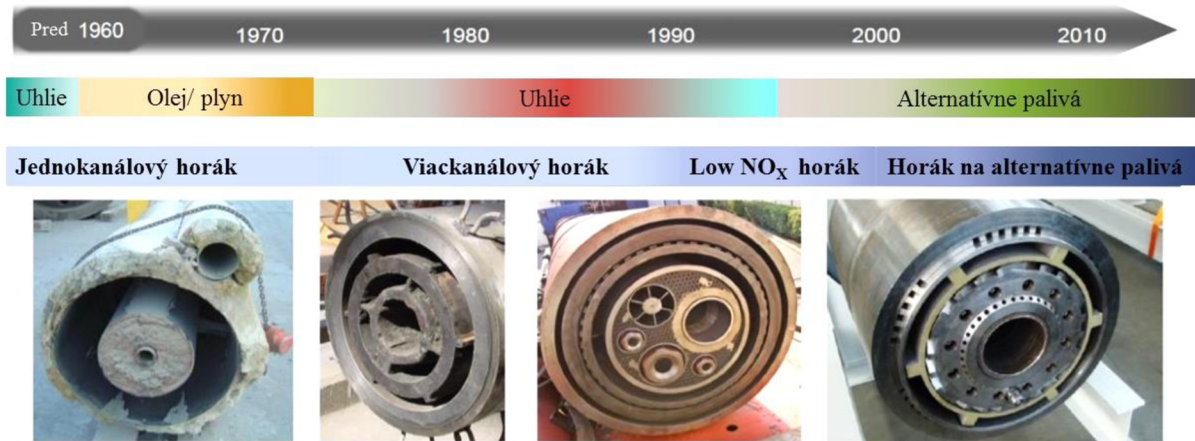


Obrázok 2.3 – Nestabilný plameň spôsobený premenlivým miestom zapalovania paliva [11]

Externá cirkulácia vnáša horúce spaľovacie plyny späť do oblasti zapalovania a prispieva k stabilizácii zapalovacieho bodu. Interná cirkulácia využíva vírenie palivového alebo vzduchového prúdu. Vírenie však rozširuje plameň, ktorý vplýva na výmurovku a skracuje jej životnosť. Na zabezpečenie stability plameňa plynového horáka je potrebné efektívne využiť vírenie pre palivo aj pre primárny vzduch. U olejových horákov sa zvyčajne využíva iba vírenie primárneho vzduchu. Je potrebné zdôrazniť, že každý jeden horák je konštruovaný na konkrétny pecný systém s ohľadom na druh paliva a spaľovacie prostredie. [11]

### 3 Historický vývoj dizajnu horáka

Prvé pecné horáky boli konštruované prednostne na spaľovanie uhlia. Zhruba v polovici 20. storočia sa prešlo od spaľovania uhlia na využívanie ropných produktov, avšak počas ropnej krízy v 70. rokoch sa znovu začalo využívať uhlie. Koncom 20. storočia vzrástol dopyt po spaľovaní alternatívnych palív a sprísnil sa právne predpisy v oblasti životného prostredia, predovšetkým emisné limity pre oxidy dusíka. Z dôvodu meniacich sa spaľovaných palív a požiadaviek na spaľovací proces vzniklo niekoľko generácií pecných horákov. [13]



Obrázok 3.1 – Časová os vývoja horákov [13]

#### 3.1.1 Jednokanálové horáky

Jednokanálový horák patrí k najjednoduchším pecným horákom, ktorý bol vyvinutý na spaľovanie práškového uhlia. Palivo spolu s primárnym vzduchom bolo privádzané cez jeden kanál s výstupnými rýchlosťami medzi 40 – 60 m/s. Horák bol prevádzkovaný s vysokým množstvom primárneho vzduchu (15 – 45 %) na zabezpečenie vysokého momentu horáka. Produktoval dlhý úzky plameň s nízkou intenzitou prenosu tepla. Jednokanálové horáky bolo veľmi ťažké riadiť počas nábehu a neposkytoval žiadny spôsob regulácie tvaru plameňa počas prevádzky, pretože neboli vybavené axiálnym a radiálnym vzduchom, ktoré regulujú tvar plameňa. [14]

#### 3.1.2 Viackanálové horáky

Okolo roku 1980 bol vyvinutý trojkanálový horák so samostatným kanálom pre uhlie a kanálmi pre primárny vzduch, čo umožnilo vyššiu výstupnú rýchlosť primárneho vzduchu a prívod vírivého vzduchu. Tým sa dosiahlo lepšie zmiešanie paliva a horúceho sekundárneho vzduchu a v porovnaní s jednokanálovým horákom vytvára kratší vysokoteplotný plameň s lepším prestupom tepla do slinku. Toto riešenie poskytuje variabilné možnosti úpravy tvaru plameňa počas prevádzky, čo uľahčuje prispôbenie horáka špeciálnym požiadavkám jednotlivých pecných systémov. Separátnou zmenou dĺžky a priemeru plameňa je možné optimalizovať prevádzku pece, stabilizovať tvorbu nálepkov, regulovať teplotu plášťa a kvalitu slinku. Vysoké rýchlosti primárneho vzduchu zabezpečujú vysoký moment horáka aj napriek zníženému množstvu primárneho vzduchu na úrovni 10 – 15 % spaľovacieho vzduchu. Vďaka tomu dochádza k menšej spotrebe tepla potrebnej na ohriatie vzduchu. [14]

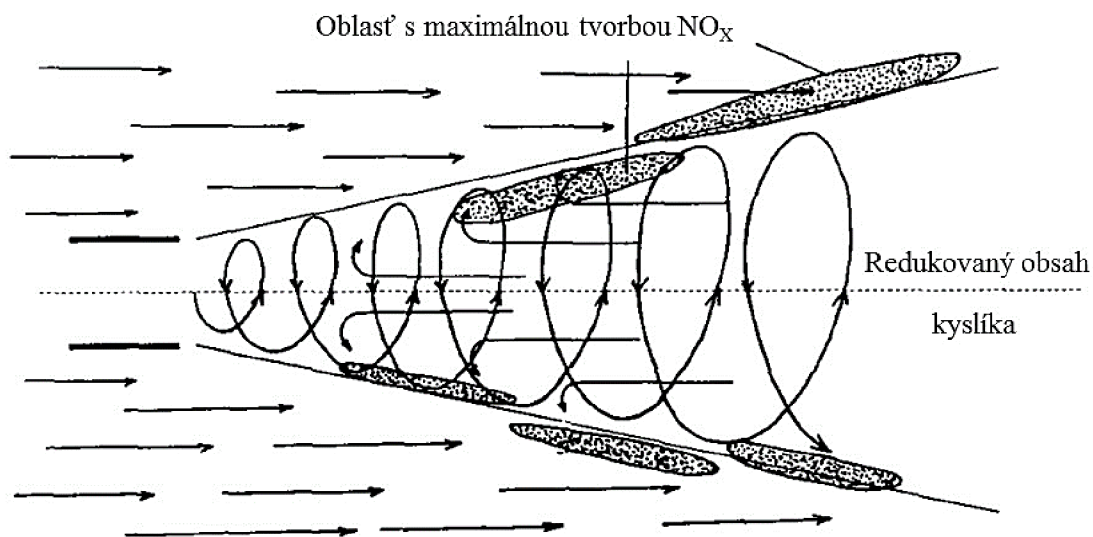
Konštrukcia viackanálového horáka zvyčajne pozostáva zo stredového kanála na kvapalné alebo plyné palivo, ktorý je obklopený vírivým vzduchom. Nasleduje kanál pre uhlie, ktoré je vstrekované nízkou rýchlosťou, čím sa znižuje opotrebenie kanála a umožňuje lepšie tvarovanie plameňa. Množstvo prepravného vzduchu by malo byť okolo 2 – 3 % spaľovacieho vzduchu pre zabezpečenie impulzného prietoku. [14]

### 3.1.3 Low-NO<sub>x</sub> horáky

Z dôvodu prísnejších environmentálnych právnych predpisov vznikli koncom 20. storočia horáky s nízkym množstvom primárneho vzduchu, nazývané taktiež Low-NO<sub>x</sub> horáky. Tvorba NO<sub>x</sub> rastie so zvyšujúcou sa teplotou, obsahom kyslíka a retenčným časom paliva. Konštrukcia horáka musí zabezpečiť zapálenie paliva v atmosfére s nízkym obsahom kyslíka. Základné princípy znižovania oxidov dusíka sú: [16]

- stabilizácia plameňa a vnútorná recirkulácia spaľovaných plynov
- udržiavanie paliva pozdĺž stredovej osi plameňa, aby sa zabránilo unikaniu paliva mimo plameň, kde je vyššia koncentrácia kyslíka
- znížené množstvo primárneho vzduchu na 8 – 10 % spaľovacieho vzduchu (v porovnaní s 10 – 15 % u viacnásobného horáka)
- rovnomerné rozloženie tepla v plameni, aby sa zabránilo vzniku oblastí s vysokou teplotou tzv. teplotný peak

Najvyššia koncentrácia vzniknutých NO<sub>x</sub> je v miestach, kde sa primárny a sekundárny vzduch mieša s horúcimi spaľovacími plynmi. [14]



Obrázok 3.2 Oblasť s maximálnou tvorbou NO<sub>x</sub> [14]

Recirkulácia spaľovacích plynov smerom k horáku umožňuje postupné spaľovanie, ktoré znižuje emisie NO<sub>x</sub>. Recirkulačné horúce plyny rýchlo ohrejú a zapália palivá pri nižšom množstve kyslíka. [17]

Bod vznietenia taktiež ovplyvňuje tvorbu oxidov dusíka. V prípade vznietenia paliva v dolnej časti pece dochádza k spaľovaniu paliva pri vysokých koncentráciách kyslíka. Preto je potrebné, aby dochádzalo k zapáleniu paliva v blízkosti hrotu horáka. [16]

Najvyššie množstvo oxidov dusíka vytvárajú jednokanálové horáky, pretože majú oneskorené zapálenie. V prípade viacnásobného horáka má vplyv vírenia protichodné účinky. Vírenie vytvára vnútornú recirkuláciu, ktorá zabezpečuje postupné spaľovanie, zatiaľ čo na druhej strane zvýšené vírenie strháva sekundárny vzduch, vďaka čomu sa zvyšuje koncentrácia kyslíka v mieste vznietenia. [16]

Umiestnenie vírivého vzduchového kanála vzhľadom k palivovému kanálu môže mať taktiež vplyv na tvorbu NO<sub>x</sub>. Ak je vírivý vzduch umiestnený z vnútornej strany uhoľného kanála, môže vytláčať palivo do horúceho sekundárneho vzduchu, kde bude horieť pri vyšších

koncentráciách kyslíka. Z tohto dôvodu je najlepšie umiestnenie palivového kanála z hľadiska zníženej tvorby oxidov dusíka v strede horáka obklopený prúdmi primárneho vzduchu. [16]

Typ paliva môže rovnako ovplyvniť produkciu oxidov dusíka. Vysoko prchavé palivo sa vyznačuje skorým zapálením, čo vedie k zníženiu  $\text{NO}_x$ . Svoju úlohu zohráva aj veľkosť častíc, ak je zrno uhlia príliš hrubé, oneskorí sa zapálenie a zvýšia sa  $\text{NO}_x$ . Na druhej strane, jemné častice uhlia majú tendenciu spôsobovať tzv. tepelné peak-y, ktoré zvyšujú tvorbu  $\text{NO}_x$ . [16]

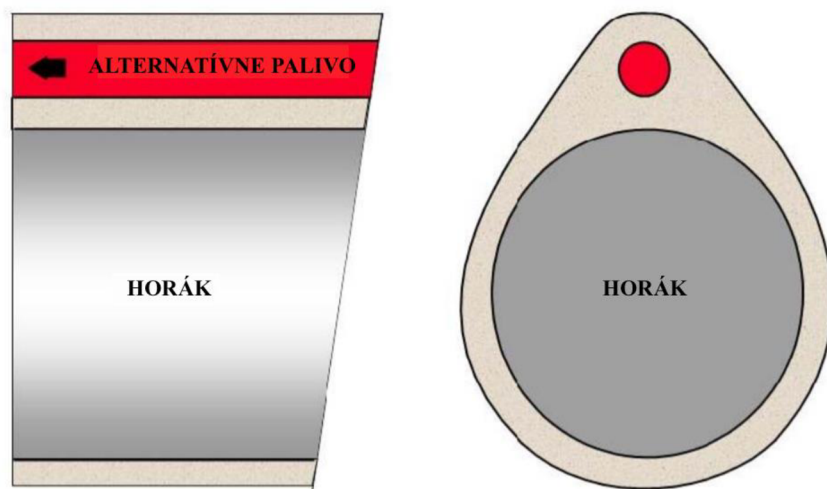
Skúsenosti s prevádzkovaním Low- $\text{NO}_x$  horákov ukazujú, že je možné dosiahnuť až 35% zníženie oxidov dusíka vyprodukovaných v rotačnej peci. [6]

Horáky s nízkym množstvom primárneho vzduchu zvyčajne nie sú vhodné na vysoké využitie alternatívnych palív. Nízka koncentrácia primárneho vzduchu a moment horáka nie sú dostatočné na ľahké zapálenie a je pravdepodobné, že palivo sa dokonale nespáli. [18]

### 3.1.4 Horáky na alternatívne palivá

Súčasný vývoj horákov sa zameriava na zvýšenie podielu spaľovania alternatívnych palív. Alternatívne palivá s nízkou výhrevnosťou znižujú teplotu plameňa a ich použitie je možné v kombinácii s vysoko výhrevnými palivami. Preto je potrebný flexibilný horák, ktorý umožňuje spaľovanie ľubovoľného druhu alternatívnych palív a ich kombinácie, pri zachovaní výrobných kapacít, kvality slinky a environmentálnych požiadaviek. [19]

Prvé pokusy s používaním alternatívnych palív v spaľovacom procese boli uskutočnené prostredníctvom samostatného kanála umiestneného na hornej časti existujúceho horáka. Táto technika dávkovania sa ukázala ako nevhodná, pretože časť paliva nestihla zhorieť v plameni a nespálené častice horeli v slinku, čo znižovalo jeho kvalitu. Horením paliva v slinku v spodnej časti pece, kde prevládajú redukčné podmienky, spôsobovalo zvýšené emisie na výstupe z pecného systému. [19]



Obrázok 3.3 Dávkovanie alternatívneho paliva cez samostatný kanál [19]

Moderné horáky rotačnej pece sú vybavené viacerými kanálmi pre prívod práškových aj zrnitých tuhých palív, rovnako ako aj plyných a kvapalných palív. Kanály pre alternatívne palivá sú umiestnené v strede horáka, aby sa palivo udržalo čo najdlhšie v strede plameňa a dokonale zhorelo. Tuhé alternatívne palivá majú tendenciu vytvárať usadeniny a upchávať kanály, preto sa pre tieto druhy uprednostňuje dávkovanie cez kanál s väčším priemerom. [19]



## 4 Prehľad hlavných horákov

V tejto kapitole sú popísané horáky na alternatívne palivá od rôznych výrobcov (Tabuľka 4.1). Konštrukčné rozdiely medzi jednotlivými horákmi sú zhrnuté v kapitole 4.7.

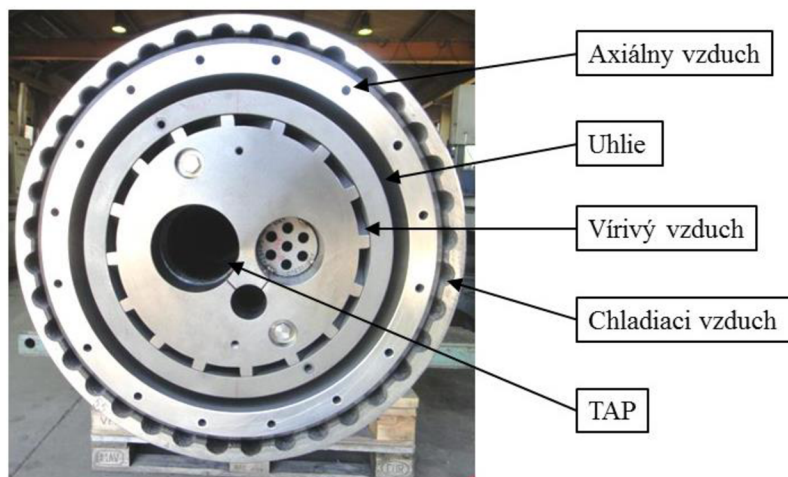
Tabuľka 4.1 Prehľad porovnávaných horákov

Výrobca	Horák
KHD Humboldt Wedag	Pyro-Jet® Pyrostream®
POLYSIUS	Polflame® VN
DYNAMIS	D-Flame
FLSMIDTH	Duoflex™ Jetflex®
FIVES PILLARD	Novafam®
A TEC-GRECO	Flexiflame™

### 4.1 KHD Humboldt Wedag - Pyro-Jet® a PyroStream®

Horáky Pyro-Jet® s 30-ročnou históriou sú nainštalované vo viac ako 700 rotačných peciach po celom svete. [20]

Uhlie a iné práškové palivá sú privádzané cez kužeľovitý prstencový kanál. Axiálny vzduch prúdi vysokou rýchlosťou cez niekoľko samostatných dýz umiestnených po obvode horáka. Prostredníctvom centrálne umiestnenej vírivkej vzduchovej dýzy je privádzaný vírivý prúd vzduchu, ktorý zabezpečuje dôkladné premiešanie paliva so vzduchom. Vonkajším medzikružím prúdi chladiaci vzduch, ktorý chráni vnútro horáka pred vysokými teplotami. Kanály pre alternatívne palivá sú umiestnené v centrálnej časti horáka. [20]



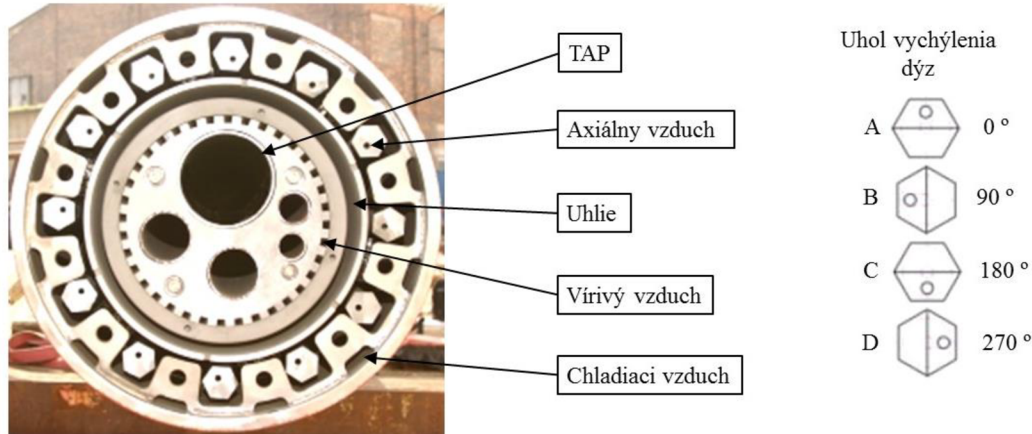
Obrázok 4.1 Horák Pyro-Jet® [21]

Tento typ horáka je vhodný pre spaľovanie uhlia, kvapalných a plyných palív, taktiež aj pre tuhé palivá s nízkym podielom prchavej horľaviny a rôzne alternatívne palivá. [20]

Ďalším typom horáka firmy KHD Humboldt Wedag je horák Pyrostream®. Tento typ horáka zachováva osvedčený koncept vhaňania vzduchu z oboch strán uhoľného kanála, ale na rozdiel od horáka Pyro-Jet®, umožňuje reguláciu smeru prúdenia axiálneho vzduchu, čím je zabezpečené lepšie tvarovanie plameňa. Horák Pyrostream® bol vyvinutý s cieľom dosiahnuť čo najvyššiu možnú mieru náhrady fosílnych palív alternatívnymi palivami. [20]

Axiálny vzduch prúdi vysokou rýchlosťou cez 12 nastaviteľných dýz usporiadaných po obvode horáka s miernym odchýlením od osi horáka. Každá z 12 uhlových dýz je

priskrutkovaná k samostatnej vzduchovej trubke, ktorú je možné otáčať o 360 °. Dýzy je možné nastavovať separátne alebo synchronne, pričom sú konvergentné alebo divergentné k smeru osi horáka. Natáčanie dýz počas prevádzky umožňuje mechanizmus, ktorý je umiestnený na studenom konci horáka. Jednotlivé dýzy sú uložené v prstencovom kanáli, ktorý je chladený pomocou chladiaceho vzduchu. Kanály pre rôzne alternatívne palivá sú umiestnené v strede horáka. [22]



Obrázok 4.2 Horák Pyrostream® [23]

Horáky Pyro-Jet® a Pyrostream® od spoločnosti KHD Humboldt Wedag sú prevádzkované s rôznymi množstvami primárneho vzduchu. Typická konštrukcia týchto horákov je navrhnutá na 7 – 11% podiel primárneho vzduchu z celkového spaľovacieho vzduchu (súčiniteľ prebytku vzduchu  $\alpha = 1,1$ ). Tento podiel tvorí [20]:

- 2,4 – 4,4 % – vírivý vzduch (150 m/s,)
- 2 – 4 % – transportný vzduch pre práškové palivo (25 m/s)
- 1,6 % – axiálny vzduch (300 m/s)
- 1 % – chladiaci vzduch (15 m/s)

