

Název přednášky:**Optimalizace primárních a sekundárních metod snižování emisí NO_x pro dosažení limitu 200 mg/m³****Autoři:**

Michal Stáňa, Ing., Ph.D.; Tomáš Blejchař, Ing., Ph.D., Bohumír Čech, Dr. Ing.; Rostislav Malý, Ing.; Jan Matoušek, Ing., Ph.D.; Oto Pumpřla, Ing.; Zbyszek Szeliga, Ing., Ph.D.

Klíčová slova:NO_x, CFD, EES, ANSYS CFX, KOTEL 2.0, SNCR, diagnostika spalovacího procesu**Abstract:**

The paper summarizes methods and procedures that putting together creates instrument for prediction effects of process conditions and constructional changes on emissions of NO_x and another parameters (efficiency etc.) of high output boilers. This instrument (or its parts) consisting from computational and diagnostic methods was tested on boiler G230 in Power Plant International Power Opatovice, PG350 Power Plant Prunětov 1, Boilers K7 and K5 in Cogeneration Power Plant Kopřivnice and Boiler T700 of Cogeneration Power Plant in Unipetrol RPA Litvínov.

Obecný úvod:

Zajištění budoucích energetických potřeb je, jak v České republice, tak i v Evropě, velice diskutovaným, ale nepříliš řešeným problémem. Zmínky o nezbytnosti zvýšení podílu jaderné energie a o tom, že se ani do budoucna nemáme šanci obejít bez elektráren na fosilní paliva jsou veřejnosti vnímány spíše negativně. Značné finanční prostředky se vynakládají na výzkum a vývoj alternativních a obnovitelných zdrojů energie, přitom podíl energie vyrobené z alternativních a obnovitelných zdrojů na celkové výrobě energie je v ČR velice nízký a v nejbližších letech se to příliš nezmění. Zatímco relativně malé výdaje (vztažené na vyrobené GWh elektrické a tepelné energie) do tradičních oblastí výroby energie mohou, při takto velkých objemech výroby, přinést zásadní finanční i environmentální prospěch.

V nejbližším časovém období bude na základě „Národního programu snižování emisí“ kladen důraz na snižování emisí oxidů dusíků (NO_x), kdy provozovatelé velké energetiky budou muset postupně do roku 2016 dosáhnout emisního limitu 200 mg·m_N⁻³.

To bude znamenat úpravy stávajícího provozního stavu zařízení, ve většině případů pak jejich rekonstrukci, s cílem uplatnit v maximální možné míře primární opatření pro snížení zmíněných emisí. Většina stávajících zařízení nebude ani po aplikaci primárních opatření schopna dosahovat limitu 200 mg·m_N⁻³ NO_x. Výrazná obměna stávajících zařízení za nové zdroje je ekonomicky nereálná. Pokud nechce být v nejbližších letech Česká republika ještě více ohrožena energetickou krizí (v případě odstavení uhelných kotlů neplnících emise NO_x), popřípadě sankcionována za neplnění emisních limitů 200 mg·m_N⁻³ NO_x, bude nezbytně nutné sáhnout i k realizaci sekundárních opatření redukce NO_x.

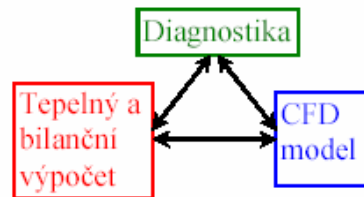
Výchozím bodem pro jakoukoliv technologickou změnu, je detailní znalost stávajícího stavu zařízení, která vychází z výsledků měření. Diagnostika stávajícího stavu zařízení (kdy je nutno znát detailně mnoho parametrů procesu) pomocí měření není ovšem vždy technicky možná v požadovaném rozsahu a proto je jednou z možností také kombinace měření a moderních výpočetních metod, čímž je možné dosáhnout požadovaného rozsahu diagnostiky stávajícího stavu. Na základě diagnostiky lze moderní výpočetní metody poté efektivně využít pro návrh, posouzení a optimalizaci cílených zásahů do spalovacího procesu s minimálními riziky oproti návrhům založeným pouze na měření, či dokonce pouze na předpokládaných projektovaných hodnotách, a navržené

zásahy pomocí těchto metod efektivně ověřit bez rizik pro vlastní zařízení a nesmyslně vynaložených investičních prostředků.