Priemerný moment horáka je na úrovni 4,5 – 5,5 N/MW, v prípade potreby je možné horák prispôbiť na moment až do 11 N/MW. Maximálna tepelná kapacita horákov od spoločnosti KHD je do 250 MW. [20, 24]

#### 4.2 POLYSIUS (tkIS) - Polflame® VN

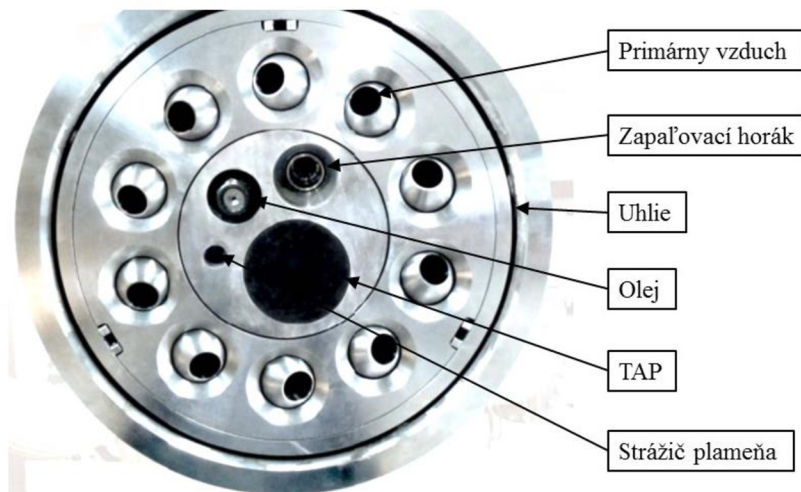
Spoločnosť s viac ako 150 ročnou históriou momentálne vystupuje pod novým menom thyssenkrupp Industrial Solutions (tkIS). Ich najnovším modelom horáka je horák Polflame® Variable Nozzle (VN). [21]

Primárny vzduch je privádzaný do spaľovacieho priestoru cez pohyblivé dýzy umiestnené po obvode horáka. Vďaka mechanizmu nastavenia týchto dýz, je možné všetky trysky nezávisle nastavovať nielen radiálne, ale aj tangenciálne. To umožňuje plynulé nastavenie vírenia plameňa (medzi 10 ° – 40 °) a divergencie plameňa (medzi -5 ° až 15 °) v závislosti od aktuálnych požiadaviek. Je možná akákoľvek kombinácia medzi vírením a divergenciou. Tieto pohyblivé dýzy umožňujú jednoduchú reguláciu dĺžky plameňa a tvaru plameňa počas prevádzky. [25]

Uhlie je do spaľovacieho priestoru privádzané cez prstencový kanál, ktorý je umiestnený z vonkajšej strany primárneho vzduchu. Ak sú na prevádzku pece používané tuhé alternatívne palivá, je možné ich vstrekať centrálnym kanálom v strede horáka, alebo cez samostatné vstrekovacie potrubie umiestnené nad horákom. Nastaviteľné dýzy primárneho vzduchu

zabezpečujú v oboch prípadoch optimálne miešanie alternatívnych palív so štandardnými palivami a horúcim sekundárnym vzduchom. [26]

Horák Polflame® Variable Nozzle je vhodný pre spaľovanie uhlia, lignitu, koksu, antracitu, drevárskeho odpadu, živočíšnej múčky, tuhých palív, ľahkých a ťažkých olejov, odpadných olejov a zemného plynu. Tepelná kapacita týchto horákov určených pre cementárske rotačné pece sa pohybuje medzi 10 až 300 MW. [25]

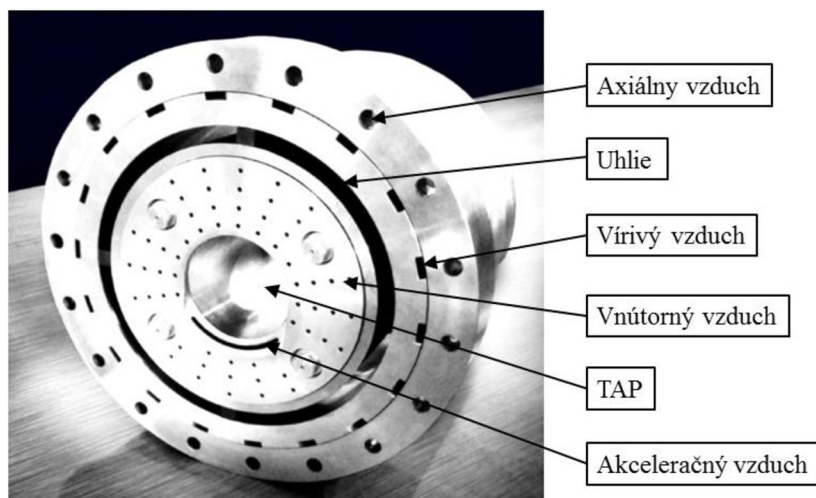


Obrázok 4.3 – Horák Polflame® VN [26]

#### 4.3 DYNAMIS - D-Flame

Brazílska firma Dynamis doteraz dodala viac ako 60 horákov. Ich technické riešenie je zamerané na maximalizáciu vťahovania sekundárneho vzduchu do plameňa, spojenú s minimalizáciou vstrekovania primárneho vzduchu. V porovnaní s ostatnými výrobcami horákov zdôrazňuje, že moment horáka nesmie byť jediným porovnávacím parametrom medzi jednotlivými horákmi. [27]

Horák D-Flame pre prívod uhlia do spaľovacieho prostredia využíva prstencový kanál, ktorý je umiestnený z vnútornej strany vzduchových kanálov. Primárny vzduch je rozdelený do troch prúdov so samostatnými prívodnými kanálmi: axiálny, vírivý (tangenciálny) a vnútorný. Vonkajší axiálny vzduch slúži na vytvorenie turbulencií a privádza horúci sekundárny vzduch do priestoru plameňa. Tangenciálny/vírivý vzduch vytvára vnútornú recirkuláciu na podporu stability plameňa. Vnútorný vzduch chladí vnútorné kanály a privádza kyslík do jadra plameňa. [27]



Obrázok 4.4 – Horák D-Flame [28]

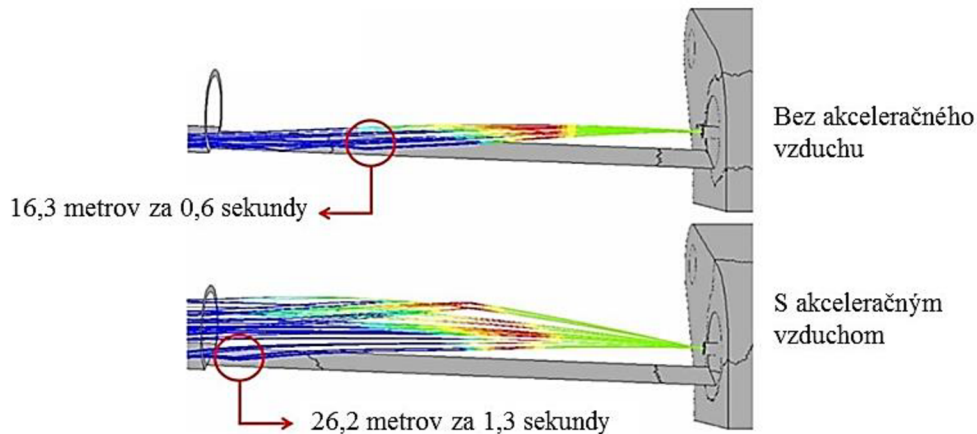


Pre prívod primárneho vzduchu je používané dúchadlo, ktoré dodáva vzduch s tlakom až do 500 mbar. Tento primárny vzduch predstavuje 6 – 12 % zo stechiometrického množstva spaľovacieho vzduchu. [27]

Tabuľka 4.2 Parametre primárneho vzduchu horáka D-Flame [28]

	Množstvo (podiel zo stechiometrického množstva)	Tlak	Rýchlosť
Axiálny vzduch	5,0 – 7,0 %	250 – 500 mbar	190 – 280 m/s
Vírivý vzduch	1,5 – 3,0 %	70 – 200 mbar	110 – 180 m/s
Vnútorý vzduch	0,2 – 1,0 %	10 – 150 mbar	45 – 190 m/s

Stredový kanál, ktorým sú vstrekané alternatívne palivá je vybavený štrbinou pre akceleračný vzduch, ktorý je vstrekaný rýchlosťou 200 m/s, vďaka čomu sa predĺži čas zotrvania paliva v plameni vid' obrázok 4.5. [28]



Obrázok 4.5 – Vplyv akceleračného vzduchu [28]

Množstvo štúdií spoločnosti D-Flame dokazuje, že konštrukcia hlavy horáka s menším počtom dýz má tendenciu zvyšovať množstvo nasávaného sekundárneho vzduchu v prvých dvoch metroch od hlavy horáka. Na druhej strane však treba brať do úvahy nutnosť intenzívnejšieho chladenia, aby nedošlo k prehriatiu a rýchlejšiemu opotrebeniu horáka. [29]

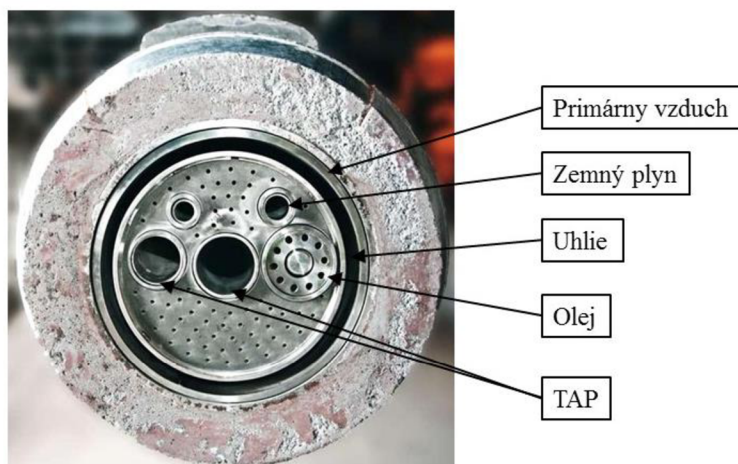
S výkonom v rozmedzí 10 – 115 MW sú horáky D-Flame vhodné na spaľovanie práškových palív (uhlie, koks), plyných palív (zemný plyn, LPG) vykurovacích olejov a alternatívnych palív na báze odpadov. [30]

#### 4.4 FLSmidth - Duoflex™ a Jetflex®

Prvý horák Duoflex™ bol predstavený v polovici 90. rokov a doteraz bol nainštalovaný vo viac ako 300 závodoch po celom svete. [31]

Uhlie je privádzané prstencovým kanálom, ktorý je z vonkajšej strany obklopený dvoma koncentrickými kanálmi primárneho vzduchu (axiálny a radiálny/vírivý). Tieto dva vzduchové prúdy sa vo vnútri horáka zmiešajú a cez kuželovitú nastaviteľnú dýzu sú vstrekané do spaľovacieho priestoru. Vírenie vzduchu je spôsobované pevnými lopatkami umiestnenými pred vzduchovou dýzou. Pomer axiálneho a radiálneho vzduchu je možné regulovať, a tým meniť stupeň vírenia. Zasúvaním a vysúvaním kuželovitej dýzy je možné tvarovať plameň v širokom rozsahu. Riešenie s dvoma vonkajšími vzduchovými kanálmi tvorí pevnú konštrukciu, ktorá minimalizuje deformáciu horáka, a tým zvyšuje životnosť. V centrálnej časti horáka sú umiestnené kanály pre rôzne druhy alternatívnych palív. [31, 32]





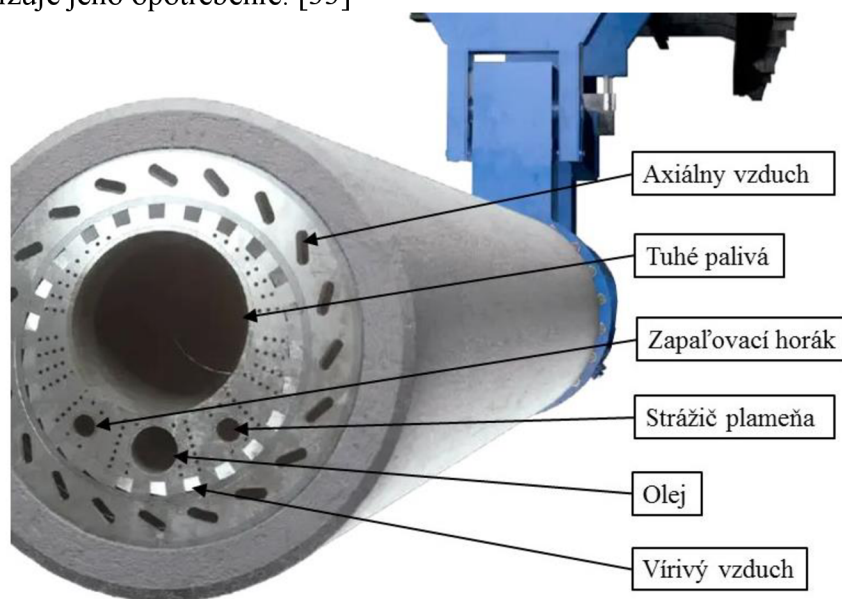
Obrázok 4.6 – Horák Duoflex™ [12]

Ventilátor primárneho vzduchu poskytuje maximálny tlak 250 mbar, v prípade potreby je možné tento tlak zvýšiť až na 400 mbar. Horák Duoflex™ normálne pracuje so 6 – 8 % podielom primárneho vzduchu (vzhľadom k stechiometrickému množstvu vzduchu). [32]

Horák Duoflex™ je možné použiť na spaľovanie práškoveho uhlia, vykurovacieho oleja, zemného plynu alebo na akúkoľvek kombináciu týchto palív. Môže byť vybavený prídavným potrubím pre druhotné palivá ako sú podrvené plasty, drevná štiepka atď. Výkon týchto horákov sa pohybuje medzi 20 – 250 MW, vďaka čomu vyhovujú aj najväčším rotačným peciam. [32]

Vzhľadom na neustále sa zvyšujúcu mieru náhrady fosílnych palív predovšetkým tuhými alternatívnymi palivami, vyvinula spoločnosť FLSmidth horák Jetflex®.

Axiálny vzduch s vysokou rýchlosťou je privádzaný obdĺžnikovými dýzami, čím je dosiahnutá väčšia plocha, ktorou tento vzduch prúdi, v porovnaní s kruhovými dýzami použitými pri horákoch Duoflex™. Toto riešenie pomáha intenzívnejšiemu miešaniu paliva s horúcim sekundárnym vzduchom, čo má kladný vplyv na rýchlosť zapálenia paliva a stabilitu plameňa. Vírivý vzduch prúdi taktiež cez obdĺžnikové dýzy. Výhody týchto obdĺžnikových dýz pre axiálny a vírivý vzduch umožnili opustiť koncepciu tradičného prstencového palivového kanála. Palivo je kontinuálne privádzané priamym, neprerušovaným potrubím s kruhovým prierezom, čo znižuje jeho opotrebenie. [33]



Obrázok 4.7 – Horák Jetflex® [33]

Horák Jetflex® umožňuje použitie jedného palivového kanála pre viacero druhov tuhých palív ako je uhlie, petrolejový koks a tuhé alternatívne palivo (drewná štiepka, plastové čiastočky). Tým sa minimalizuje množstvo studeného prepravného vzduchu do spaľovacieho priestoru, čo znižuje spotrebu tepla a energie. [33]

Horák Jetflex® sa vyrába s výkonom až do 250 MW a s momentom v rozmedzí 7 až 11 N/MW. [33]

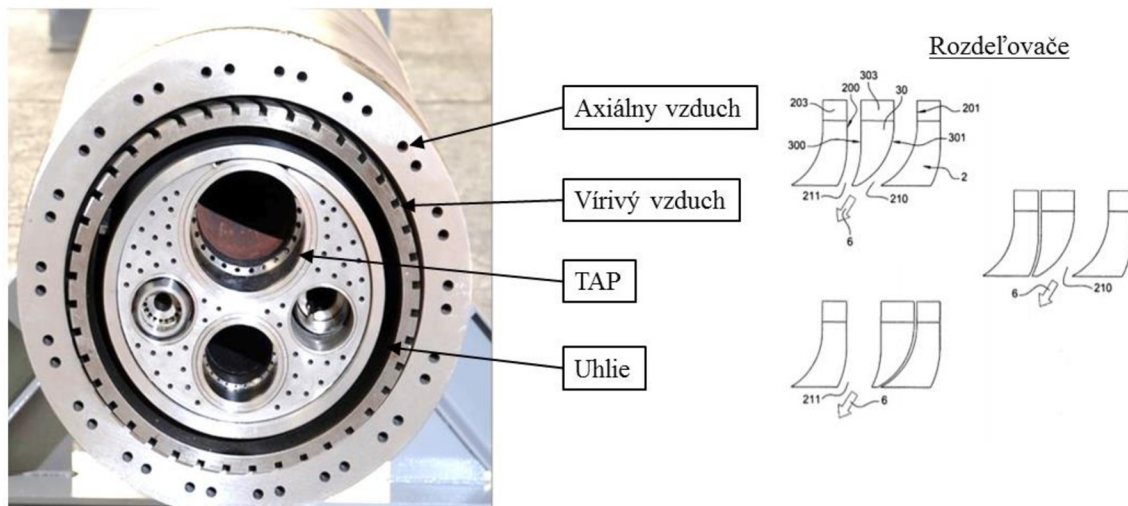
FLSmidth vyvinul ďalší typ horáka označený ako Jetflex® PLUS s dvoma novými konštrukčnými riešeniami. Prvým sú otočné obdĺžnikové trysky zabezpečujúce optimálne nastavenie plameňa v závislosti od vlastností paliva. Druhým konštrukčným prvkom je vysúvateľný centrálny palivový kanál znižujúci rýchlosť paliva. Tento prvok výrazne predlžuje čas zotrvania paliva v plameni a umožňuje skoré zapálenie paliva nízkej kvality. [33]

#### 4.5 FIVES PILLARD - Novaflam®

Spoločnosť Fives Pillard patrí k najväčším dodávateľom horákov. Ich posledným modelom je horák Novaflam®. [21]

Kľúčovým konštrukčným prvkom horáka Novaflam® je jeden spoločný kanál primárneho vzduchu, ktorý je na hrote horáka rozdelený na dva výstupy: jeden pre axiálny vzduch a druhý pre radiálny vzduch. Axiálny vzduch je do plameňa vstrekován cez dýzy s konštantným prierezom. Radiálny vzduch privádza vírivú zložku do plameňa, ktorú je možné regulovať jednoduchým spôsobom. Pomocou kľuky na zadnom konci horáka je možné pohybovať centrálnym hrotom horáka tam a späť. Tento pohyblivý prstenec je vybavený drážkami, nazývané aj ako rozdeľovače. Vysúvaním hrotu horáka, je možné meniť uhol vstrekovania radiálneho vzduchu a regulovať pomer jednotlivých zložiek vzduchu bez úpravy množstva primárneho vzduchu. [34]

Vďaka prívodu axiálneho a radiálneho vzduchu rovnakým kanálom je možné použiť ventilátor so štandardným tlakom 230 mbar, čím sa zníži spotreba elektrickej energie a náklady na údržbu, ktoré sú obvykle spojené s vysokotlakovými dúchadlami. [35]



Obrázok 4.8 – Horák Novaflam® a princíp fungovania rozdeľovačov [34, 36]

Moment horáka Novaflam® sa pohybuje v rozmedzí 4 – 9 N/MW v závislosti na spaľovanom palive a tepelná kapacita od 8 do 200 MW. Podiel axiálneho a radiálneho vzduchu je od 50/50% do 70/30%. [37]

Tabuľka 4.3 – Prevádzkové parametre horáka Novaflam® [37]

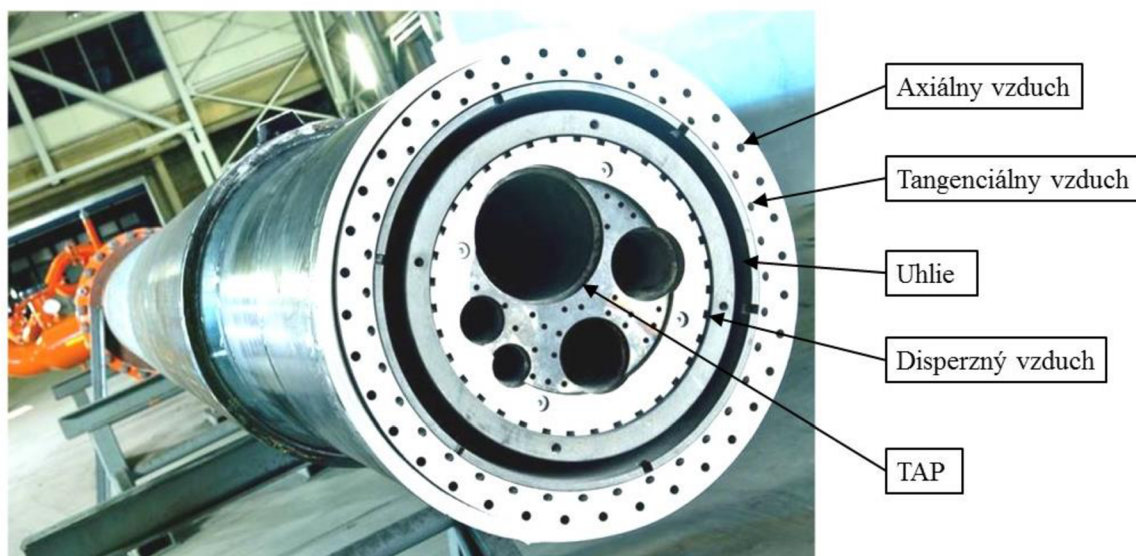
Palivo	Moment	Množstvo primárneho vzduchu (podiel zo stechiometrického množstva vzduchu)
Plynné palivo	4 – 5 N/MW	7 – 8 %
Uhlie, koks, antracit	6 – 7 N/MW	9 – 10 %
Alternatívne tuhé palivo	8 – 9 N/MW	11 – 12 %

Horák Novaflam® je možné inštalovať v rotačných peciach spaľujúcich uhlie, ťažký olej, naftu, odpadové oleje, zemný plyn a tuhé odpady (papier, plasty, drevná štiepka, drvené pneumatiky). [35]

#### 4.6 A TEC-GRECO - Flexiflame™

Brazílska spoločnosť Greco Burner sa stala známou v 90. rokoch minulého storočia vďaka prof. Clementovi Grecovi, ktorý je jej zakladateľom. [21]

Horák Flexiflame™ je riešený tak, že tuhé práškové palivo vstupuje do spaľovacieho prostredia prostredníctvom prstencového kanála. Primárny vzduch je rozdelený medzi tri hlavné kanály: axiálny (vonkajší), tangenciálny a disperzný. Vonkajší axiálny vzduch vystupuje vysokou rýchlosťou cez samostatné dýzy. Tangenciálny a disperzný vzduch obklopujú prstencový palivový kanál z oboch strán, čím vzniká tzv. dvojité vírenie. Stred horáka s kanálmi pre rôzne druhy alternatívnych palív je chladený pomocou chladiaceho vzduchu. [38]



Obrázok 4.9 – Horák Flexiflame™ [39]

Horáky Flexiflame™ sú vyrábané s výkonom až do 175 MW. Celkové množstvo primárneho vzduchu predstavuje 10 – 13 % zo stechiometrického množstva vzduchu, moment horáka je v rozmedzí 8 – 10 N/MW. [40]

Tabuľka 4.4 – Parametre primárneho vzduchu horáka Flexiflame™ [40]

	Množstvo (podiel zo stechiometrického množstva)	Tlak	Rýchlosť
Axiálny vzduch	4 – 6 %	180 – 350 mbar	Do 175 m/s
Tangenciálny vzduch	1,5 – 3 %	100 – 250 mbar	Do 200 m/s
Disperzný vzduch	1,5 – 3 %	50 – 180 mbar	Do 175 m/s
Transportný vzduch pre tuhé palivo	1,5 – 2 %	-	35 – 45 m/s

Tento typ horáka je možné použiť pri spaľovaní jedného druhu paliva alebo variabilnej zmesi palív ako napríklad koks, uhlie, ľahký a ťažký vykurovací olej, nafta, zemný plyn, kvapalný odpad, živočíšna múčka, biomasa, použité pneumatiky. [40]

#### 4.7 Porovnanie dostupných horákov

V súčasnosti sa vývoj horákov zameriava na zvýšenie podielu náhrady fosílnych palív alternatívnymi palivami a s tým spojenú flexibilitu horáka pre rôzne variácie palív a kvality palív.

Porovnaním konštrukčných riešení hlavných horákov od jednotlivých výrobcov je možné konštatovať, že najväčší rozdiel je v riešení kanálov primárneho vzduchu. Je potrebné zdôrazniť, že vyhodnotiť univerzálny horák ideálny pre akúkoľvek rotačnú pec, je prakticky nemožné z dôvodu rozdielneho dizajnu pecných systémov a rozličnej palivovej základne jednotlivých výrobcov slinku.

Tabuľka 4.5 – Konštrukčné porovnanie dostupných horákov

	Prstencový uholný kanál	Rozdelenie primárneho vzduchu	Primárny vzduch zvnútra uholného kanála	Primárny vzduch zvonku uholného kanála	Primárny vzduch prstencovým kanálom	Primárny vzduch cez dýzy	Výkon horáka [MW]
Pyro-Jet®	×	×	×	×		×	Do 250
Pyrostream®	×	×	×	×		×	Do 250
Polflame® VN	×		×			×	10 – 300
D-Flame	×	×		×		×	5 – 175
Duoflex™	×	×*		×	×		20 – 250
Jetflex®		×		×		×	10 – 250
Novafam®	×	×**		×		×	8 – 200
Flexiflame™	×	×	×	×		×	Do 175

\*dva prúdy vzduchu sú pred výstupom z horáka zmiešané do jedného prúdu

\*\*jeden prúd vzduchu je pred výstupom z horáka rozdelený do dvoch prúdov

Vo väčšine prípadov je primárny vzduch vháňaný do spaľovacieho prostredia cez dýzy, okrem horáka Duoflex™. Tento horák síce využíva dva prúdy vzduchu, avšak tieto vzduchy sú pred výstupom z horáka zmiešané a do spaľovacieho prostredia dávkané cez prstencový kanál. Takže, ak dôjde k zmene pomeru medzi axiálnym a radiálnym vzduchom, celkový tlak vzduchu (a zároveň aj moment) na výstupe z horáka ostáva rovnaký.

Rozdelenie primárneho vzduchu do viacerých vzduchových prúdov je výhodné najmä pre tvarovanie plameňa. Horák Polflame® VN túto možnosť nevyužíva. Všetok primárny vzduch vháňa cez nastaviteľné dýzy, pričom reguláciu tvaru plameňa zabezpečuje uhlové nastavenie



týchto dýz. Horák Novaflam® taktiež využíva jeden kanál primárneho vzduchu, avšak tento vzduch je na výstupe z horáka rozdelený medzi axiálny a radiálny prúd pomocou rozdeľovačov. Vďaka tomu je možné regulovať pomer medzi jednotlivými prúdmi vzduchu bez nutnosti zmeny množstva primárneho vzduchu.

Najpoužívanejšie usporiadanie primárneho vzduchu vzhľadom k uhoľnému kanálu je z jeho vonkajšej strany, prípadne z oboch strán. Tým je zabezpečený dostatočný prísun kyslíka a udržanie paliva v plameni. Jedine horák Polflame® VN je konštruovaný s kanálom primárneho vzduchu iba z vnútornej strany prstencového uhoľného kanála. Palivo je vstrekané do horúcej atmosféry bohatej na kyslík, čo vedie k okamžitému zahriatiu a vznieteniu paliva. Horák Flexiflame™ dávkuje vírivý vzduch z vonkajšej aj z vnútornej strany uhoľného kanála, čím vzniká dvojité vírenie. Vďaka tomu dochádza k intenzívnemu miešaniu práškoveho paliva so vzduchom, čo vedie k rýchlemu zapáleniu a k stabilizácii plameňa.

Práškové palivo (najčastejšie uhlie) je výhodné dávkovať prstencovým kanálom, kvôli veľkej stykovej ploche palivového prúdu so vzduchovým prúdom. Horák Jetflex® ako jediný z predstavených horákov využíva pre prívod uhlia priamym potrubím s kruhovým prierezom. Umožňuje to použitie dýz pre primárny vzduch s obdĺžnikovým prierezom, ktoré zabezpečujú väčšiu stykovú plochu vzduchu s palivom.

V tejto kapitole sú popísané horáky používané predovšetkým v Európe. Ďalšími významnými výrobcami horákov je spoločnosť Unitherm Cemcon s horákom M.A.S.® a spoločnosť FCT Combustion s horákom Turbu-Flex™. Tieto horáky sú podrobne porovnané v praktickej časti diplomovej práce, pretože oba boli použité v pecnom systéme CEMMAC a.s.. Horák M.A.S.® bol používaný od roku 2006 do konca roku 2019. V roku 2020 bol nahradený horákom Turbu-Flex™.

## 5 Pecný systém CEMMAC a.s

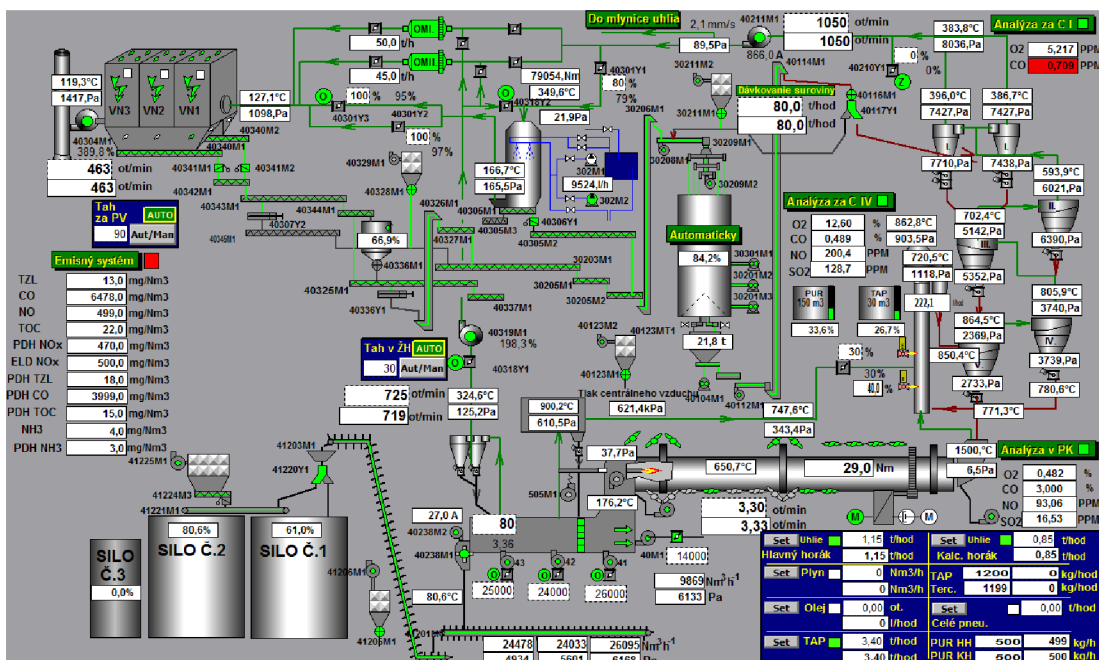
História výroby cementu v Hornom Srní sa datuje od roku 1929, kedy bola postavená cementáreň s jednou šachtovou pecou s výkonom 100 t slinku za deň. Postupne sa budovali ďalšie šachtové pece, čím sa zvyšovala kapacita výroby. Nová moderná linka rotačnej pece s cyklónovým výmenníkom tepla bola uvedená do prevádzky v roku 2000. Odvtedy dochádza k neustálej optimalizácii pecného systému a výrobného procesu tak, aby spĺňal aktuálne legislatívne požiadavky s cieľom zvyšovať kvalitu výsledného produktu a efektívnosť výroby a redukovať vplyv priemyselnej činnosti na životné prostredie. [41]

Pecná linka spoločnosti CEMMAC a.s je zložená z cyklónového výmenníka LUCE 5 ST 2/370.460, kalcinačného kanála, rotačnej pece, roštového chladiča slinku a terciárneho potrubia horúcich plynov. Výrobná kapacita pecného systému je 1 200 ton slinku za deň pri tepelnej spotrebe približne 3800 kJ/t<sub>slinku</sub>.

Rotačná pec s priemerom 3,4 m a dĺžkou 46 m je uložená na troch nosných kruhoch, ktoré sú podopreté 6 kladkami. Tieto kladky sú súčasťou betónového základu pece. Pec sa otáča okolo pozdĺžnej osi pod sklonom 3,5 % pre zabezpečenie pohybu surovín vo vnútri rotačnej pece. Rotácia pece je proti smeru hodinových ručičiek (pri pohľade od horáka) s rýchlosťou 5 ot/min. Pohon pece zabezpečuje elektromotor cez prevodovku, pružnú hriadeľ a predlohu na hlavný pastorok zaberajúci do ozubeného venca, ktorý je pripevnený na valcový plášť oceľovými perami. V prípade výpadku elektrickej energie je pec poháňaná záložným dieselaagregátom, ktorý umožňuje pootáčanie pece cez pomocný pohon tak, aby nedošlo k poškodeniu pece.

Tepelná energia potrebná pre plynulý priebeh procesu výpalu slinku je dodávaná viacerými spôsobmi:

- hlavným horákom rotačnej pece spaľujúci rôzne druhy palív (uhlie, zemný plyn, tuhé/kvapalné/práškové alternatívne palivá)
- kalcinačným horákom v kalcinačnom kanáli spaľujúci čierne uhlie
- dýzou práškoveho paliva v kalcinačnom kanáli
- sklzom pneumatík do pätného kusa rotačnej pece
- sklzom alternatívnych palív do kalcinačného kanála



Obrázok 5.1 Vizualizácia pecnej linky

### 5.1 UNITHERM CEMCON - M.A.S.®

Spoločnosť Unitherm Cemcon dodáva horáky na svetový trh už 60 rokov. Od roku 1993 vyrábajú horák M.A.S.® (Mono-Airduct-System), ktorý sa vyznačuje inovatívnym riešením primárneho vzduchu cez nastaviteľné dýzy s minimálnou stratou momentu horáka. [21]

Pri prevádzke horáka so separátnym prívodom radiálneho a axiálneho primárneho vzduchu sa regulácia tvaru plameňa uskutočňuje znížením momentu horáka (menej radiálneho vzduchu = dlhší plameň, menej axiálneho vzduchu = kratší plameň). Inovatívnosť riešenia horáka M.A.S.® je v tom, že mení iba smer vstrekovania primárneho vzduchu pri zachovaní konštantného množstva a tlaku vzduchu, čím je schopný dosiahnuť maximálny moment horáka pri akomkoľvek tvare plameňa. Smer vstrekovania primárneho vzduchu, a tým aj tvar plameňa, je možné regulovať prostredníctvom pružných nastaviteľných dýz. Vďaka tomu je možné prevádzkovať horák s vysokým dávkovaním tuhého alternatívneho paliva, ktoré si vyžaduje vyšší moment horáka ako pri prevádzke s fosílnymi palivami. [42]

Ďalšou nevýhodou horákov s dvoma kanálmi primárneho vzduchu je vyššia tlaková strata v kanáloch a pri prechode dýzami. K významným stratám dochádza taktiež pri miešaní axiálneho a radiálneho vzduchu. Všetky tieto nedostatky systém Mono-Airduct eliminuje. [42]

Nastaviteľné dýzy sú umiestnené v prstencovom kanáli primárneho vzduchu v blízkosti ústia horáka. Kľuka na studenom konci horáka umožňuje plynule nastavovať tieto dýzy v rozmedzí 0 – 40 °, a tým korigovať tvar plameňa. [42]



Obrázok 5.2 – Nastaviteľné dýzy primárneho vzduchu horáka M.A.S.® [42]

Špičku plášťa horáka je možné oddeliť, čo významne uľahčuje údržbárske práce a skracaje dobu jeho výmeny. Zadná neopotrebovaná časť plášťa horáka sa v takomto prípade nevymieňa a prednú časť je možné vymeniť samostatne. Ďalšou výhodou deliteľného prevedenia je potreba malého priestoru na demontáž a montáž. [42]

Horáky M.A.S.® možno aplikovať pri spaľovaní zemného plynu, ťažkého vykurovacieho oleja, uhlia, tuhých a kvapalných alternatívnych palív alebo pri ich kombinácii. Sú navrhnuté tak, aby dosiahli moment primárneho vzduchu 5 – 12 N/MW. Prevádzkové skúsenosti však preukazujú, že pre dosiahnutie ideálnych spaľovacích podmienok postačuje moment horáka na úrovni 5 – 8 N/MW, avšak v prípade potreby sú dodávané horáky aj s vyšším momentom. Pre prívod vzduchu sú používané radiálne ventilátory ako aj dúchadlá. [43, 44]

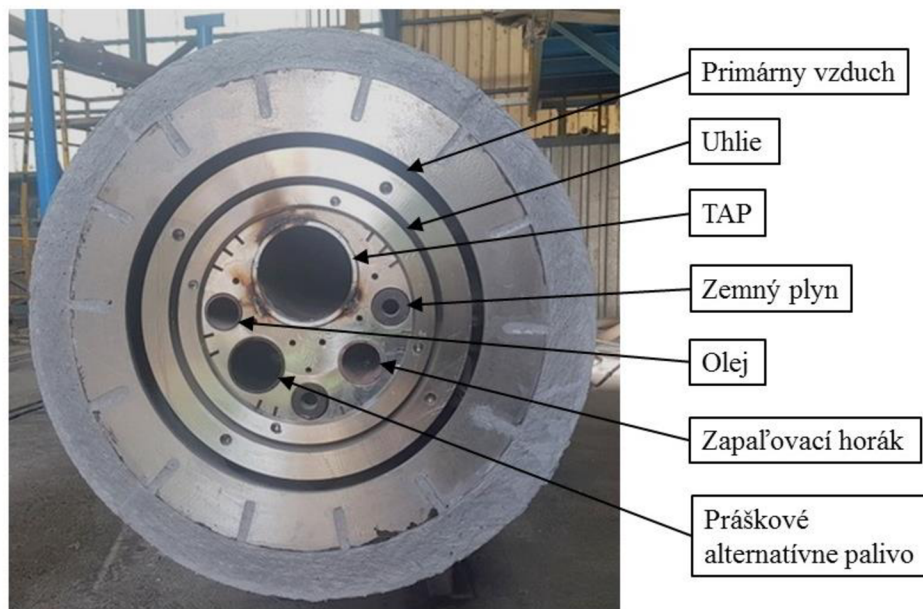
Tabuľka 5.1 Štandardné hodnoty pre dimenzovanie ventilátora/dúchadla horáka M.A.S.© [44]

Spaľované palivo	Množstvo primárneho vzduchu (podiel zo stechiometrického množstva vzduchu)	Tlak primárneho vzduchu
Zemný plyn	3 – 6 %	100 mbar
Vykurovací olej	6 – 8 %	160 mbar
Uhlie	8 – 10 %	200 mbar
Koks, antracit	10 – 12 %	250 mbar
Tuhé alt. Palivo	10 – 12 %	250 mbar

### 5.1.1 Horák M.A.S.©/5/KO.EG.SO.X v CEMMAC a.s.

Horák M.A.S.©/5/KO.EG.SO.X je kombinovaný horák pre spaľovanie práškoveho uhlia, zemného plynu, ľahkého a odpadného oleja, tuhého a práškoveho alternatívneho paliva.

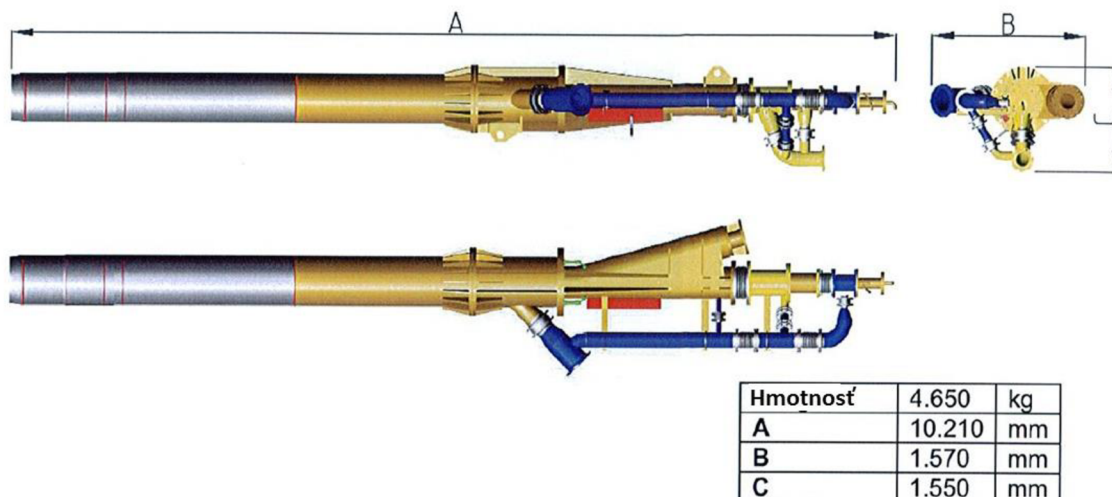
Primárne fosilne palivo je privádzané cez prstencový uhoľný kanál, ktorý je z vonkajšej strany obklopený dýzami primárneho vzduchu. Pre alternatívne palivá sú k dispozícii dva prírodné kanály umiestnené v strede horáka. Jeden kanál sa používa pre prívod tuhých alternatívnych palív (TAP), druhý kanál je využívaný pre prívod práškoveho alternatívneho paliva. Na konci kanála pre TAP môže byť výstupný uhol alternatívneho paliva ovplyvnený tlakom vertikálneho prúdu vzduchu, nazývaný taktiež pneumatiký deflektor. Zvyšovaním tlaku vertikálneho vzduchu sa zvyšuje aj uhol výstupu a rozptýlenie paliva. V centre horáka sú taktiež umiestnené 2 trysky zemného plynu používané pri náhrebe pece po dlhšej odstávke, prípadne na stabilizáciu prevádzky pece, kanál pre zapaľovací horák a kanál pre prívod kvapalného paliva.



Obrázok 5.3 – Horák M.A.S.©

Celková hmotnosť horáka je približne 6300 kg, pričom hmotnosť samotného horáka je 4650 kg, zvyšných 1650 kg tvorí žiaruvzdorná výmurovka. Celková dĺžka horáka je približne 10 m, priemer horáka vrátane výmurovky je 700 mm. Tepelný výkon horáka je 30 MW.