Pro správný návrh a optimalizace primárních i sekundárních opatření je pak nutná kombinace třech základních metod:

- 1) Diagnostiky
- 2) Tepelně bilančních výpočtů
- 3) CFD modelování.

Kombinací těchto metod lze získat komplexní nástroj, který umožňuje správně navrhnout a optimalizovat jak primární, tak i sekundární metody pro snižování emisí NO_x.



Diagnostika:

Výchozím bodem pro aplikaci jakýchkoliv opatření je detailní znalost stávajícího stavu zařízení. Každá spalovací komora, i kotlů stejné konstrukce, vykazuje jiné charakteristiky. Navíc je kvůli rozšíření palivové základny, spoluspalování, rekonstrukcím, atd. většina kotlů provozována za podmínek odlišných od stavu projekčního. Návrhu a optimalizaci primárních i sekundárních opatření musí proto předcházet diagnostika. Zevrubnou představu o stavu a parametrech kotle lze získat provedením následujících měření:

- Proměření teplotních polí na několika úrovních ve spalovací komoře, popř. v mezitahu, obrátovém prostoru a v dalších tazích kotle.
- Proměření koncentračních polí O₂, CO a NO_x na několika úrovních ve spalovací komoře, popř. v mezitahu, obrátovém prostoru a v dalších tazích kotle.
- Proměření rychlostních polí na několika úrovních ve spalovací komoře, popř. v mezitahu, obrátovém prostoru a v dalších tazích kotle.
- Komplexní diagnostika mlýnských okruhů.
- Poměrové měření tepelných toků do stěn.
- Měření průtoku vzduchů.
- Odběr a analýza reprezentativního vzorku paliva.

Některé veličiny lze určit z údajů provozních měřicích přístrojů. Stanovení parametrů jako jsou např. teplotní, koncentrační, rychlostní pole ve spalovací komoře, poměrové určení tepelných toků do stěn spalovací komory atd. je možné pouze pomocí speciálních metod a techniky obsluhované zkušeným personálem.

Pracoviště pro diagnostiku a provoz tepelně energetických zařízení katedry energetiky VŠB-TU Ostrava (KE DEZ) disponuje kompletním vybavením a personálem s bohatými zkušenostmi s realizací jak dílčích, tak uvedených komplexních měření. Toto vybavení zahrnuje chlazené sondy vlastní konstrukce s operační délkou až 6 m pro měření teploty metodou prosávacího pyrometru, chlazené sondy vlastní konstrukce s operační délkou až 6 m pro měření rychlostí, chlazené sondy vlastní konstrukce s operační délkou až 6 m pro odběr plynného vzorku, sondy pro poměrové rozdělení tepelných toků, modifikovanou aparaturu pro izokinetický odběr uhlénohého prášku z práškovodu, atd.

Tepelný a bilanční výpočet:

Vlastnímu sestavení tepelného výpočtu a CFD modelu kotle většinou předchází sestavení materiálových a tepelných bilancí mlýnských okruhů.

Pro zadání okrajových podmínek CFD modelu a pro sestavení tepelného výpočtu kotle je vhodné, na základě provozních a dalších doplňujících měření, sestavit kompletní materiálové a tepelné bilance všech teplosměnných ploch kotle. Pro tyto účely se jeví velice perspektivní využití aplikace EES (Engineering Equation Solver), která obsahuje rozsáhlé knihovny vlastností látek, včetně knihovny IAPWS pro vodu a páru a umožňuje řešení soustav rovnic pro tepelné a materiálové bilance. Hodnoty z takto sestavených bilancí (průtoky a teploty médií) pak slouží pro zadání a odladění zadání teplosměnných ploch v aplikaci KOTEL 2.0 a pro stanovení okrajových podmínek CFD modelu a odladění CFD modelu.