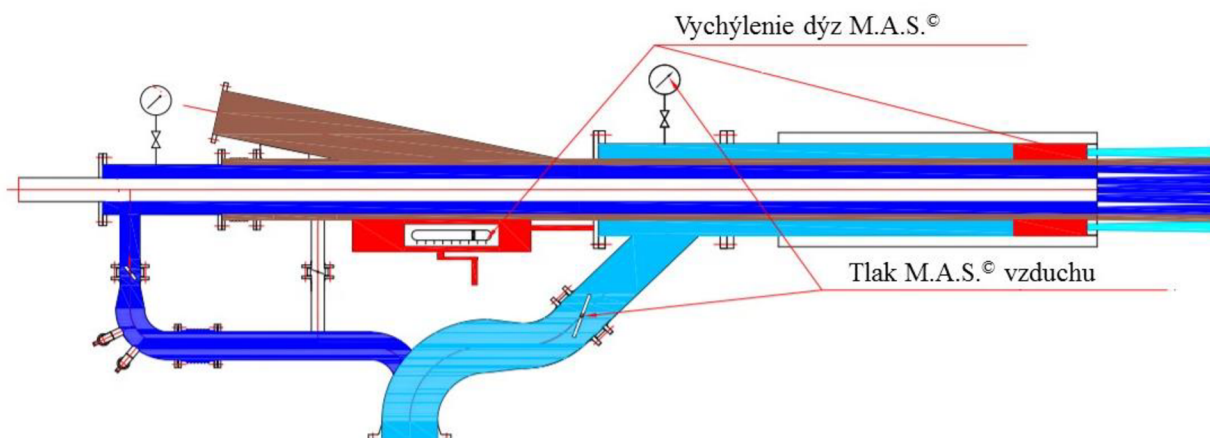
Obrázok 5.4 Horák M.A.S.® s hlavnými údajmi [45]

Pre správne fungovanie horáka je veľmi dôležitý spôsob privádzania a regulácie primárneho vzduchu. Zdrojom primárneho vzduchu pri horáku M.A.S.® je vysokotlakový ventilátor HRVB 40,1400K od spoločnosti Venti Oelde (tlak 25 000 Pa, objemový prietok plynu 80 000 Nm<sup>3</sup>/h). Horák M.A.S.® je v pecnom systéme spoločnosti CEMMAC a.s. prevádzkovaný so 14,5% podielom primárneho vzduchu zo stechiometrického množstva vzduchu.

### 5.1.2 Regulácia plameňa

Regulácia tvaru plameňa je veľmi jednoduchá, a preto je možná rýchla reakcia v prípade zmeny spaľovacích podmienok. Operátor musí upraviť iba:

- Vychýlenie dýz M.A.S.®
- Tlak M.A.S.® (vírivého) vzduchu



Obrázok 5.5 Regulácia plameňa horáku M.A.S.® [46]

Regulácia vychýlenia dýz sa vykonáva pomocou nastavovacieho zariadenia, ktoré je umiestnené zvonka na studenej strane horáku a je ľahko prístupné. Zmena nastavenia sa vykonáva ručným otáčaním kľuky. Pootáčaním kľuky sa mení uhol vychýlenia nastaviteľných dýz, ktoré vytvárajú úzky alebo široký plameň. Keďže je vzduch privádzaný jedným ventilátorom, je možné udržať konštantný moment horáku pri akomkoľvek rozsahu vírenia.

Zariadenie na nastavenie plameňa je navrhnuté s ohľadom na rozmery pece. Vplyv na tvar plameňa je možné vidieť na stupnici od 1 do 9. Čísla na stupnici priamo súvisia s nastavením uhla vychýlenia dýz.



Obrázok 5.6 Stupnica nastavovacieho zariadenia tvaru plameňa

- Pri hodnotách 7, 8, 9 sú konce pružných dýz silno odklonené a primárny vzduch je privádzaný do vysokej rotácie. Plameň je kratší a širší. Čísla na číselníku zodpovedajú približne 10-násobku tangensu, teda vzťahu medzi axiálnou a tangenciálnou zložkou. Čiže hodnota 9 na stupnici predstavuje  $\text{tg } \alpha = 0,9 \rightarrow$  uhol vychýlenia  $\alpha \approx 40^\circ$ . [45]
- Pri hodnotách 1, 2, 3 sú konce dýz sotva odklonené a primárny vzduch je vstrekován takmer v axiálnom smere. Plameň je dlhší a tenší. ( $1 \rightarrow \text{tg } \alpha = 0,1 \rightarrow$  uhol vychýlenia  $\alpha \approx 10^\circ$ ). [45]

Tlak primárneho vzduchu taktiež ovplyvňuje tvar plameňa. Zvýšenie tlaku M.A.S.<sup>©</sup> vzduchu uľahčuje zmiešanie sekundárneho vzduchu a vyhorenie paliva. Plameň je kratší, intenzívnejší a teplota plameňa je vyššia. Ak je tlak M.A.S.<sup>©</sup> vzduchu znížený, plameň je dlhší a slabší a teplota plameňa poklesne.

Centrálny vzduch ovplyvňuje kvalitu spaľovania a pomáha pri stabilizácii plameňa. Bez centrálneho vzduchu vzniká plameň ďaleko od špičky horáka, je slabý a nestabilný. Čím viac centrálneho vzduchu sa použije, tým bude plameň bližšie k ústiu horáka, bude intenzívnejší a stabilnejší.

V nasledujúcej tabuľke je odporúčané nastavenie tlaku M.A.S.<sup>©</sup> vzduchu, tlaku centrálneho vzduchu (CA) a hodnoty na stupnici pre reguláciu vírenia M.A.S.<sup>©</sup> vzduchu (Swirl M.A.S.<sup>©</sup>). Regulácia týchto veličín je závislá od spaľovaného paliva a aktuálneho tvaru plameňa.

Tabuľka 5.2 Odporúčané nastavenie primárneho vzduchu horáka M.A.S.<sup>©</sup> [45]

	Normálna prevádzka			Dlhý plameň			Krátky plameň		
	Tlak M.A.S. <sup>©</sup>	Swirl M.A.S. <sup>©</sup>	Tlak CA*	Tlak M.A.S. <sup>©</sup>	Swirl M.A.S. <sup>©</sup>	Tlak CA*	Tlak M.A.S. <sup>©</sup>	Swirl M.A.S. <sup>©</sup>	Tlak CA*
Jednotka	mbar	-	mbar	mbar	-	mbar	mbar	-	mbar
Zemný plyn	70	3-5	40-150	70	1-2	40-150	160-200	6-7	40-150
Lahké oleje	70-100	3-5	40-150	70	1-2	40-150	160-200	6-7	40-150
Ťažké oleje	100	3-5	40-150	70-100	2-3	40-150	180-220	6-7	40-150
Uhlie	100-160	4-8	40-150	100-150	2-4	40-150	160-220	5-8	40-150
TAP	100-140	4-8	40-150	100-120	3-4	40-150	180-220	6-8	40-150

\*CA = centrálny vzduch (z angl. central air)

Na zefektívnenie spoluspaľovania alternatívnych palív je kanál pre TAP vybavený systémom Pneumo-Injector V2 umiestnený po jeho obvode na výstupe z horáka. Ide

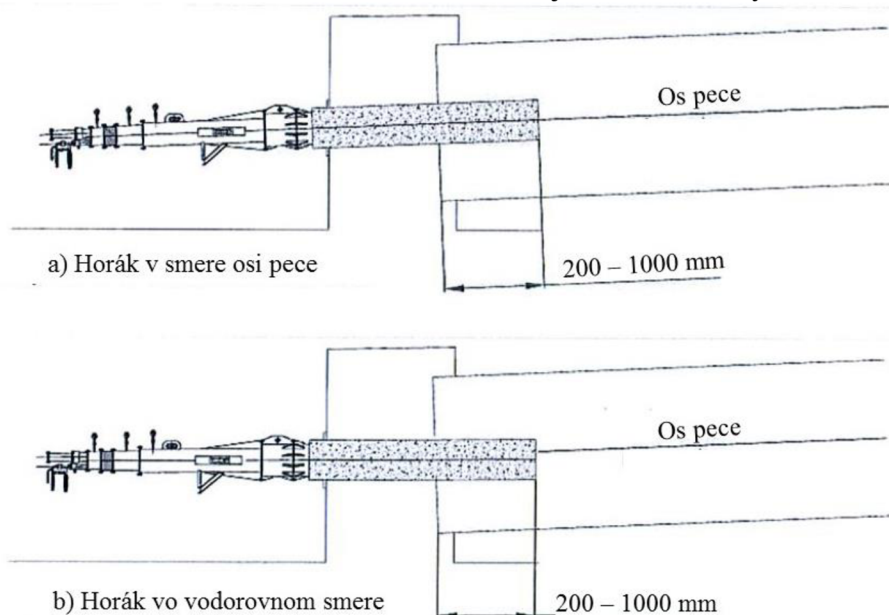
o pneumatické vírivé zariadenie, ktoré vháňa malé množstvo vzduchu do prúdu tuhého paliva, čím dochádza k lepšiemu rozptýleniu a vyhoreniu paliva.

### 5.1.3 Umiestnenie horáka v rotačnej peci

Umiestnenie horáka v peči sa riadi predovšetkým aktuálne spaľovanými palivami.

Ak sú používané ťažko horľavé palivá, ako napríklad tuhé alternatívne palivá, tak je horák uložený v smere osi pece. V prípade spaľovania ľahko horľavých palív ako je ropa, zemný plyn alebo klasické uhlie, je horák nastavený vodorovne. V pecnom systéme CEMMAC a.s. je horák uložený v smere osi pece.

Horák by mal byť zasunutý do pece v rozmedzí 200 – 1 000 mm od studeného konca pece ako je znázornené na obrázku 5.7. V CEMMAC a.s. je horák uložený v hĺbke 730 mm.



Obrázok 5.7 Umiestnenie horáka v rotačnej peci [45]

## 5.2 Projekt zmeny horáka

Spaľovací proces v CEMMAC a.s. je realizovaný s vysokým podielom využívania alternatívnych palív, avšak vzhľadom na technologicko-ekonomické podmienky chcel prevádzkovateľ tento podiel náhrady ešte zvýšiť. Na základe týchto požiadaviek boli prehodnocované možnosti úpravy existujúceho horáka alebo nákupu nového horáka.

Vzhľadom na potrebu navýšenia využívania tuhých alternatívnych palív bolo hlavnou požiadavkou zväčšenie priemeru kanála pre TAP zo 125 na 140 mm. Konštrukčné prevedenie existujúceho horáka M.A.S.<sup>©</sup> toto riešenie neumožňovalo, pretože zväčšenie kanála pre TAP by znamenalo zväčšenie celkového priemeru horáka, čo vzhľadom na priemer pece nebolo možné. Na základe týchto skutočností sa pristúpilo k rozhodnutiu osloviť viacerých výrobcov horákov na predloženie ponúk pre nový horák.

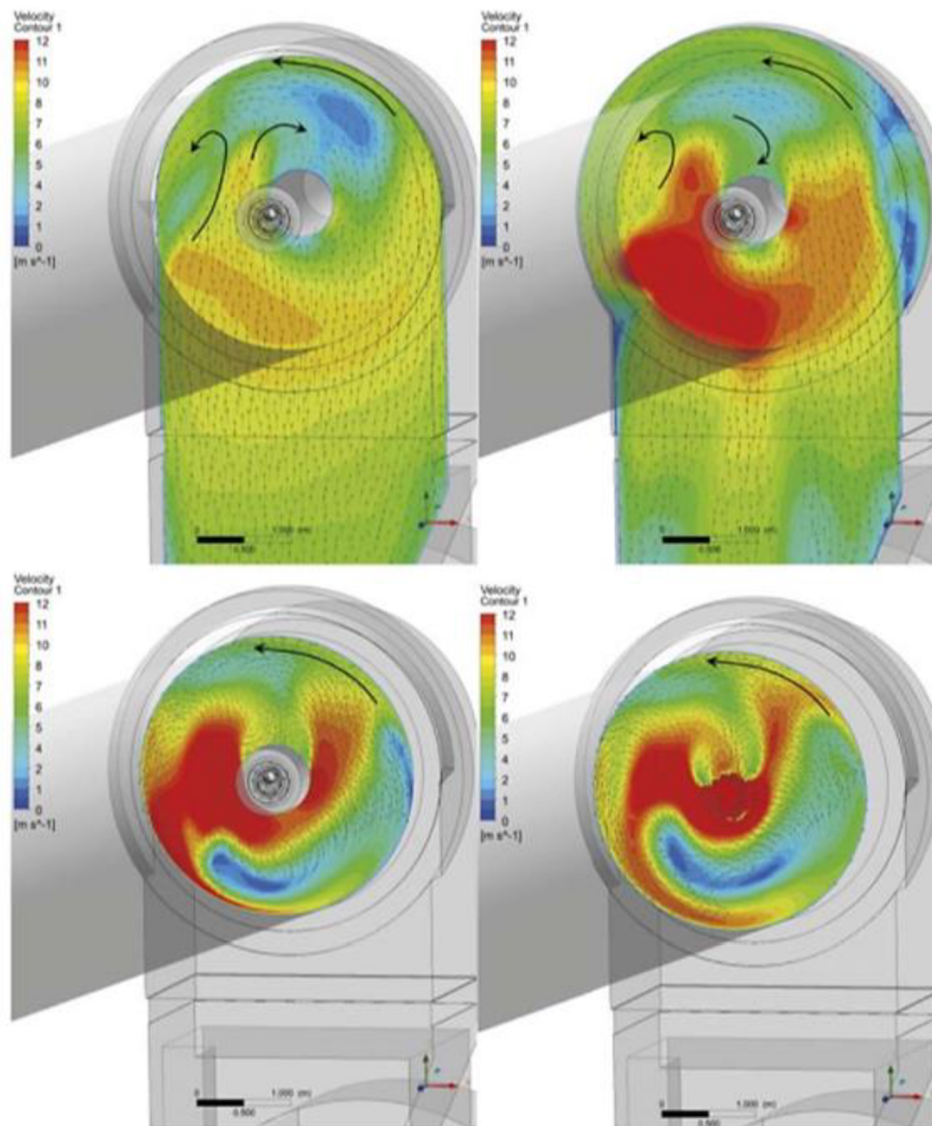
Po vyhodnotení predložených ponúk prebiehali ďalšie jednania len so spoločnosťou FCT Combustion, ktorá po technickej aj obchodnej stránke predložila najlepšiu ponuku. Ponuka od tejto spoločnosti zahŕňala i spracovanie CFD modelu pecného systému s horákom M.A.S.<sup>©</sup> a s horákom Turbu-Flex<sup>TM</sup>.

Pomocou CFD modelu bolo skúmané prúdenie primárneho a sekundárneho vzduchu v pecnom systéme spoločnosti CEMMAC a.s.. Všeobecne sa predpokladá, že smer prúdenia sekundárneho vzduchu bude zodpovedať smeru otáčania rotačnej pece. Výpočtovým CFD



modelom sa však zistilo, že smer otáčania sekundárneho vzduchu pri jeho vstupe do pece je opačný ako predpokladaný.

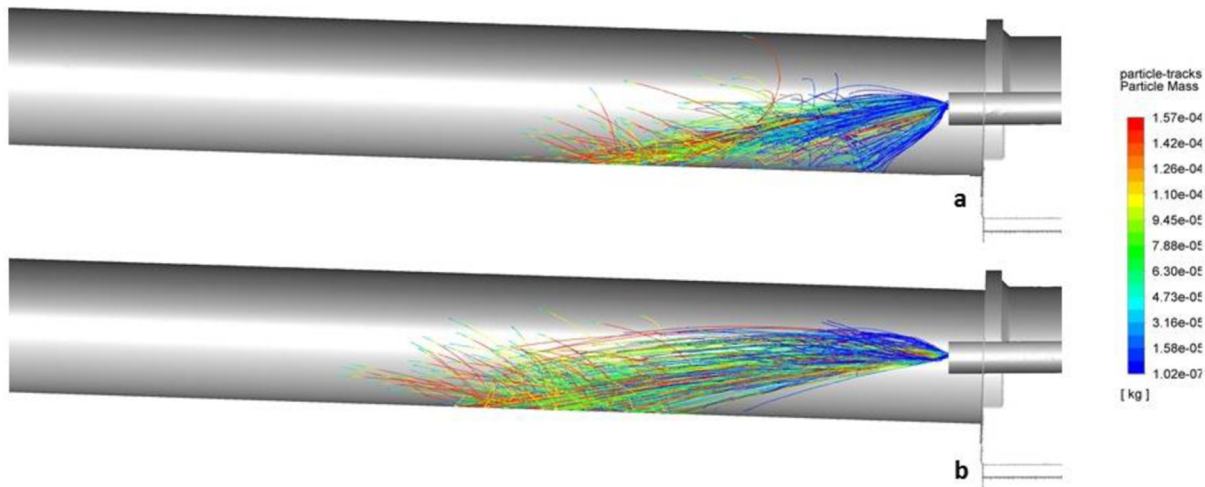
Na obrázku 5.8 sú znázornené vektory rýchlostí na 4 prierezoch – dva pri vstupe sekundárneho vzduchu do rotačnej pece z chladiča slinku a dva v rotačnej peci, pričom posledný rez je v blízkosti hrotu horáka. Na všetkých úsekoch je možné vidieť, že prúdenie sekundárneho vzduchu je prevažne proti smeru hodinových ručičiek, pričom rotačná pec sa z tohto pohľadu otáča v smere hodinových ručičiek. Je zriedkavé, že by sa sekundárny vzduch a pec otáčali rozličnými smermi. [47]



Obrázok 5.8 Prúdenie sekundárneho vzduchu v pecnom systéme CEMMAC a.s. vo vybraných prierezoch [47]

Bežné nastavenie vírivého vzduchu na horáku je zosúladené so smerom otáčania rotačnej pece – a tým aj s predpokladanou rotáciou sekundárneho vzduchu. Keďže výpočtovými modelmi bolo zistené opačné prúdenie sekundárneho vzduchu v pecnom systéme CEMMAC a.s., toto protichodné nastavenie horáka M.A.S.® spôsobovalo turbulencie, ktoré nepriaznivo vplývali na trajektóriu častíc tuhých alternatívnych palív. Z toho dôvodu častice TAP v blízkosti hrotu horáka narazili do výmurovky rotačnej pece a padali do slinkového lôžka ako je znázornené na obrázku 5.9a). [47]

Na základe tejto analýzy spoločnosť FCT Combustion navrhla použitie horáku Turbu-Flex™, ktorý má smer rotácie primárneho vzduchu zosúladený so smerom rotácie sekundárneho vzduchu, vďaka čomu je vylepšená trajektória častíc tuhých alternatívnych palív (obr 5.9b).



Obrázok 5.9 Trajektória častíc TAP v peci. A) horák M.A.S.® s protismerným tokom sekundárneho a vírivého vzduchu; B) horák Turbu-Flex™ s rovnakým smerom toku sekundárneho a vírivého vzduchu

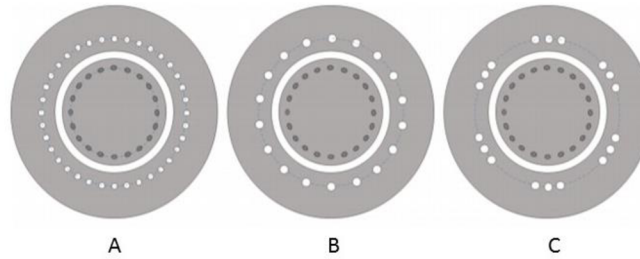
Výhoda konštrukcie horáka „na mieru“ spočíva v tom, že horák pracuje na výkone, ktorý je optimálny z hľadiska efektivity a stability spaľovacieho procesu a taktiež i z hľadiska tvorby tzv. „tepelných“ NO<sub>x</sub>. Cieľom projektu zmeny hlavného horáku v CEMMAC a.s. bolo dosiahnuť:

- Vyššiu kvalitu slinku
- Efektívnejšie využitie tepla
- Nižšie emisie NO<sub>x</sub>

### 5.3 FCT COMBUSTION - Turbu-Flex™

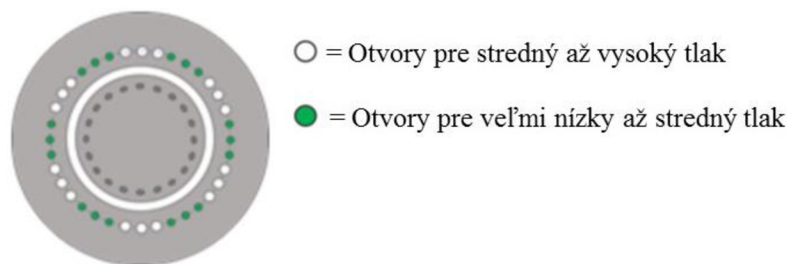
FCT Combustion je austrálsky výrobca horákov do rotačných pecí s individuálnym prístupom ku každej inštalácii. Súčasťou návrhu horáku je matematicko-fyzikálny CFD model, vďaka čomu sú horáky dizajnované pre konkrétnu pec. Horák je konfigurovaný podľa konkrétnych parametrov pecného systému.

Rôzne štúdie preukázali, že jedným z dôležitých parametrov v konštrukcii horáku je počet a usporiadanie axiálnych otvorov primárneho vzduchu. Pri veľkom počte otvorov (napr. 36 – obrázok 5.10a) vytvára axiálny primárny vzduch prstencový tok, ktorý oneskoruje vnášanie sekundárneho vzduchu do palivového prúdu. Vďaka tomu je znížená teplota plameňa a dochádza k nižšej tvorbe NO<sub>x</sub>. Ak tento počet otvorov zredukujeme na 18 (obrázok 5.10b), pri zachovaní rovnakého prietoku vzduchu, dosiahneme vyššiu mieru strhnutia sekundárneho vzduchu. Tým sa teplota plameňa zvýši a zvýši sa aj tvorba NO<sub>x</sub>. Zoskupenie axiálnych otvorov s veľkými medzerami (obrázok 5.10c), má za následok ešte väčšie strhvanie sekundárneho vzduchu a s tým spojené zvyšovanie teploty plameňa a produkcie NO<sub>x</sub>. [48]



Obrázok 5.10 – Usporiadanie axiálnych otvorov primárneho vzduchu. A) 36 axiálnych otvorov rovnomerne rozložených; B) 18 axiálnych otvorov rovnomerne rozložených; C) 18 axiálnych otvorov nerovnomerne rozložených [48]

Pri spoločnom spaľovaní uhlia a tuhých alternatívnych palív je výhodné použiť horák so združenými axiálnymi otvormi. Vysoké unášanie sekundárneho vzduchu zlepšuje spaľovanie tuhých alternatívnych palív a zintenzívňuje prenos tepla do slinku, zatiaľ čo ich vysoký obsah vlhkosti a nízka výhrevnosť potláča produkciu oxidov dusíka. Pri spaľovaní výhradne len uhlia je výhodný veľký počet axiálnych otvorov, ktorý znižuje tvorbu NO<sub>x</sub>. Spoločnosť FCT Combustion prišla na trh s kompromisom v podobe horáka Turbu-Flex™. Ide o flexibilný turbulentný horák, ktorý má axiálne otvory rozdelené do dvoch skupín a každá má samostatný prívod vzduchu. Vďaka tomu je možné meniť prevádzku horáka s mnohými otvormi s rovnakým tlakom (normálny režim = standard mode) na prevádzku horáka s malým počtom združených otvorov s vysokým tlakom vzduchu (posilňovací režim = boost mode). [48]



Obrázok 5.11 – Zoskupenie axiálnych otvorov podľa prívodu vzduchu [48]

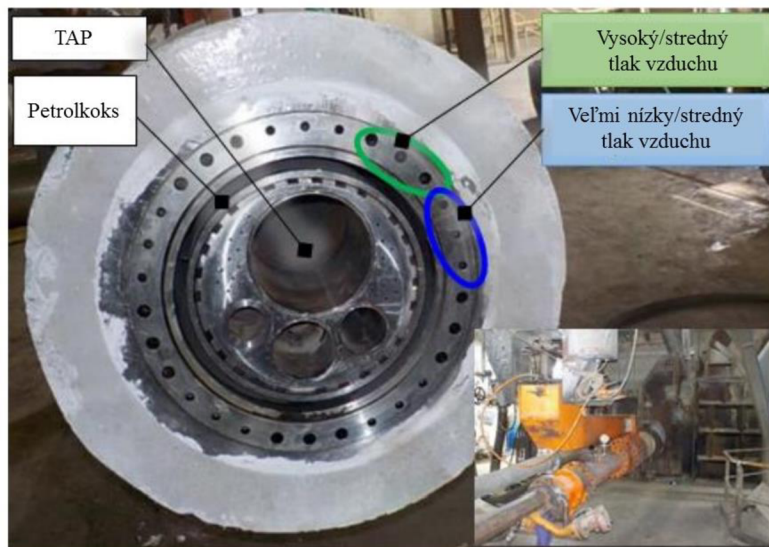
Na používanie tuhých alternatívnych palív vyvinuli systém Lofting Air, ktorý vylepšuje trajektóriu častíc v peci a zabraňuje padaniu nespálených častíc na slinok. Množstvo a tlak vzduchu ako aj uhol sú navrhnuté v závislosti na konkrétnych vlastnostiach alternatívnych palív.

Použitie horáka Turbu-Flex™ umožňuje súčasne kombinovať uhlie alebo koks so všetkými palivami, predovšetkým alternatívnymi. Poskytuje vysokú flexibilitu prepínania medzi jednotlivými druhmi paliva bez ovplyvnenia prevádzky pece. [49]

Horák Turbu-Flex™ poskytuje tepelnú kapacitu od 1 – 150 MW s približne 7% podielom primárneho vzduchu. [50]

Na obrázku 5.12 je zobrazený prvý horák Turbu-Flex™, ktorý je v prevádzke od augusta 2017. Otvory pre axiálny vzduch sú rozdelené do 2x5 skupín, pričom jednu skupinu tvoria väčšie otvory a druhú skupinu menšie otvory. Väčšími otvormi prúdi vždy plný prúd axiálneho primárneho vzduchu. Prívod vzduchu do menších otvorov môže byť znížený. Tento horák počas prevádzky dokáže spaľovať až 80% TAP pri kombinácii s petrokoksom a kvapalnými alternatívnymi palivami. [48]



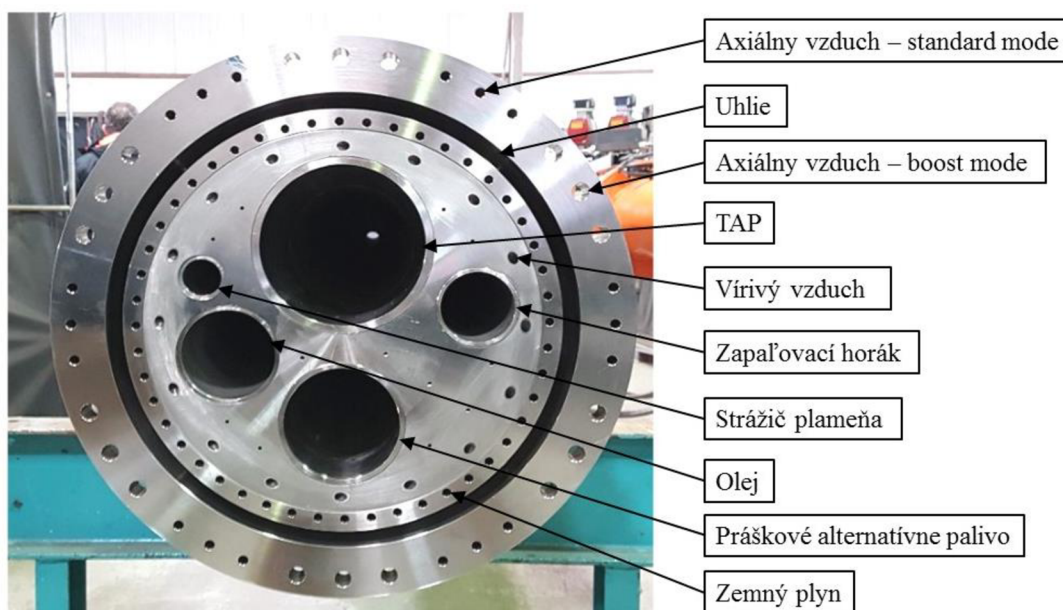


Obrázok 5.12 – Prvý horák Turbu-Flex™ [48]

### 5.3.1 Horák Turbu-Flex™ v CEMMAC a.s.

Horák Turbu-Flex™ je viacanálový horák dimenzovaný priamo na pecnú linku spoločnosti CEMMAC a.s., ktorá na zabezpečenie tepelnej energie využíva uhlie, zemný plyn, tuhé alternatívne palivá, práškové alternatívne palivo a kvapalné alternatívne palivo (olej).

Zomleté uhlie je dávkované cez medzikružie, ktoré je z oboch strán obklopené kanálmi primárneho vzduchu. Z vonkajšej strany prúdi axiálny vzduch s vysokou rýchlosťou a z vnútornej strany je vstrekován vírivý vzduch s tangenciálnymi a radiálnymi zložkami rýchlosti. Medzi uhoľným kanálom a vírivým vzduchom je umiestnený kanál pre zemný plyn, ktorý sa využíva pri náhreve rotačnej pece. V centre horáka je situovaný kanál pre TAP vybavený systémom Lofting air, kanál pre práškové alternatívne palivo taktiež vybavený systémom Lofting air, kanál pre kvapalné alternatívne palivo, senzor plameňa a kanál pre zapalovací horák.



Obrázok 5.13 – Horák Turbu-Flex™

Pre zníženie nákladov na údržbu a predĺženie životnosti horáka sú materiály horáka navrhnuté podľa prevádzkových podmienok a jednotlivých palív. Hrot horáka je z austenitickej

žiaruvzdornej nehrdzavejúcej ocele, čím je zabezpečená odolnosť voči vysokej teplote vo vnútri pece. Dýza na kvapalné palivo je vyrobená z feromagnetickkej nehrdzavejúcej ocele odolnej voči vysokým teplotám a opotrebeniu. Kanál pre práškové palivo je kvôli ochrane pred abráziou zvnútra obložený keramickými vložkami z oxidu hlinitého. Rovnako je riešený aj kanál pre tuhé alternatívne palivá. [51]

Horák neobsahuje žiadne pohyblivé časti, čím je zaručená bezproblémová prevádzka bez hrozby zaseknutia pohyblivých častí v horúcom a prašnom prostredí.

Hmotnosť horáka vrátane výmurovky je približne 4800 kg (bez výmurovky 3600 kg). Celková dĺžka horáka dosahuje približne 8,5 m, priemer horáka je 617 mm (pri 80mm výmurovke). Dodávaný tepelný výkon je 32 MW.



Obrázok 5.14 – Horák Turbu-Flex™ s hlavnými rozmermi

Primárny vzduch je do horáka Turbu-Flex™ vháňaný dúchadlom GM 90S od spoločnosti Aerzen (tlak 700 mbar, objemový prietok plynu 4 000 Nm<sup>3</sup>/h). Vo vnútri horáka je rozdelený do viacerých prúdov: axiálny, vírivý, loftingový vzduch pre TAP, loftingový vzduch pre práškové alternatívne palivo. Axiálny vzduch môže byť dávkovaný v normálnom režime a v posilňovacom režime. Loftingový vzduch pre tuhé a práškové alternatívne palivá je možné dodávať v disperznom alebo zdvíhacom režime. Množstvo primárneho vzduchu horáka Turbu-Flex™ prevádzkovaného v pecnom systéme spoločnosti CEMMAC a.s. je na úrovni 9 % (uvedené ako podiel zo stechiometrického množstva vzduchu).

### 5.3.2 Regulácia plameňa

Kľúčovým konštrukčným znakom horáka Turbu-Flex™ je rozdelenie axiálnych otvorov do dvoch skupín so samostatným prívodom vzduchu. Pootočením jedného ventilu je možné horák prevádzkovať v štandardnom režime (standard mode) alebo posilňovacom režime tzv. boost mode. Pri spaľovaní fosílnych palív (uhlia) pracuje horák v štandardnom režime a hlavnou úlohou axiálneho vzduchu je regulácia emisií NO<sub>x</sub>. Pri zvýšenej substitúcií fosílnych palív alternatívnymi palivami sa aktivuje posilňovací režim axiálneho vzduchu. Vzhľadom na vysoký podiel spaľovania tuhých alternatívnych palív v spoločnosti CEMMAC a.s. je horák prevádzkovaný zväčša v posilňovacom režime (približne 70 % času).

Úpravou pomeru medzi axiálnym a vírivým vzduchom a úpravou celkového množstva primárneho vzduchu dochádza k regulácii tvaru plameňa. Zvýšením celkového množstva primárneho vzduchu vzniká dlhší plameň a dochádza k lepšiemu chladeniu horáka. Pri nižšom množstve primárneho vzduchu je plameň kratší a chladenie horáka je horšie. Vyšší pomer vírivého vzduchu vytvára širší plameň a zvyšuje stabilitu plameňa. Nižšie množstvo vírivého vzduchu zužuje plameň.

Kanály pre tuhé a práškové alternatívne palivá majú na výstupe z hrotu horáka umiestnený loftingový vzduch, ktorý účinne podporuje rozptyl alternatívneho paliva. Tento vzduch pracuje v dvoch režimoch: v režime zdvíhania alebo v disperznom režime. V prípade prevádzky v zdvíhacom režime je vzduch vstrekaný iba zospodu do prúdu paliva, a tým zaisťuje zdvihnutie častíc, čo predlžuje dobu zdržania paliva v plameni. Pri prevádzke v disperznom režime je vzduch vstrekaný po celom obvode kanála, čo zabezpečuje rozptýlenie paliva do všetkých smerov. Technológia Lofting Air pomáha operátorom reagovať na zmeny vo vlastnostiach alternatívnych palív a zaisťuje stabilnú prevádzku.



### 5.3.3 Umiestnenie horáka v rotačnej peci

Horák Turbu-Flex™ je umiestnený mierne odlišne od predchádzajúceho horáka. Sklon horáka ostal nezmenený, čo znamená, že je uložený rovnobežne s pecou, ale zasunutý je až do hĺbky 1 000 mm, čiže o 270 mm hlbšie ako horák M.A.S.®.

### 5.4 Technické porovnanie oboch horákov v CEMMAC a.s.

Najväčší rozdiel v technickom prevedení horákov M.A.S.® a Turbu-Flex™ je v spôsobe vstrekovania primárneho vzduchu a jeho dávkovanie do spaľovacieho priestoru.

Tabuľka 5.3 Konštrukčné porovnanie horákov M.A.S.® a Turbu-Flex™

	Prstencový uhoľný kanál	Rozdelenie primárneho vzduchu	Primárny vzduch zvnútra uhoľného kanála	Primárny vzduch zvonka uhoľného kanála	Primárny vzduch cez dýzy	Výkon horáka [MW]
M.A.S.®	×			×	×	30
Turbu-Flex™	×	×	×	×	×	32

Primárny vzduch je do horáka M.A.S.® vháňaný ventilátorom, ktorý pracuje s väčším množstvom vzduchu (80 000 Nm<sup>3</sup>/h), avšak poskytuje nižšiu tlak (25 000 Pa). Všetok primárny vzduch je do spaľovacieho prostredia privádzaný cez nastaviteľné dýzy. Vďaka flexibilitate týchto dýz je možná jednoduchá regulácia plameňa.

Horák Turbu-Flex™ využíva ako zdroj vzduchu dúchadlo, ktoré poskytuje menšie množstvo vzduchu (4 000 Nm<sup>3</sup>/h) pri vyššom tlaku (70 000 Pa). Primárny vzduch horáka Turbu-Flex™ je rozdelený do viacerých kanálov a je vstrekaný z oboch strán prstencového uhoľného kanála. Do spaľovacieho prostredia vstupuje cez dýzy, pričom dýzy axiálneho vzduchu sú rozdelené do dvoch skupín, vďaka čomu je možné ich prevádzkovať v dvoch režimoch: normálny a posilňovací. Tento spôsob regulácie umožňuje prispôbenie sa vlastnostiam aktuálne spaľovaného paliva. Kanály pre alternatívne palivá sú u oboch horákov vybavené špeciálnym systémom vírivého vzduchu, ktorý pomáha pri ich spaľovaní.

Tabuľka 5.4 Technické porovnanie horákov M.A.S.® a Turbu-Flex™

	Jednotka	M.A.S.® (2019)	Turbu-Flex™ (2020)
Hmotnosť horáka bez výmurovky	kg	4 650	3 500
Hmotnosť výmurovky	kg	1 650	1 500
Celková hmotnosť horáka	kg	6 300	5 000
Dĺžka horáka	mm	10 210	8 467
Priemer horáka bez výmurovky	mm	559	457
Hrúbka výmurovky	mm	70,5	80
Celkový priemer horáka	mm	700	617
Zdroj primárneho vzduchu	-	ventilátor	dúchadlo
Tlak primárneho vzduchu	Pa	25 000	70 000
Množstvo primárneho vzduchu	Nm <sup>3</sup> /h	80 000	4 000
Množstvo primárneho vzduchu	% zo stech. mn.	14,5 %	9 %
Výkon horáka	MW	30	32
Moment horáka	N/MW	8,9	9,2

## 6 Analýza vplyvu zmeny hlavného horáka na pecný systém

Hodnotenie vplyvu zmeny horáka na spaľovací proces spoločnosti CEMMAC a.s. vychádza z porovnania prevádzkových záznamov (tzv. DHV = Denné hlásenie výroby, Príloha č. 1) nového horáka Turbu-Flex™ od spoločnosti FCT Combustion s prevádzkovými údajmi predchádzajúceho horáka M.A.S.© od Unitherm Cemcon. Nový horák bol do pecného systému nainštalovaný počas generálnych opráv vo februári 2020. Z tohto dôvodu boli horáky sledované v období február – december, aby nedošlo k skresleniu prevádzkových údajov s použitím dvoch typov horákov počas jedného roka. Za začiatok sledovaného obdobia v roku 2019 bol určený prvý deň po generálnych opravách, kedy pec dosiahla plný výkon počas celých 24 hodín. Na základe týchto skutočností bol horák M.A.S.© sledovaný od 16.2.2019 do 31.12.2019 čo predstavuje 318 dní. Sledované obdobie pre horák Turbu-Flex™ bolo 17.2.2020 – 31.12.2020 čo je takisto 318 dní, aby boli porovnávané rovnaké časové obdobia.

Z rozboru prevádzkových údajov bol zistený počet prevádzkových hodín a počet hodín odstávok pecného systému.

Tabuľka 6.1 Prevádzkové hodiny

	Jednotka	M.A.S.© (2019)	Turbu-Flex™ (2020)
Sledovaný čas	h	7632	7632
Prevádzkové hodiny	h	7 234	7 330,5
Počet hodín odstávok	h	398	301,5

Okrem generálnych opráv sú počas roka potrebné i krátkodobé odstávky pecného systému. Každý rok je v priebehu júla alebo augusta nutné realizovať menšie opravy výmurovky, ktoré znamenajú odstávku pecného systému na cca 5 pracovných dní. Výmena horáka je rovnako plánovaná, predpokladá sa zhruba každé tri mesiace, avšak konkrétny termín je určený na základe technického stavu horáka v peci. Počas prevádzky dochádza aj k odstávkam z dôvodu porúch. Tieto poruchy sa delia na: mechanické, elektrotechnické, technologické súvisiace s horákom a technologické-iné. Technologické-iné poruchy sú spôsobené predovšetkým výkyvom v chemickom zložení surovínovej múky.

Na základe záznamov o výrobe boli zosumarizované jednotlivé príčiny odstávok pecného systému a ich príslušný počet hodín.

Tabuľka 6.2 Analýza odstávok

	Jednotka	M.A.S.© (2019)	Turbu-Flex™ (2020)	Rozdiel
Oprava výmurovky	h	120	108	
Mechanické poruchy	h	13	15	
Elektrotechnické poruchy	h	10,5	8,5	
Technologické poruchy spôsobené horákom	h	122,5	50	72,5
Technologické poruchy - iné	h	60	72	
Výmena horáka	h	72	48	24
Celkový počet hodín odstávok	h	398	301,5	96,5

So zmenou hlavného horáka súvisia odstávky spôsobené výmenou horáka a technologické poruchy súvisiace s horákom. Z uvedenej tabuľky vyplýva, že horák Turbu-

Flex™ zvýšil časové využitie pecného systému o 96,5 hodín. Pozitívny vplyv nového horáka na vyšší počet prevádzkových hodín sa prejavil v dvoch oblastiach:

- Menší počet výmen horáka počas roka  
Hlavný horák rotačnej pece je potrebné ročne niekoľkokrát meniť z dôvodu poškodenia špičky horáka vplyvom vysokej teploty a abrazívneho opotrebenia výmurovky horáka. Táto výmena sa realizuje počas krátkodobej plánovanej odstávky pece. Jedna výmena horáka vyžaduje približne 24-hodinovú odstávku pece. Počas tejto odstávky sa opotrebený horák vytiahne a na jeho miesto sa zasunie druhý opravený horák. Použitý horák je presunutý do dielne, kde sa vymenia všetky poškodené časti a nainštaluje sa nový betónový obal, a takto opravený horák je pripravený na opätovné použitie.  
Z analýzy odstávok pecného systému vyplýva, že v roku 2019 bolo potrebné horák M.A.S.© vymeniť 3-krát, zatiaľ čo v roku 2020 za rovnaké obdobie boli potrebné len 2 výmeny horáka.
- Menší počet krátkodobých odstávok kvôli potrebe odstraňovania nálepkov  
V prípade výkyvov v spaľovacom procese sa v systéme tvoria nežiadúce nálepky v cyklónovom výmenníku, ktoré znižujú celkový podtlak v pecnom systéme, čo nepriaznivo vplyva na plynulosť prevádzky, a preto je potrebné ich odstraňovať (vyčistiť). Na vykonanie týchto prác je nutné linku krátkodobo odstaviť.  
V sledovanom období v roku 2020 bolo týchto odstávok o 72,5 hodín menej oproti roku 2019.

## 6.1 Procesné porovnanie

Pre účel vyhodnotenia vplyvu zmeny hlavného horáka na pecný systém z procesného hľadiska boli jednotlivé horáky porovnávané v nasledujúcich kritériách:

- Produkcia slinku
- Celková spotreba tepelnej energie a efektívnosť pecného systému
- Kvalita slinku

### 6.1.1 Produkcia slinku

Z prevádzkových záznamov boli získané údaje o množstve vyprodukovaného slinku počas sledovaného obdobia. Hodinový výkon  $p$  je počítaný ako podiel množstva vyprodukovaného slinku a prevádzkových hodín (vzťah 6.1).

$$p = \frac{P}{t} \quad (6.1)$$

Napr. pre horák M.A.S.©:  $p = \frac{363\,661}{7\,234} = 50,27 \text{ t/h}$ , ďalej spočítané v MS Excel.