Sestavení tepelného výpočtu kotle velice usnadňuje aplikace KOTEL 2.0, která vychází z ruského normativu Rasčot 1973 (TRKA – Teplovoj Rasčot Kotelnych Agregatov). Tento normativ byl v bývalé ČSSR upraven a publikován v návrhu oborové normy, která nikdy nevešla v platnost: ON 070417: Tepelný výpočet parných kotlov. Uživatelské grafické rozhraní aplikace KOTEL 2.0 umožňuje přehledně zobrazit řazení teplosměnných ploch a jejich „propojení“ pomocí čar znázorňujících toky médií: voda-pára, vzduch, spaliny. Po „rozkliknutí“ zástupného symbolu teplosměnné plochy je možné zadat parametry vstupující do výpočtu. Aplikace usnadňuje posouzení provozních a konstrukčních zásahů na parametry jako je účinnost, parametry spalin, bilance teplosměnných ploch atd.

CFD model:

V současnosti existuje mnoho CFD aplikací jako jsou FLUENT, ANSYS, Star 3D, Flow 3D, Code Saturne, atd.

V rámci řešení uvedené problematiky spolupracuje KE DEZ VŠB-TU Ostrava úzce s firmou ORGREZ, a.s., Divize ekologie a systému jakosti. Odborníci firmy ORGREZ využívají aplikaci ANSYS CFX, která obsahuje i přednastavené reakce, které se dají s výhodou použít pro sestavení CFD modelů práškových kotlů.

Uhlí se definuje zadáním základních komponent C, H, O, N, S, popel, voda, prchavá hořlavina. Dále se zadává výhřevnost (nebo spalné teplo) a parametr respektující skutečné množství uvolněné prchavé hořlaviny při spalování oproti běžným postupům stanovení obsahu prchavé hořlaviny dle normy při analýzách paliva. Zásadní vliv na kinetiku hoření má i granulometrie, kterou lze zadat i koeficienty Rosin-Rammlerova rozdělení. Lze aktivovat model změny velikosti částice při vyhořívání.

V modelu pro návrh a optimalizaci **primárních opatření** jsou uvažovány reakce, které jsou schematicky uvedeny níže:

1. Uvolňování prchavé hořlaviny a HCN: **Spalitelné uhlí → Prchavá hořlavina + Tuhý zbytek + HCN**
3. Hoření prchavé hořlaviny: **Prchavá hořlavina + O₂ → CO₂ + H₂O**
4. Hoření tuhého zbytku: **Tuhý zbytek + O₂ → CO₂ + HCN**
5. Tvorba palivových NO: **HCN + O₂ → HCO + NO**
6. Destrukce palivových NO: **HCN + NO → HCO + N₂**
7. Hoření HCO: **HCO + O₂ → CO₂ + H₂O**
8. Tvorba promptních NO: **Prchavá hořlavina + O₂ + N₂ → NO**
9. Rozklad (Reburn) NO: **Prchavá hořlavina + NO → CO₂ + H₂O + N₂**
10. Vznik termálních NO: **N₂ + O₂ → NO**
11. Odpařování vlhkosti z uhlí: **H₂O (kapalina) → H₂O (pára)**

Složení a materiálové vlastnosti prchavé hořlaviny lze buď zadat, nebo je umí, na základě zadaného složení paliva, počítat ANSYS CFX jako směs CH₄, CO, H₂ a H₂O.

Podle složení prchavé hořlaviny se pak dále počítají stechiometrické koeficienty reakcí kterých se prchavá hořlavina zúčastňuje.

V modelu je možné vyhodnotit koncentrace a toky plynných složek: O₂, N₂, CH₄, CO₂, NO, H₂O, HCN, HCO, prchavé hořlaviny. Částice uhlí během procesu uvolňování prchavé hořlaviny a hoření mění své složení. U každé částice je možné po její trajektorii vyhodnotit v daný okamžik poměr základních komponentů v uhlí.

Ačkoli jsou v aplikaci ANSYS CFX již zahrnuty přednastavené reakce, které lze s výhodou využít pro CFD model konkrétních spalovacích zařízení, byly konstanty v těchto rovnicích určovány v laboratorních podmínkách např. spalováním čistých plynů, popř. konstanty pro spalování uhlí byly určeny pro vysoce výhřevné černé uhlí atd. a proto je v mnoha případech nezbytné upravit tyto konstanty na základě hodnot vyplývajících z měření a tepelně-bilančních výpočtů.