Tabuľka 6.3 Hodinový výkon rotačnej pece

	Označenie	Jednotka	M.A.S.© (2019)	Turbu-Flex™ (2020)	Rozdiel
Produkcia slinku	$P$	t	363 661	371 219	7 558
Prevádzkové hodiny	$t$	h	7 234	7 330,5	
Hodinový výkon	$p$	t/h	50,27	50,64	0,37

Optimalizácia horáka Turbu-Flex™ na existujúci pecný systém umožňuje kvalitnejšie spaľovanie a prevádzku s vyšším prebytkom kyslíka. To umožňuje zvýšenie dávkovania suroviny, čo znamená zvýšenie hodinového výkonu pece.

Porovnaním prevádzkových údajov bolo zistené, že celkový vplyv použitia nového horáka zvýšil hodinový výkon pece o 0,37 t/h slinku. To predstavuje vyššiu produkciu slinku o 7 558 t za sledované obdobie.

### 6.1.2 Celková spotreba tepelnej energie

Pre komplexné vyhodnotenie vplyvu zmeny horáka na spotrebu tepelnej energie bolo potrebné zanalyzovať celkové množstvo spotrebovaného tepla všetkými vstupmi, ktoré sú zmienené v kapitole 5. Nejedná sa teda len o množstvo paliva privedené prostredníctvom hlavného horáka, pretože zmena horáka má vplyv na celý pecný systém, ktorý musí byť udržiavaný v rovnováhe.

Z prevádzkových záznamov boli vybrané údaje o množstve spálených palív počas celého sledovaného obdobia. Jedná sa o čierne uhlie, dva druhy tuhých alternatívnych palív (TAP), práškové alternatívne palivá (PAP), pneumatiky, zemný plyn a ľahký vykurovací olej (LVO). Kvalitu týchto palív garantuje dodávateľ, ktorý k jednotlivých dodávkam prikladá protokol s podrobným rozborom jednotlivých vlastností. Pre analýzu spotreby tepla je najdôležitejším parametrom výhrevnosť jednotlivých palív. Každá dodávka tuhých a práškových alternatívnych palív musí spĺňať požadované parametre aj čo sa týka minimálnej výhrevnosti. Skutočná výhrevnosť pre jednotlivé dodávky je kontrolovaná podnikovým laboratóriom. Do výpočtov boli zahrnuté priemerné hodnoty výhrevnosti TAP a PAP stanovené laboratóriom.

Celková spotreba tepelnej energie  $Q$  [GJ] je vypočítaná podľa vzťahu 6.2:

$$Q = \sum_{i=1}^n m_i \times Q_i^r \quad (6.2)$$

Napr. spotrebovaná tepelná energia z čierneho uhlia pre horák M.A.S.®:

$$Q = 16\,950 \times 28 = 474\,600 \text{ GJ, ďalej spočítané v MS Excel.}$$

Tabuľka 6.4 Celková spotreba tepelnej energie

	M.A.S.® (2019)			Turbu-Flex™ (2020)		
	Výhrevnosť $Q_r^i$ [GJ/t]	Spotreba $m_i$ [t]	Spotrebované teplo $Q$ [GJ]	Výhrevnosť $Q_r^i$ [GJ/t]	Spotreba $m_i$ [t]	Spotrebované teplo $Q$ [GJ]
Čierne uhlie	28	16 950	474 600	28	19 593	548 604
TAP Q1	23,86	23 691	565 267	24,16	23 062	557 178
TAP Q2	18,8	5 509	103 569	16,9	5 996	101 332
PAP	25,44	7 110	180 878	25,21	5 721	144 226
Pneumatiky	26	2 212	57 512	26	2 181	56 706
Zemný plyn*	0,0343	95 975	3 292	0,0343	85 413	2 930
Ľahký vykurovací olej	42	131	5 502	42	105	4 410
Celková spotreba tepelnej energie [GJ]			1 390 621			1 415 386
Rozdiel [GJ]						24 765

\*výhrevnosť uvedená v GJ/m<sup>3</sup> a spotreba uvedená v m<sup>3</sup>

Pri prevádzke nového horáka Turbu-Flex™ bolo zaznamenané zvýšené dávkovanie uhlia a TAP Q2 (nižšej výhrevnosti) do pecného systému. Naopak dávkované množstvo práškoveho paliva a zemného plynu bolo nižšie. Po vyčíslení celkovej spotreby tepelnej energie bolo zistené, že horák Turbu-Flex™ počas sledovaného obdobia spotreboval o 24 765 GJ tepla viac ako horák M.A.S.®. Keďže počas tohto obdobia bola aj vyššia produkcia slinku, bolo potrebné vypočítať takzvanú špecifickú spotrebu tepelnej energie v pecnom systéme.

Špecifická spotreba tepelnej energie *STC* (z angl. Specific thermal consumption) je vyjadrená ako množstvo tepelnej energie potrebnej na produkciu 1 t slinku, ktorú je možné vyčísliť podľa vzťahu 6.3:

$$STC = \frac{Q}{P} \quad (6.3)$$

Napríklad pre horák M.A.S.®:  $STC = \frac{1\,390\,621}{363\,661} = 3,824$  GJ/t, ďalej spočítané v MS Excel.

Tabuľka 6.5 Špecifická tepelná spotreba *STC*

	Označenie	Jednotka	M.A.S.® (2019)	Turbu-Flex™ (2020)
Celková tepelná spotreba	<i>Q</i>	GJ	1 390 621	1 415 386
Produkcia slinku	<i>P</i>	t	363 661	371 219
Špecifická tepelná spotreba	<i>STC</i>	GJ/t	3,824	3,813
Rozdiel v špecifickej tepelnej spotrebe		GJ/t	0,011	

Bol zistený rozdiel v špecifickej tepelnej spotrebe pecného systému v prospech nového horáka Turbu-Flex™. V porovnaní s prechádzajúcim horákom bola špecifická spotreba tepelnej energie horáka Turbu-Flex™ o 0,011 GJ/t nižšia, čo je v prepočte 11 kJ/kg. Tým sa prejavil priaznivý vplyv kvalitnejšieho spaľovacieho procesu a stabilnejšej prevádzky pece.

Pre vyčíslenie množstva ušetrenej tepelnej energie bolo potrebné uvažovať s rovnakým množstvom vyprodukovaného slinku. Ako základ bola uvažovaná produkcia slinku pecného systému s horákom Turbu-Flex™ z roku 2020, ktorá bola 371 219. Z tohto dôvodu je vyčíslený porovnateľný údaj celkovej spotreby tepla horáka M.A.S.® podľa vzťahu 6.4.

$$Q_{por} = STC \times 371\,219 \quad (6.4)$$

$$Q_{por} = 3,824 \times 371\,219 = 1\,419\,523 \text{ GJ}$$

Tabuľka 6.6 Ušetrené množstvo tepelnej energie

	Označenie	Jednotka	M.A.S.® (2019)	Turbu-Flex™ (2020)
Špecifická tepelná spotreba	<i>STC</i>	GJ/t	3,824	3,813
Uvažovaná produkcia slinku	-	t	371 219	371 219
Spotreba tepla na produkciu 371 219 t slinku	<i>Q<sub>por</sub></i>	GJ	1 419 523	1 415 386
Rozdiel v spotrebe tepla na produkciu 371 219 t slinku		GJ	4 137	

Pecný systém s horákom M.A.S.® by na rovnaké množstvo vyprodukovaného slinku spotreboval o 4 137 GJ tepelnej energie viac ako pecný systém s horákom Turbu-Flex™.

### 6.1.3 Efektívnosť pecného systému

Energetická náročnosť celého procesu výroby cementu sa zásadne líši v závislosti od spôsobu výroby slinku (suchý alebo mokrý proces) a od technologického riešenia pecného systému (počet stupňov výmenníka, konštrukcia kalcinačného pásma, druh spaľovaného paliva).

Pôvodná pecná linka z roku 2000 bola prevádzkovaná s plynovým horákom. Tepelná spotreba tohto pecného systému bola projektovaná na 3,1 GJ/t slinku. Postupným využívaním alternatívnych palív (AP) sa táto tepelná spotreba zvyšovala. Je to z toho dôvodu, že alternatívne palivá majú nižšiu výhrevnosť a vyššiu vlhkosť v porovnaní s fosílnymi palivami. Súčasná pecná linka s viacanálovým horákom spaľujúci vysoký podiel alternatívnych palív je projektovaná na tepelnú spotrebu 3,8 GJ/t slinku.

Účinnosť horáka žiadny dodávateľ hlavných horákov nedefinuje, preto bola vyhodnotená len efektívnosť pecného systému s jednotlivými horákmi. Za základ bola považovaná projektovaná spotreba pecného systému s plynovým horákom.

Tabuľka 6.7 Efektívnosť pecného systému

	Jednotka	Projektovaná STC		Skutočná STC	
		Plyn	Uhlie + AP	M.A.S. <sup>©</sup> (2019)	Turbu-Flex™ (2020)
Špecifická tepelná spotreba STC	GJ/t	3,1	3,8	3,824	3,813
Efektívnosť pecného systému vzhľadom k projektovanej tepelnej spotrebe s plynovým horákom	%	100	81,58	81,07	81,3

Na základe skutočnej zistenej špecifickej tepelnej spotreby pecného systému spoločnosti CEMMAC a.s. bola v roku 2019 celková efektívnosť systému s horákom M.A.S.<sup>©</sup> 81,07 % a v roku 2020 s horákom Turbu-Flex™ 81,3 % v porovnaní s projektovanou tepelnou spotrebou pri plynovom horáku. Bol teda zaznamenaný mierny nárast efektívnosti z dôvodu stabilnejšej prevádzky pece.

### 6.1.4 Kvalita slinku

Základné parametre, ktoré určujú kvalitu slinku, sú obsah alitu a obsah voľného vápna. Tieto parametre spolu s celkovým minerálnym zložením sú sledované a vyhodnocované laboratóriom z analýzy vzoriek slinku, ktoré sú odoberané v hodinových intervaloch. Výsledky (Príloha č. 2) laboratórium posielala operátorovi rotačnej pece a tie mu pomáhajú určiť a udržiavať optimálny prevádzkový režim pece.

Kvalitný slinok musí mať obsah alitu vyšší ako 60% a obsah voľného vápna musí byť do 3,5%. Tieto hodnoty sú stanovené na základe vnútropodnikových predpisov na výrobu slinku a cementu. Slinok, ktorý nespĺňa stanovené parametre sa nazýva off-spec slinok.

Z rozboru jednotlivých vzoriek slinku spracovaných laboratóriom bolo vypočítané množstvo vyprodukovaného off-spec slinku a priemerné hodnoty obsahu alitu a voľného vápna.



Tabuľka 6.8 Kvalita slinku

	Jednotka	M.A.S. <sup>©</sup> (2019)	Turbu-Flex™ (2020)	Rozdiel
Celkové množstvo off-spec slinku	t	46 548	24 117	22 431
Priemerný obsah alitu	%	64,52	66,43	
Priemerný obsah voľného vápna	%	2,9	2,6	

Z tabuľky je zrejmé, že pri novom horáku dochádza k výrazne nižšej produkcii off-spec slinku v porovnaní s predchádzajúcim horákom. V sledovanom období v roku 2020 bolo vyprodukovaných o 22 431 t off-spec slinku menej ako v roku 2019.

Použitie horáku Turbu-Flex™ v rotačnej peči sa priaznivo prejavilo i na zvýšenej kvalite slinku, pretože bol zistený zvýšený obsah alitu (66,43 %) a znížený obsah voľného vápna (2,6 %) v slinku v porovnaní so slinkom vypáleným s použitím horáku M.A.S.<sup>©</sup>.

Off-spec slinok je produkovaný pri nestabilnej prevádzke pecného systému predovšetkým pri jeho odstávke a nábehu. Zvýšením prevádzkovej spoľahlivosti nového horáku bola dosiahnutá stabilnejšia a dlhodobejšia prevádzka pece s menším počtom vynútených odstávok, vďaka čomu došlo k zvýšeniu kvality slinku a k nižšej produkcii off-spec slinku.

## 6.2 Ekologické zhodnotenie

Zmena horáka a s tým súvisiaca zistená zvýšená produkcia slinku vplyva na množstvo produkovaných emisných látok, predovšetkým oxidu uhličitého, oxidu uhoľnatého a oxidov dusíka.

Zmenu v špecifickej spotrebe tepelnej energie nového horáka, ktorá vyplýva z predchádzajúcej analýzy celkovej spotreby tepla, je možné taktiež hodnotiť z hľadiska vplyvu na životné prostredie. Zníženie spotreby tepelnej energie na tonu slinku o 0,011 GJ znamená pri produkcii slinku 371 219 t (z roku 2020) ušetrovaných 4 137 GJ tepelnej energie. Pri uvažovanej priemernej výhrevnosti čierneho uhlia 28 GJ/t to predstavuje ušetrovanie približne 148 t čierneho uhlia.

### 6.2.1 Emisie CO<sub>2</sub>

Emisie CO<sub>2</sub> sú produkované predovšetkým pri kalcinácii vstupnej suroviny a pri spaľovaní uhlia. Konkrétne hodnoty vyprodukovaných emisií CO<sub>2</sub> sa stanovujú výpočtom.

Vyprodukované množstvo CO<sub>2</sub> z pecného systému stanovuje certifikovaná firma. Spoločnosť CEMMAC a.s. každoročne doloží informácie o spotrebe jednotlivých palív, vlastností vstupnej suroviny a vyprodukovaného množstva slinku. Na základe analýzy vzoriek paliva a dodaných vyššie spomínaných informácií certifikovaná firma určí emisný faktor (EF) pre výpočet množstva CO<sub>2</sub> v závislosti na množstve vypáleného slinku. Je zrejmé, že emisný faktor sa každý rok mení a to z dôvodu nerovnomerných vlastností palív a vstupných surovín. Všeobecne sa dá konštatovať, že z celkového množstva CO<sub>2</sub> emisií je približne 40 % z procesu spaľovania a 60 % z procesu kalcinácie.

Pre adekvátne porovnanie produkcie CO<sub>2</sub> z pecného systému bol uvažovaný emisný faktor z roku 2019, ktorý mal hodnotu 0,76535 tCO<sub>2</sub>/t<sub>slinku</sub>. Na vyčíslenie celkového množstva vyprodukovaných emisií oxidu uhličitého je produkcia slinku vynásobená stanoveným emisným faktorom (vzťah 6.5).

$$m_{CO_2} = E \times P \quad (6.5)$$

Napr. pre horák M.A.S.<sup>©</sup>:  $m_{CO_2} = 0,76535 \times 363\,661 = 278\,328$  t, ďalej spočítané v MS Excel.

Tabuľka 6.9 Emisie CO<sub>2</sub>

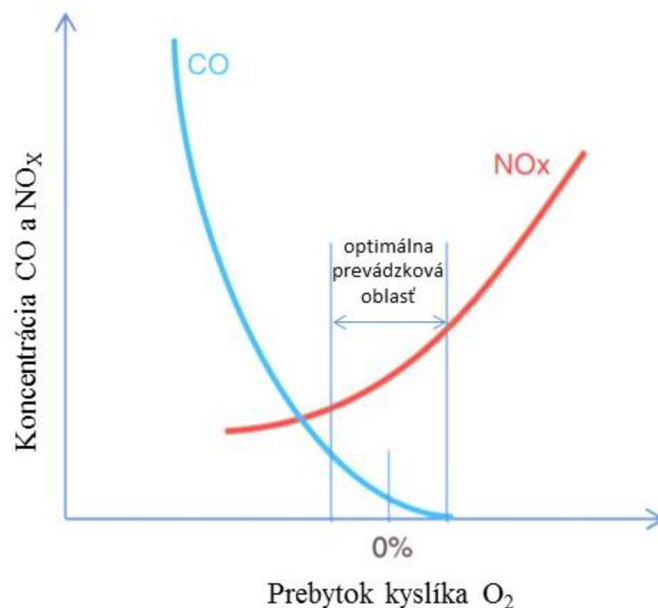
	Označenie	Jednotka	M.A.S. <sup>©</sup> (2019)	Turbu-Flex™ (2020)
Emisný faktor	<i>E</i>	t <sub>CO2</sub> /t <sub>slinku</sub>	0,76535	
Produkcia slinku [56]	<i>P</i>	t	363 661	371 219
Množstvo CO <sub>2</sub>	<i>m</i> <sub>CO2</sub>	t	278 328	284 113
Rozdiel v množstve CO <sub>2</sub>	-	t	5 785	

Z tabuľky vyplýva, že pri uvažovaní rovnakého emisného faktoru použitím horáku Turbu-Flex™ došlo k zvýšenej tvorbe emisií CO<sub>2</sub> o 5 785 ton, čo však úplne zodpovedá zvýšenej produkcii slinku.

### 6.2.2 Emisie CO a NO<sub>x</sub>

Produkcia emisných látok CO a NO<sub>x</sub> je spôsobená predovšetkým spaľovaním alternatívnych palív. Pre proces výpalu slinku je ideálny krátky a intenzívny plameň, ktorý produkuje nízke množstvo emisných látok. Reguláciou množstva privedeného primárneho vzduchu je možné ovplyvniť ich produkciu.

Horúci plameň s vysokým prebytkom vzduchu produkuje veľké množstvo NO<sub>x</sub>. Ak spaľovací proces vykazuje vysoké hodnoty oxidov dusíka, je potrebné postupne znižovať množstvo primárneho vzduchu. Avšak emisie CO vznikajú za opačných podmienok. Zníženým množstvom primárneho vzduchu dochádza k nedokonalému spaľovaniu, pričom je produkovaných viac emisií oxidu uhoľnatého. Preto pri vysokých hodnotách CO je potrebné postupne zvyšovať množstvo privádzaného vzduchu.



Obrázok 6.1 – Vplyv prebytku kyslíka O<sub>2</sub> na tvorbu CO a NO<sub>x</sub>. [52]

Z mesačných protokolov emisných látok (Príloha č. 3 a 4) bolo zosumarizované množstvo emitovaných emisií CO a NO<sub>x</sub> počas sledovaného obdobia. Tieto údaje sú z legislatívnych dôvodov pravidelne zverejňované aj na internetovej stránke spoločnosti CEMMAC a.s.. Z týchto údajov je stanovená priemerná produkcia *m* jednotlivých emisných látok vzhľadom na vyprodukované množstvo slinku podľa vzťahu 6.6 a 6.7:

$$\dot{m}_{NO_x} = \frac{m_{NO_x}}{P} \quad (6.6)$$

$$\dot{m}_{CO} = \frac{m_{CO}}{P} \quad (6.7)$$

Napr. priemerná produkcia NO<sub>x</sub> pre horák M.A.S.<sup>©</sup>:

$$\dot{m}_{NO_x} = \frac{528,13}{363\,661} = 0,001452 \text{ t}_{NO_x}/\text{t}_{\text{slinku}}, \text{ ďalej spočítané v MS Excel.}$$

Tabuľka 6.10 Emisie NO<sub>x</sub> a CO

	Označenie	Jednotka	M.A.S. <sup>©</sup> (2019)	Turbu-Flex <sup>TM</sup> (2020)	Rozdiel
Produkcia slinku [56]	<i>P</i>	t	363 661	371 219	
Množstvo NO <sub>x</sub> [58]	<i>m</i> <sub>NO<sub>x</sub></sub>	t	528,13	541,66	+13,53
Priemerná produkcia NO <sub>x</sub>	$\dot{m}_{NO_x}$	t <sub>NO<sub>x</sub></sub> /t <sub>slinku</sub>	0,001452	0,001459	+0,000007
Množstvo CO [58]	<i>m</i> <sub>CO</sub>	t	3 992,99	3 306,34	-686,65
Priemerná produkcia CO	$\dot{m}_{CO}$	t <sub>CO</sub> /t <sub>slinku</sub>	0,01098	0,00891	-0,00207

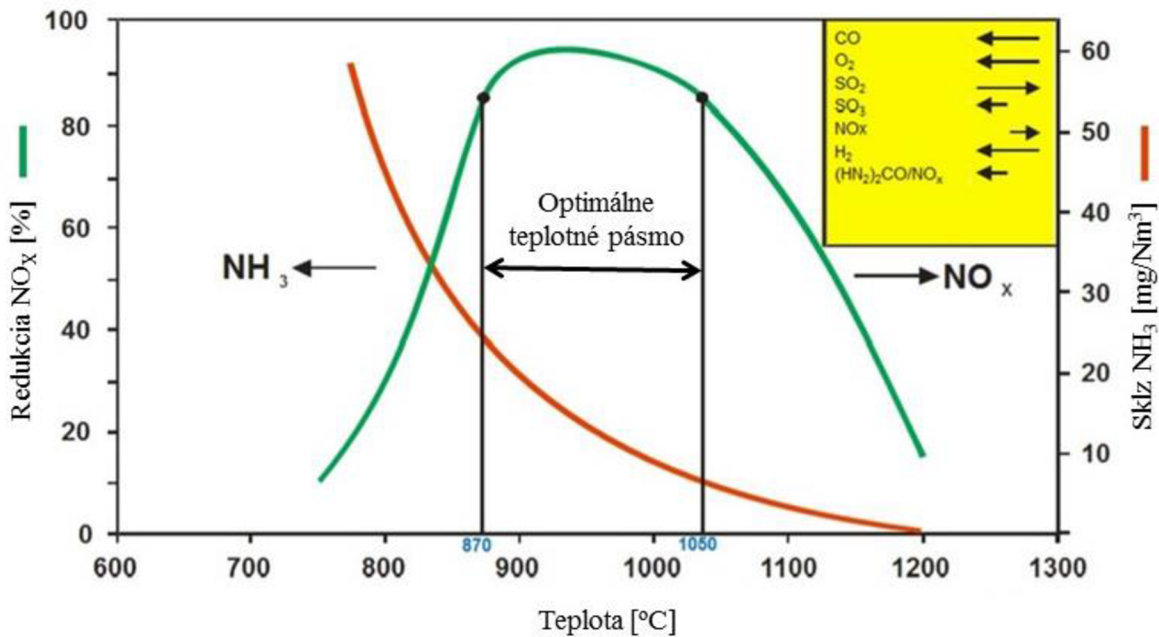
Z rozboru sledovaných množstiev jednotlivých emisií vyplýva, že horák Turbu-Flex<sup>TM</sup> vyprodukoval o 13,53 t NO<sub>x</sub> viac ako horák M.A.S.<sup>©</sup>. V prípade produkcie oxidu uhoľnatého došlo zmenou horáka k zníženiu o 686,65 t. Pre adekvátne porovnanie boli tieto hodnoty prepočítané na množstvo vyprodukovaného slinku. Na základe týchto prepočtov bolo zistené, že produkcia NO<sub>x</sub> u horáka Turbu-Flex<sup>TM</sup> stúpila o 0,000007 t<sub>NO<sub>x</sub></sub>/t<sub>slinku</sub> a produkcia CO klesla o 0,00207 t<sub>CO</sub>/t<sub>slinku</sub>. Je to výsledkom optimálnejšieho spaľovacieho procesu, vďaka čomu je v spaľovacom prostredí vyšší obsah kyslíka O<sub>2</sub>, ktorý má za následok vyššiu tvorbu NO<sub>x</sub> a zároveň nižšiu tvorbu CO.