Aplikace ANSYS CFX umožňuje i přehledné zobrazení výsledků nejen formou obrázku, ale i pomocí animací.

ANSYS CFX umožňuje i definování vlastních proměnných, což následně usnadňuje vyhodnocení výsledků, např. definování koncentrace NO_x v jednotkách odpovídajících současné legislativě, tj. v mg·m⁻³, při normálních podmínkách, v suchém plynu, přepočtené na NO₂ a referenční koncentraci O₂.

Pro návrh a optimalizaci **sekundárních opatření** snižování emisí NO_x metodou SNCR za použití močoviny (NO_xOUT) byly odborníky firmy ORGREZ do aplikace ANSYS CFX doplněny následující reakce:

1. Termický rozklad vodného roztoku močoviny: $(\text{NH}_2)_2\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{NH}_3 + \text{CO}_2$
2. Redukce NO bez přítomnosti O₂ v rozmezí teplot 850-1050°C: $4\text{NH}_3 + 6\text{NO} \rightarrow 5\text{N}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$
3. Redukce NO za přítomnosti O₂ v rozmezí teplot 850-1050°C: $4\text{NH}_3 + 6\text{NO} + \text{O}_2 \rightarrow 4\text{N}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$
4. Hoření NH₃ nad teplotou 1050°C: $4\text{NH}_3 + 5\text{O}_2 \rightarrow 4\text{NO} + 6\text{H}_2\text{O}$
5. Odpařování vody z kapičky: **H₂O (kapalina) → H₂O (pára)**

Všechny chemické reakce jsou na sobě nezávislé, a probíhají až při dosažení určité aktivační energie (dodání tepla). V modelu je tedy možné sledovat hmotnostní koncentrace všech reagujících plynných látek, tedy: O₂, N₂, CO₂, NH₃, NO H₂O. Dále je možné sledovat průběh odpařování, tj. zmenšování částice a její trajektorii.

Postup:

Při sestavení komplexního nástroje pro návrh a optimalizaci primárních a sekundárních metod snižování emisí NO_x je vhodné postupovat dle následujícího postupu.

1. Vstupní identifikace základních parametrů provozu dané jednotky, shromáždění nutných podkladů týkajících se základních konstrukčních parametrů nezbytných pro vytvoření matematických modelů:

Technologická schémata spal. zařízení: voda-pára, spaliny-vzduch, mlýnské okruhy.

Konstrukční uspořádání a geometrie spal. komory a teplosměnných ploch.

Údaje provozních měřicích přístrojů.

2. Vyhodnocení stávajících informací. Ve spolupráci s provozovatelem zařízení definování dvou provozních režimů pro diagnostiku a sestavení modelů současného stavu kotle.

Sestavení bilančních výpočtů teplosměnných ploch a mlýnských okruhů. (Využití aplikací EES a EXCEL)

Sestavení tepelného výpočtu kotle. (Využití aplikace KOTEL 2.0.)

- Sestavení CFD modelu spal. komory kotle. popř. dalších částí spalovacího zařízení (např. práškovodů, 2. tahu atd.). (Využití aplikace ANSYS CFX)
3. Simulace obou provozních režimů při změně pouze těch parametrů, které se mění i na díle.
Využití aplikace KOTEL 2.0 pro posouzení změn okrajových podmínek pro CFD model.
CFD model pro oba provozní režimy.
 4. Provedení komplexní diagnostiky s důrazem na (vždy se vyskytující) nesrovnalosti mezi údaji provozních měřicích přístrojů, bilančními výpočty, tepelným výpočtem kotle a CFD modelem.
Měření teplotních polí v několika úrovních spal. komory popř. dalším tahu.
Měření koncentračních polí O_2 , CO a NO_x v několika úrovních spal. komory popř. dalším tahu.
Měření rychlostních polí v několika úrovních spal. komory popř. dalším tahu.
Měření poměrných tepelných toků do stěn spal. komory.
Měření dalších okrajových podmínek (průtoky vzduchu, hmotové toky uhelného prášku jednotlivými hořáky atd.).
Odběr a analýza reprezentativního vzorku paliva.
 5. Odladění a verifikace bilančních, tepelných a CFD modelů.
 6. Případná doplňující a verifikační měření.
 7. Doplnění a odladění tepelně-bilančních a CFD modelů.
 8. Návrh a optimalizace primárních a sekundárních metod snižování emisí NO_x .