Treba však poznamenať, že emisný limit pre NO<sub>x</sub> (500 mg/m<sup>3</sup>) stanovený ministerstvom životného prostredia bol dodržaný. Na rozklad vzniknutých oxidov dusíka je v spoločnosti CEMMAC a.s. aplikovaná selektívna nekatalytická redukcia (SNCR).

Základom správneho fungovania nekatalytickej redukcie je vytvorenie ideálnych redukčných podmienok pre prednostnú (selektívnu) reakciu iónov NH<sub>2</sub><sup>-</sup> s oxidmi dusíka, za vzniku elementárneho dusíka a vodnej pary (rovnica 6.8), čím dôjde k ich zníženiu. [53]

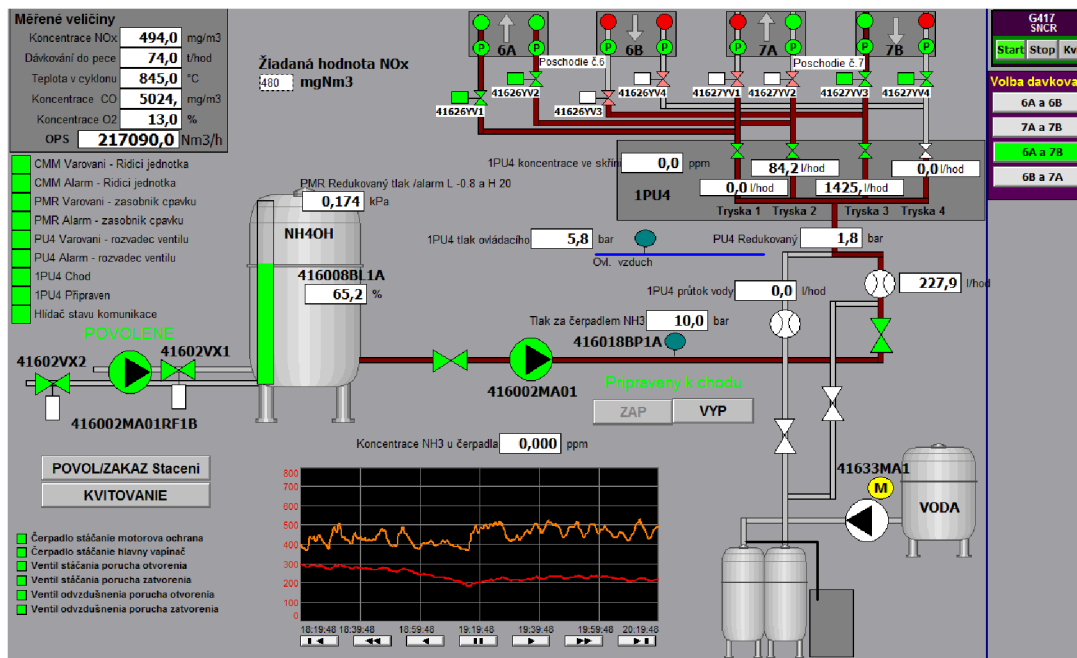


Účinnosť selektívnej nekatalytickej redukcie je silne závislá na reakčnej teplote a koncentrácii ostatných plynov (CO, H<sub>2</sub> a O<sub>2</sub> posúvajú teplotné okno k nižším teplotám, SO<sub>2</sub> k vyšším). Ideálna teplota pre redukciu NO<sub>x</sub> sa nachádza v rozpätí 870 – 1050 °C. Ak je reagent vstrekaný do oblasti nižších teplôt, oxidy dusíka s radikálom NH<sub>2</sub><sup>-</sup> nezreagujú, pretože reakčná rýchlosť je nízka. Tým dochádza k tzv. čpavkovému sklzu, čo znamená zvýšenú koncentráciu NH<sub>3</sub> v prúde plynov. V prípade dávkovania činidla do teplôt vyšších ako vymedzené teplotné okno, radikál NH<sub>2</sub><sup>-</sup> prednostne reaguje s kyslíkom O<sub>2</sub>, čím dochádza k nárastu koncentrácie oxidov dusíka namiesto ich redukcie. [53]



Obrázok 6.2: Čpavkový sklz [54]

Ako zdroj radikálov  $NH_2^-$  je v pecnom systéme spoločnosti CEMMAC a.s. používaná čpavková voda ( $NH_4OH$ ). Vstrekuje sa do kalcinačného kanála, kde sú teploty okolo 900 °C. Na obr.6.3 je zobrazená vizualizácia dávkovacieho systému čpavkovej vody, ktorú má operátor rotačnej pece k dispozícii na monitorovacích zariadeniach v centrálnom velíne. Jedná sa o plne automatickú reguláciu. Operátor nastaví požadovanú koncentráciu  $NO_x$  na výstupe z komína (zväčša je nastavených 480  $mg/m^3$ ) a systém automaticky upravuje dávkovanie čpavkovej vody tak, aby bol tento limit dodržaný. Na monitore sú zobrazené aktuálne koncentrácie  $NO_x$ .



Obrázok 6.3 – Vizualizácia čpavkového hospodárstva

Na dodržanie emisného limitu pre oxidy dusíka na úrovni 500  $mg/m^3$  je do systému selektívnej nekatalytickej redukcie dávkané určité množstvo čpavkovej vody. Spotreba

čpavkovej vody je denne meraná a archivovaná v prevádzkových záznamoch. Podrobnou analýzou týchto dát bolo získané množstvo spotrebovanej čpavkovej vody počas sledovaného obdobia za rok 2019 a 2020. Priemerná spotreba čpavkovej vody je vyčíslená podľa vzťahu 6.9.

$$\dot{m}_{\text{NH}_4\text{OH}} = \frac{m_{\text{NH}_4\text{OH}}}{P} \quad (6.9)$$

Napr. pre horák M.A.S.<sup>©</sup>:  $\dot{m}_{\text{NH}_4\text{OH}} = \frac{1\,545}{363\,661} = 0,00425 \text{ t}_{\text{NH}_4\text{OH}}/\text{t}_{\text{slinku}}$ , ďalej spočítané v MS Excel.

Tabuľka 6.11 Spotreba čpavkovej vody

	Označenie	Jednotky	M.A.S. <sup>©</sup> (2019)	Turbu-Flex <sup>TM</sup> (2020)	Rozdiel
Spotreba NH <sub>4</sub> OH [56]	$m_{\text{NH}_4\text{OH}}$	t	1 545	1 681	136
Produkcja slinku [56]	$P$	t	363 661	371 219	
Priemerná spotreba NH <sub>4</sub> OH	$\dot{m}_{\text{NH}_4\text{OH}}$	$\text{t}_{\text{NH}_4\text{OH}}/\text{t}_{\text{slinku}}$	0,00425	0,00453	0,00028

Porovnaním týchto údajov bolo zistené, že pecný systém s použitím horáka Turbu-Flex<sup>TM</sup> spotreboval o 136 t NH<sub>4</sub>OH viac ako pecný systém s horákom M.A.S.<sup>©</sup> počas sledovaného obdobia. V prepočte na tonu slinku to znamená, že pecný systém s horákom Turbu-Flex<sup>TM</sup> (2020) priemerne spotreboval o 0,00028 t<sub>NH<sub>4</sub>OH</sub>/t<sub>slinku</sub> viac ako s horákom M.A.S.<sup>©</sup> (2019). Je to dôsledkom toho, že produkcia NO<sub>x</sub> horáka Turbu-Flex<sup>TM</sup> mierne stúpila a na dodržanie emisného limitu bolo potrebné vyššie dávkované množstvo čpavkovej vody.

## 7 Ekonomické zhodnotenie a návratnosť

Do ekonomického zhodnotenia sú zahrnuté všetky vplyvy, ktoré bolo možné vyčíslit'. V nasledujúcej tabuľke sú tieto vplyvy zosumarizované spolu s cenami jednotlivých položiek a následne vyčíslené v miestnej mene (EUR). Znamienko - pri jednotlivých cenách znamenajú náklady, ktoré musí spoločnosť CEMMAC a.s. vynaložiť.

Tabuľka 7.1 Ekonomické zhodnotenie

	jednotka	M.A.S. <sup>©</sup> (2019)	TurbuFlex™ (2020)	Rozdiel	Cena [EUR/t]	Suma [EUR]
Prevádzkové hodiny	hod	7 234,0	7 330,5	96,5		
Produkcia slinku	t	363 661	371 219	7 558	49	370 342
Hodinový výkon	t/h	50,27	50,64	0,37		
Off-spec slinok	t	46 548	24 117	-22 431		
Špecifická spotreba tepla	GJ/t <sub>slinku</sub>	3,824	3,813	-0,011		
Prepočítaná spotreba tepla*	GJ	1 419 523	1 415 386	-4 137	-1,45**	5 999
Množstvo CO <sub>2</sub>	t	278 328	284 113	5 785	-27	-156 195
Emisný faktor	t <sub>CO2</sub> /t <sub>slinku</sub>	0,76535	0,76535	-		
Množstvo NO <sub>x</sub>	t	528,13	541,66	13,53	-49,79	-674
Priemerné množstvo NO <sub>x</sub>	t <sub>NOx</sub> /t <sub>slinku</sub>	0,001452	0,001459	0,000007		
Množstvo CO	t	3 992,99	3 306,34	-686,65	-33,19	22 790
Priemerné množstvo CO	t <sub>CO</sub> /t <sub>slinku</sub>	0,01098	0,00891	-0,00207		
Spotreba NH <sub>4</sub> OH	t	1 545	1 681	136	-140	-19 040
Priemerná potreba NH <sub>4</sub> OH	t <sub>NH4OH</sub> /t <sub>slinku</sub>	0,00425	0,00453	0,00028		
<b>ZISK</b>						<b>223 222</b>

\* prepočet na rovnakú produkciu slinku 371 219 t (z roku 2020)

\*\*cena uvedená v EUR/GJ

V porovnanom období bolo s horákom Turbu-Flex™ vyrobených viac ton slinku ako s horákom M.A.S.<sup>©</sup>, čo bolo spôsobené vyšším počtom prevádzkových hodín (o 96,5 h) a zvýšeným hodinovým výkonom (o 0,37 t/h). Tieto dva pozitívne vplyvy nového horáka umožnili zvýšenie produkcie slinku o 7 558 ton. Pri priemernej cene slinku 49 EUR/t to predstavuje prínos vo výške 370 342 EUR.

Zmenou hlavného horáka bola dosiahnutá zvýšená kvalita slinku, čo sa prejavilo nižšou produkciou off-spec slinku o 22 431 ton. Tento vplyv však do celkového ekonomického zhodnotenia zahrnutý nie je, pretože i vyššie množstvo off-spec slinku je možné spracovať, ale je potrebné precíznejšie dávkovanie tohto slinku do cementových mlynov a častejšia kontrola kvality cementu pri jeho mletí.



Vyčíslením množstva tepla potrebného na produkciu 1 t slinku bolo zistené, že horák Turbu-Flex™ spotreboval o 0,011 GJ/t<sub>slinku</sub> menej ako horák M.A.S.®. Na základe tohto výsledku a pri uvažovaní rovnakej produkcie slinku (371 219 t) bolo vyčíslené množstvo ušetreného tepla na hodnotu 4 137 GJ. Palivové náklady na 1 GJ tepelnej energie sú 1,45 EUR. Je to cena, s ktorou kalkuluje spoločnosť CEMMAC a.s. a je vyčíslená na základe nákupnej ceny jednotlivých palív, spotrebovaného množstva a priemernej výhrevnosti týchto palív. Na základe týchto údajov bolo vypočítané, že zmenou hlavného horáka ušetrila spoločnosť CEMMAC a.s. na palivových nákladoch 5 999 EUR.

V dôsledku zvýšenej produkcie slinku s horákom Turbu-Flex™ došlo k zvýšenej produkcii CO<sub>2</sub>. Pri uvažovaní rovnakého emisného faktoru, pecný systém s horákom Turbu-Flex™ vyprodukoval o 5 785 t CO<sub>2</sub> viac ako s použitím horáka M.A.S.®. Pri uvažovanej rozpočtovej cene emisných povoleniek CO<sub>2</sub> na úrovni 27 EUR/t<sub>CO2</sub>, to znamená zvýšenie nákladov o 156 195 EUR.

Z mesačných emisných protokolov vyplýva, že zmenou hlavného horáka stúpla produkcia NO<sub>x</sub> o 13,53 t. Poplatok pre jednotlivé znečisťujúce látky podliehajúce poplatkovej povinnosti vyplýva zo Zákona č. 401/1998 Z.z. o poplatkoch za znečisťovanie ovzdušia. Tento zákon stanovuje, že za 1 t vyprodukovaných emisií oxidov dusíka musí spoločnosť zaplatiť 49,79 EUR, čo znamená, že prevádzkové náklady boli zvýšené o 674 EUR. Naopak, produkcia CO v dôsledku zmeny horáka klesla o 686,65 t, čo pri cene stanovenej rovnakým zákonom vo výške 33,19 EUR/t<sub>CO</sub> predstavuje zníženie nákladov o 22 790 EUR.

Zvýšená tvorba NO<sub>x</sub> je priamo spätá so zvýšenou spotrebou čpavkovej vody. Z vykonanej podrobnej analýzy vyplýva, že počas porovnávaného času stúpla spotreba čpavkovej vody o 136 t. Nákupná cena čpavkovej vody pre spoločnosť CEMMAC a.s. je vo výške 140 EUR/t<sub>NH4OH</sub>, čo znamená zvýšenie prevádzkových nákladov o 19 040 EUR.

Zosumarizovaním všetkých pozitívnych a negatívnych vplyvov zmeny hlavného horáka a ich ekonomického zhodnotenia bolo zistené, že počas sledovaného obdobia (318 dní) predstavuje prínos z použitia nového horáka zisk vo výške 223 222 EUR. Pre vyčíslenie doby návratnosti je tento údaj prepočítaný na 330 produkčných dní, čo predstavuje čistý ročný zisk z investície 231 645 EUR.

Celkové investičné náklady sa skladajú z ceny projektovej dokumentácie, ceny dvoch horákov vrátane nevyhnutného príslušenstva (napr. dúchadlo, úprava horákového vozíka), montáže horáka s príslušenstvom a jeho uvedenia do prevádzky. Keďže priemerný čas na opravu horáka je 10 pracovných dní, bolo nevyhnutné zakúpenie dvoch horákov z dôvodu minimalizovania času odstávky pecného systému potrebného na výmenu horáka. Na realizáciu projektu zmeny horáka boli vynaložené celkové investičné náklady vo výške 640 100 EUR. [49]

Tabuľka 7.2 Zisk z investície

Čistý zisk z investície za sledovaný čas	EUR	223 222
Čistý ročný zisk z investície $Z_r$	EUR	231 645
Náklady na investíciu $N_i$	EUR	640 100

Pre vyjadrenie prostej doby návratnosti je použitý vzťah 7.1 [55]:

$$T_o = \frac{N_i}{Z_r} = \frac{640\ 100}{231\ 645} = 2,76 \quad (7.1)$$

Na základe výsledkov tejto analýzy a použitím vzťahu 7.1 bola prostá doba návratnosti tohto projektu vyčíslená na 2,76 roka (približne 33 mesiacov).

## 8 Záver

Cementársky priemysel patrí k energeticky najnáročnejším priemyselným odvetviám. Veľmi dôležitou súčasťou pecného systému je hlavný horák rotačnej pece, ktorý produkuje časť potrebnej tepelnej energie pre výpal slinku.

Dizajn horákov sa počas historického vývoja menil, pričom v súčasnosti sú najviac využívané viackanálové horáky zamerané na vysoký podiel alternatívnych palív. V práci sú porovnané horáky od najznámejších výrobcov z celého sveta (KHD, Polysius, Dynamis, FLSmidth, Fives Pillard, A Tec-Greco) s rôznymi konštrukčnými prevedeniami. Porovnaním jednotlivých konštrukčných riešení som zistila, že najväčší rozdiel je v prevedení kanálov primárneho vzduchu.

Hlavným cieľom mojej diplomovej práce bolo porovnať dva hlavné horáky použité v pecnom systéme spoločnosti CEMMAC a.s. a zanalyzovať vplyv nového horáka na pecný systém.

Horák Mono-Air-duct-System (M.A.S.<sup>©</sup>) od spoločnosti UNITHERM CEMCON bol používaný do roku 2019. Vytvorením CFD modelu bolo zistených viacero nedostatkov tohto horáka, z ktorých najdôležitejší je opačná rotácia primárneho vzduchu voči sekundárnemu, čo spôsobovalo horšie spaľovanie alternatívnych palív. Na základe týchto poznatkov bolo v roku 2020 rozhodnuté o nákupe horáka Turbu-Flex<sup>TM</sup> od spoločnosti FCT Combustion, ktorý tieto nedostatky eliminuje.

Z konštrukčného hľadiska je najväčší rozdiel v spôsobe riešenia primárneho vzduchu. Horák M.A.S.<sup>©</sup> ako zdroj vzduchu využíva ventilátor a do spaľovacieho prostredia je všetok tento vzduch privádzaný cez nastaviteľné dýzy umiestnené z vonkajšej strany uhoľného kanála. Horák Turbu-Flex<sup>TM</sup> využíva dúchadlo a primárny vzduch má rozdelený na axiálny a radiálny prúd, ktorý obklopuje uhoľný kanál z oboch strán. Vzduch prúdi do spaľovacieho prostredia cez dýzy, pričom dýzy axiálneho vzduchu sú rozdelené do dvoch režimov (normálny a „boost“).

Podrobnou analýzou prevádzkových záznamov som skúmala vplyv zmeny hlavného horáka na pecný systém spoločnosti CEMMAC a.s..

Zmena hlavného horáka sa pozitívne prejavila vo zvýšenej produkcii slinku o 7 558 t, čo je spôsobené vyšším časovým využitím (o 96,5 h) a vyšším priemerným hodinovým výkonom (o 0,37  $t_{\text{slinku}}/h$ ) pecného systému s novým horákom Turbu-Flex<sup>TM</sup>. Ďalší pozitívny vplyv tohto horáka bol zistený pri analýze kvality slinku. Nový horák produkoval kvalitnejší slinok, s vyšším obsahom alitu (66,43 %) a nižším obsahom voľného vápna (2,6 %) v porovnaní s horákom M.A.S.<sup>©</sup>. Vďaka stabilnejšej prevádzke došlo i k nižšej produkcii off-spec slinku. Použitím nového horáka Turbu-Flex<sup>TM</sup> klesla spotreba tepelnej energie pecného systému o 11 kJ/ $t_{\text{slinku}}$ . Ďalší pozitívny vplyv nového horáka súvisí s poklesom produkcie oxidu uhoľnatého o 2,07 kg $CO/t_{\text{slinku}}$ . Všetky vyššie spomínané pozitívne vplyvy sú výsledkom kvalitnejšieho a dokonalejšieho spaľovania horáka Turbu-Flex<sup>TM</sup> a vyššej prevádzkovej spoľahlivosti.

Negatívny vplyv nového horáka bol zaznamenaný vo vyššej produkcii oxidov dusíka o 0,007 kg $NO_x/t_{\text{slinku}}$ , kvôli čomu sa zvýšila spotreba čpavkovej vody v pecnom systéme o 0,28 kg $NH_4OH/t_{\text{slinku}}$ . Dôvodom tohto nežiadúceho vplyvu je vyšší obsah kyslíka  $O_2$  v spaľovacom prostredí, ktorý je spôsobený efektívnejším spaľovaním. Táto zvýšená koncentrácia kyslíka podporuje tvorbu  $NO_x$ , ale naopak redukuje tvorbu CO. Keďže produkcia oxidu uhoľnatého významne klesla, zatiaľ čo zvýšená produkcia oxidov dusíka až taká významná nebola, môžeme skonštatovať, že bol dosiahnutý optimálny pomer medzi obsahom kyslíka a množstvom vyprodukovaných emisných látok.

Ekonomickým zhodnotením všech pozitivních a negativních vplyvov a následným porovnaním s celkovými investičnými nákladmi tohto projektu mi vyšla prostá doba návratnosti 2,76 roka.

Ciele stanovené pri návrhu projektu – vyššia kvalita slinku, efektívnejšie využitie tepla – boli splnené. Tretí cieľ – zníženie emisií NO<sub>x</sub> – síce splnený nebol, ale zaznamenaný nárast emisií bol minimálny.

Na základe vyššie uvedených skutočností hodnotím projekt zmeny hlavného horáka v pecnom systéme spoločnosti CEMMAC a.s. ako veľmi úspešný. Rovnakou metodikou bude vyhodnotená prevádzka horáka Turbu-Flex™ i v roku 2021.

## ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV

- [1] CHATZIARAS, N.; PSOMOPOULOS, C. S.; THEMELIS, N. J. Use of alternative fuels in cement industry. In: *Proceedings of the 12th International Conference on Protection and Restoration of the Environment*. [online] Greece: Skiathos Island, 2014, s. 521-529. [cit. 2021-5-1] ISBN 978-960-88490-6-8. Dostupné také z: [https://www.researchgate.net/publication/263714046\\_Use\\_of\\_alternative\\_fuels\\_in\\_cement\\_industry](https://www.researchgate.net/publication/263714046_Use_of_alternative_fuels_in_cement_industry)
- [2] Key Facts & Figures. *Cembureau.eu* [online]. [cit. 2021-5-3]. Dostupné z: <https://cembureau.eu/about-our-industry/key-facts-figures/>
- [3] MUJUMDAR, Kaustubh S., K.V. GANESH, Sarita B. KULKARNI a Vivek V. RANADE. Rotary Cement Kiln Simulator (RoCKS): Integrated modeling of pre-heater, calciner, kiln and clinker cooler. *Chemical Engineering Science* [online]. 2007, **62**(9), 2590-2607 [cit. 2021-4-30]. ISSN 00092509. Dostupné z: doi:10.1016/j.ces.2007.01.063
- [4] BÁRTA, Rudolf. *Chemie a technologie cementu*. Praha: Nakladatelství Československé akademie věd, 1961.
- [5] PIEPER, C., B. LIEDMANN, S. WIRTZ, V. SCHERER, N. BODENDIEK a S. SCHAEFER. Interaction of the combustion of refuse derived fuel with the clinker bed in rotary cement kilns: A numerical study. *Fuel* [online]. 2020, **266** [cit. 2021-4-30]. ISSN 00162361. Dostupné z: doi:10.1016/j.fuel.2020.117048
- [6] STN EN 197-1 (722101). *Cement. Časť 1: Zloženie, špecifikácie a kritériá na preukazovanie zhody cementov na všeobecné použitie*. Bratislava: Slovenský ústav technickej normalizácie, 2012.
- [7] Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Production of Cement, Lime and Magnesium Oxide. In: *JRC REFERENCE REPORT* [online]. Luxembursko: Publications Office of the European Union, 2013, s. 7 [cit. 2021-1-29]. ISBN 978-92-79-32944-9. ISSN 1831-9424. Dostupné z: doi:10.2788/12850
- [8] TAYLOR, Harry F. W. *Cement chemistry*. 2nd ed. London: Telford, 1997. ISBN 0727725920.
- [9] KOTLÍK, Petr. *Stavební materiály historických objektů: materiály, koroze, sanace*. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 1999. ISBN 80-7080-347-9.
- [10] *Lea's chemistry of cement and concrete*. 4th ed. Editor Peter C. HEWLETT. Oxford: Elsevier, 2004. ISBN 9780750662567.
- [11] BHATTY, Javed I., F. MacGregor MILLER a Steven H. KOSMATKA. PORTLAND CEMENT ASSOCIATION. *Innovations in Portland Cement Manufacturing*. 2nd edition. 2011, 1734 s. ISBN 978-0893122713.

- [12] NØRSKOV, Linda Kaare. *Combustion of solid alternative fuels in the cement kiln burner*. Kgs. Lyngby, 2012. Dostupné také z: [https://backend.orbit.dtu.dk/ws/portalfiles/portal/74227236/PhD.\\_thesis\\_Linda\\_N\\_rskov\\_31072012..PDF](https://backend.orbit.dtu.dk/ws/portalfiles/portal/74227236/PhD._thesis_Linda_N_rskov_31072012..PDF). Disertace. Technical University of Denmark, Department of Chemical and Biochemical Engineering, CHEC Research Centre.
- [13] MORTEN, Nedergaard Pedersen. *Co-firing of Alternative Fuels in Cement Kiln Burners*. Kgs. Lyngby, 2018. Dostupné také z: [https://backend.orbit.dtu.dk/ws/portalfiles/portal/161972551/808873\\_PhD\\_thesis\\_Morten\\_Nedergaard\\_Pedersen\\_fil\\_fra\\_trykkeri.pdf](https://backend.orbit.dtu.dk/ws/portalfiles/portal/161972551/808873_PhD_thesis_Morten_Nedergaard_Pedersen_fil_fra_trykkeri.pdf). Disertace. Technical University of Denmark, Department of Chemical and Biochemical Engineering, CHEC Research Centre.
- [14] NOBIS, R.H. Latest rotary kiln burner technology: possibilities and experiences. *IEEE Transactions on Industry Applications* [online]. **27**(5), 798-806 [cit. 2021-3-12]. ISSN 00939994. Dostupné z: doi:10.1109/28.90332
- [15] GRÖNWALL, Fred. *Optimization of Burner Kiln 7, Cementslita*. Uppsala, 2010. ISSN 1654-9392. Dostupné také z: [https://stud.epsilon.slu.se/2092/1/gronwall\\_f\\_101220.pdf](https://stud.epsilon.slu.se/2092/1/gronwall_f_101220.pdf). Disertace. Swedish University of Agricultural Sciences, Faculty of Natural Resources and Agricultural Sciences, Department of Energy and Technology.
- [16] VACCARO, M.H. Low NO/sub x/ rotary kiln burner technology: design principles & case study. In: *IEEE-IAS/PCS 2002 Cement Industry Technical Conference. Conference Record (Cat. No.02CH37282)* [online]. IEEE, 2002, s. 266-270 [cit. 2021-1-25]. ISBN 0-7803-7254-9. Dostupné z: doi:10.1109/CITCON.2002.1006513
- [17] LOWEST, T.M. a L.P. EVANS. The effect of burner design and operating parameters on flame shape, heat transfer, NO<sub>x</sub> and SO<sub>3</sub> cycles. *ZKG (Zement-Kalk-Gips) International*. 2013, **46**(12), 761-768. ISSN 0722-4397.
- [18] WIRTHWEIN, R. a B. EMBERGER. Burners for alternative fuels utilisation - Optimization of kiln firing systems for advanced alternative fuel co-firing. *Cement International*. 2010, **8**(4), 42-46.
- [19] VACCARO, M. Burning alternative fuels in rotary cement kilns. In: *IEEE Cement Industry Technical Conference, 2006. Conference Record* [online]. IEEE, 2006, s. 127-136 [cit. 2021-2-21]. ISBN 1-4244-0372-3. Dostupné z: doi:10.1109/CITCON.2006.1635711
- [20] High pressure jet burners for multi-fuel scenarios PYROSTREAM®, PYROJET®. *Khd.com* [online]. [cit. 2021-3-12]. Dostupné z: [https://www.khd.com/brochures.html?file=tl\\_files/downloads/brochures/KHD\\_PYROSTREAM.pdf](https://www.khd.com/brochures.html?file=tl_files/downloads/brochures/KHD_PYROSTREAM.pdf)
- [21] D'HUBERT, Havier. Latest burner profiles. *Global Cement Magazine*. Epsom: Pro Global Media, 2017, **20**(3), 10-20. ISSN 1753-6812.

- [22] KNOCH, Alexander, Ernst SCHRÖDER, Karin KLUTHE, Wilhelm WENZEL a Giovanni LOGGIA. KHD HUMBOLDT WEDAG AG. *Rotary furnace burner*. USA. US8449292B2. Uděleno 2013-03-11.
- [23] Firing System. *Khd.com* [online]. [cit. 2021-3-13]. Dostupné z: <https://www.khd.com/firing-systems.html>
- [24] KHD HUMBOLDT WEDAG AG. Pyro Process Equipment. *Cementassociation.ir* [online]. 09/2008 [cit. 2021-3-13]. Dostupné z: <http://cementassociation.ir/library/168.pdf>
- [25] THYSSENKRUPP. Polflame® Burner. *Thyssenkrupp-industrial-solutions.com* [online]. [cit. 2021-3-17]. Dostupné z: [https://ucpcdn.thyssenkrupp.com/\\_legacy/UCPthyssenkruppBAIS/assets.files/products\\_\\_services/mineral\\_processing/pyroprocessing\\_systems/product\\_sheet-polflame-en-webview.pdf](https://ucpcdn.thyssenkrupp.com/_legacy/UCPthyssenkruppBAIS/assets.files/products__services/mineral_processing/pyroprocessing_systems/product_sheet-polflame-en-webview.pdf)
- [26] THYSSENKRUPP. Polflame® VN. *Thyssenkrupp-industrial-solutions.com* [online]. [cit. 2021-3-18]. Dostupné z: [https://ucpcdn.thyssenkrupp.com/\\_legacy/UCPthyssenkruppBAIS/assets.files/products\\_\\_services/service/productfinder\\_bilder/references/ammonia\\_1/cement\\_plants/clinker\\_production/burning/tkis\\_polflame\\_en.pdf](https://ucpcdn.thyssenkrupp.com/_legacy/UCPthyssenkruppBAIS/assets.files/products__services/service/productfinder_bilder/references/ammonia_1/cement_plants/clinker_production/burning/tkis_polflame_en.pdf)
- [27] FERREIRA, Guilherme, Luis Felipe PINHO a Luis Filipe FABIANI. Designing Solutions. *World Cement*. 2013, **44**(2), 79-84. ISSN 0263-6050.
- [28] New Dynamis D-Flame Burner. *Dynamis-br.com* [online]. [cit. 2021-3-17]. Dostupné z: <https://dynamis-br.com/wp-content/uploads/2020/08/Dynamis-Apresentacao-D-FLAME-Webnar-19-08-2020.pdf>
- [29] FAVALLI, Renata, Luis Filipe FABIANI a Luiz Felipe DE PINHO. Enhancing the Performance of Kiln Burners. *World Cement*. 2015, **46**(11), 111-118. ISSN 0263-6050.
- [30] Cement kiln burner Catalogue 2014. *Dynamis-br.com* [online]. [cit. 2021-3-18]. Dostupné z: [https://dynamis-br.com/files/Catalogue\\_D-Flame.pdf](https://dynamis-br.com/files/Catalogue_D-Flame.pdf)
- [31] The next generation Duoflex burner is here. *Highlights Cement & Minerals*. 2008, (11), 15. ISSN 0909-8992.
- [32] DUOFLEX™ burner. *Flsmidth.com* [online]. [cit. 2021-2-15]. Dostupné z: <https://flsmidth-prod-cdn.azureedge.net/-/media/brochures/brochures-products/pyro/2000-2017/duoflex-burner.pdf?la=en-gb&rev=20d4e55a-e553-4bff-bd87-adeb4e95d104&hash=B5E802C885C2264E67D78F1D0D121D0F>
- [33] JETFLEX® burner. *Flsmidth.com* [online]. [cit. 2021-2-15]. Dostupné z: <https://flsmidth-prod-cdn.azureedge.net/-/media/brochures/brochures-products/pyro/2000-2017/jetflex-burner.pdf?rev=d0943bc5-be06-43e8-aded-99897f369358>



- [34] RICCI, Louis a Gaël LE PIVER. FIVES PILLARD. *Burner with adjustable air or gas injection*. France. WO2016020587A1. Zapsáno 11.02.2016.
- [35] Pillard NovaFlam®. *Cement-minerals.fivesgroup.com* [online]. [cit. 2021-2-13]. Dostupné z: <https://cement-minerals.fivesgroup.com/products/combustion/pillard-novaflamr.html>
- [36] NovaFlam® Rotary Kiln Burner. *Fives-pillard.de* [online]. [cit. 2021-2-13]. Dostupné z: <https://www.fives-pillard.de/03/03-01-00e.php>
- [37] FIVES PILLARD. *NovaFlam® burner, Return of experience, Design criteria* [online]. [cit. 2021-2-13]. Dostupné z: <https://docplayer.net/137646424-Novaflam-burner-return-of-experience-design-criteria.html>
- [38] Modern high momentum FLEXIFLAME™ rotary kiln burner. *Zement, Kalk, Gips international*. 2012, (8). ISSN 09490205.
- [39] Kiln Burner and FLEXIFLAME™. *Atec-ltd.com* [online]. [cit. 2021-3-20]. Dostupné z: <https://www.atec-ltd.com/en/products-processes/products/flexiflame-rotary-kiln-burner.html>
- [40] FlexiFlame™ Burners. *Atec-ltd.com* [online]. [cit. 2021-3-20]. Dostupné z: [https://www.atec-ltd.com/images/Kiln\\_Burner\\_Flexiflame.pdf](https://www.atec-ltd.com/images/Kiln_Burner_Flexiflame.pdf)
- [41] História. *Cemmac.sk* [online]. [cit. 2021-4-17]. Dostupné z: <http://www.cemmac.sk/dev/language/sk/historia/>
- [42] M.A.S. Kiln Burner. *Unitherm.at* [online]. [cit. 2021-4-15]. Dostupné z: [https://www.unitherm.at/images/downloads/catalogue/english/EN\\_2016-09\\_MAS\\_Catalogue\\_web.pdf](https://www.unitherm.at/images/downloads/catalogue/english/EN_2016-09_MAS_Catalogue_web.pdf)
- [43] Product Catalogue. *Unitherm.at* [online]. [cit. 2021-4-15]. Dostupné z: [https://www.unitherm.at/images/downloads/catalogue/english/EN\\_2016-09\\_Product\\_Catalogue\\_web.pdf](https://www.unitherm.at/images/downloads/catalogue/english/EN_2016-09_Product_Catalogue_web.pdf)
- [44] MAS Kiln Burner Catalogue. *Directindustry.com* [online]. [cit. 2021-4-19]. Dostupné z: <https://pdf.directindustry.com/pdf/unitherm-cemcon/mas-kiln-burner-catalogue/22046-59519.html>
- [45] UNITHERM CEMCON. *Operating and maintenance manual: Rotary kiln burner*. 2010. Poskytnuté spoločnosťou CEMMAC a.s.
- [46] PAUR, Markus a Alberto MOCTEZUMA SÁNCHEZ. M.A.S. Kiln Burner - Highest efficiency for every application. *Tappi.org* [online]. 2019 [cit. 2021-4-20]. Dostupné z: <https://www.tappi.org/content/Events/19PEERS/19PEE75.pdf>
- [47] FAVALLI, Renata, Yvonne YU, Roger HASSOLD, Joel MAIA a Robert JANSKY. Challenging the unseen with CFD. *World Cement*. 2021, (2), 33-36. ISSN 0263-6050.

- [48] HASSOLD, Roger. Maximizing alternate fuels using modeling and flexible burner design. *Fctcombustion.com* [online]. 2018 [cit. 2021-4-23]. Dostupné z: <https://fctcombustion.com/wp-content/uploads/2018/08/max-af-using-modeling-and-flexible-burner-afcm-2018.pdf>
- [49] Turbu-Flex Burners. *Fctcombustion.com* [online]. [cit. 2021-4-23]. Dostupné z: <https://fctcombustion.com/turbu-flex-burners>
- [50] TURBU-FLEX™ BURNER. *Fctcombustion.com* [online]. [cit. 2021-4-24]. Dostupné z: [https://fctcombustion.com/wp-content/uploads/2019/11/FCTProductBrochure\\_2.1.pdf](https://fctcombustion.com/wp-content/uploads/2019/11/FCTProductBrochure_2.1.pdf)
- [51] FCT COMBUSTION. *Návod na obsluhu a údržbu hlavného spaľovacieho systému: Pre zariadenie Horné Srnie - Slovensko*. 2020. Poskytnuté spoločnosťou CEMMAC a.s.
- [52] LAUX, Stefan a Bradley DAMSTEDT. Oxygen Injection for Emission Reduction in Cement Kilns: An Innovative Technology for Managing Nitrous Oxides and Carbon-Monoxide Emissions. *IEEE Industry Applications Magazine* [online]. 2019, **25**(2), 52-56 [cit. 2021-4-22]. ISSN 1077-2618. Dostupné z: doi:10.1109/MIAS.2018.2875200
- [53] GRÝCMANOVÁ, Markéta, ZBIEG, Rostislav: Metody dosažení emisních limitů emisí NOx kotlů velkých výkonů. *Biom.cz* [online]. 2012-05-02 [cit. 2021-04-25]. Dostupné z WWW: <<https://biom.cz/cz/odborne-clanky/metody-dosazeni-emisnich-limitu-emisi-nox-kotlu-velkych-vykonu>>. ISSN: 1801-2655.
- [54] SNOPI, Roman. Současný stav využitelnosti energetických produktů v ČR – kvalita, budoucnost, dostupnost. *Svcement.cz* [online]. [cit. 2021-4-25]. Dostupné z: <https://s3.eu-central-1.amazonaws.com/uploads.mangoweb.org/shared-prod/svcement.cz/uploads/2016/06/04-soucasny-stav-vyuzitelnosti-energetickyh-produktu-v-cr-kvalita-budoucnost-disponibilita.pdf>
- [55] BALÁŠ, Marek. *Ekonomika v energetice (prednáška)*. Brno, 2020.

## ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV A SKRATIEK

Symbol	Veličina	Jednotka
$\alpha$	Súčiniteľ prebytku vzduchu	-
$E$	Emisný faktor z roku 2019	$t_{CO_2} \cdot t_{slinku}^{-1}$
$I_a$	Axiálny moment horáka	$N \cdot MW$
$m_a$	Hmotnostný tok axiálneho vzduchu	$kg \cdot s^{-1}$
$\dot{m}_{CO}$	Priemerná produkcia oxidu uhoľnatého	$t_{CO} \cdot t_{slinku}^{-1}$
$m_{CO}$	Množstvo oxidu uhoľnatého v sledovanom období	$t$
$m_{CO_2}$	Množstvo oxidu uhličitého v sledovanom období	$t$
$m_i$	Spotreba paliva	$t$
$\dot{m}_{NH_4OH}$	Priemerná spotreba čpavkovej vody	$t_{NH_4OH} \cdot t_{slinku}^{-1}$
$m_{NH_4OH}$	Spotreba čpavkovej vody v sledovanom období	$t$
$\dot{m}_{NO_x}$	Priemerná produkcia oxidov dusíka	$t_{NO_x} \cdot t_{slinku}^{-1}$
$m_{NO_x}$	Množstvo oxidov dusíka v sledovanom období	$t$
$p$	Hodinový výkon rotačnej pece	$t \cdot h^{-1}$
$P$	Produkcia slinku	$t$
$P_{th}$	Výkon horáka	$MW$
$Q$	Celková spotreba tepelnej energie	$GJ$
$Q_{por}$	Spotreba tepelnej energie potrebná na produkciu 371 219 t slinku	$GJ$
$Q_r^i$	Výhrevnosť paliva	$GJ \cdot t^{-1}$
$STC$	Špecifická tepelná spotreba (z angl. Specific thermal consumption)	$GJ \cdot t^{-1}$
$t$	Prevádzkové hodiny	$h$
$v_a$	Rýchlosť axiálneho vzduchu	$m \cdot s^{-1}$
$Al_2O_3$	Oxid hlinitý	
$AP$	Alternatívne palivá	
$BAT$	Najlepšie dostupné technicky (z angl best available techniques)	
$CA$	Centrálny vzduch (z angl. central air)	
$C_2S$	Dikalciumsilikát (belit)	
$C_3S$	Trikalciumsilikát (alit)	
$C_3A$	Trikalciumaluminát (aluminát)	
$C_4AF$	Tetrakalciumaluminátferit (ferit)	
$CaO$	Oxid uhoľnatý	
$CaCO_3$	Uhličitan vápenatý	
$CO_2$	Oxid uhličitý	
$DHV$	Denné hlásenie výroby	

$Fe_2O_3$	Oxid železitý
$H_2O$	Voda
$H_2$	Vodík (molekulární)
$IR$	Interná (vnútorná) recirkulácia
M.A.S. ©	Jednopotrubný systém vzduchu (z angl.. Mono Airduct System)
$MgO$	Oxid horečnatý
$N_2$	Dusík (molekulární)
$NH_2^-$	Čpavkový ión (anión)
$NH_3$	Čpavok, amoniak
$NH_4OH$	Čpavková voda, amoniaková voda
$NO$	Oxid dusný
$NO_x$	Oxidy dusíka
$O_2$	Kyslík (molekulární)
$PAP$	Práškové alternatívne palivo
$SiO_2$	Oxid siričitý
$Swirl$	Nastavenie vírenia
$TAP$	Tuhé alternatívne palivá

## **ZOZNAM PRÍLOH**

- 1       Denné hlásenie výroby (DHV) zo dňa 22.9.2020
- 2       Protokol o kvalite slinku zo dňa 2.10.2020
- 3       Mesačný protokol emisných hodnôt NO<sub>x</sub> za mesiac 11/2019
- 4       Mesačný protokol emisných hodnôt CO za mesiac 11/2019