Řešené úlohy:

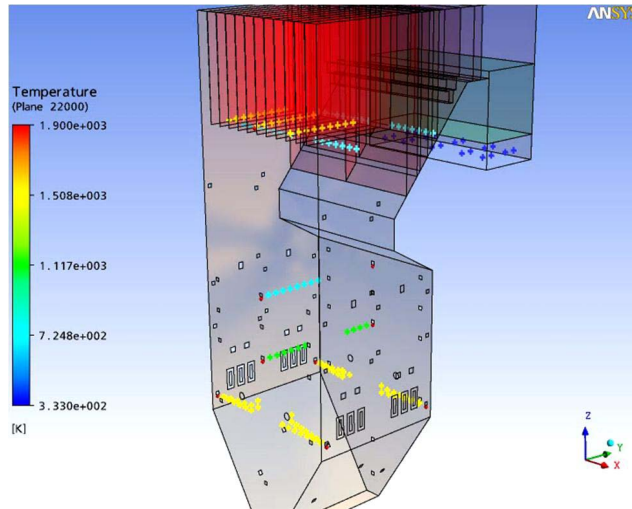
Uvedené metody, nebo alespoň část z nich, byly použity v rámci řešení následujících úloh. Řešení pro svou obsáhlost vždy vyžadují účast odborníků a školeného personálu nejen dvou řešitelských subjektů, tj. KE DEZ VŠB-TU Ostrava a ORGREZ, a.s., Divize ekologie a systému jakosti, ale rovněž i úzkou součinností a spoluprací pracovníků provozovatele posuzovaných kotlů.

1. Sestavení tepelně bilančního a CFD modelu kotle G230 International Power Opatovice.
2. Sestavení CFD modelu kotle PG350 Elektrárny Prunéřov 1. Tepelně bilanční výpočet a zadání okrajových podmínek provedli pracovníci VÍTKOVICE POWER ENGINEERING, a.s. na základě měření KE DEZ VŠB-TU Ostrava.
3. Sestavení tepelně bilančního a CFD modelu kotle, návrh a optimalizace SNCR na kotli T700 teplárny Unipetrolu RPA Litvínov.

Porovnání modelu a díla:

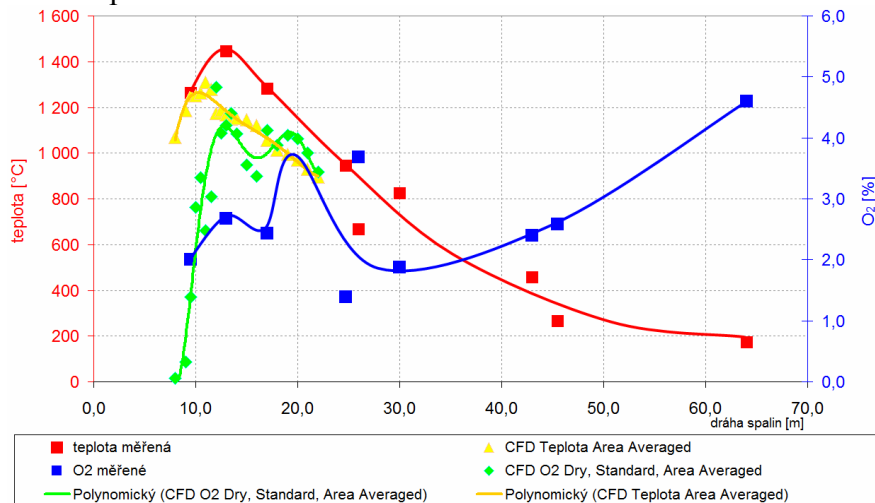
1. G230 International Power Opatovice.

Na kotli byla provedena diagnostika spalovací komory a II. tahu, včetně měření na mlýnských okruzích a vzduchovém traktu, sestaven tepelně bilanční výpočet, tepelný výpočet a CFD model kotle. Na **Obr. č. 1** je zobrazen kotel G230 s měřicími body.

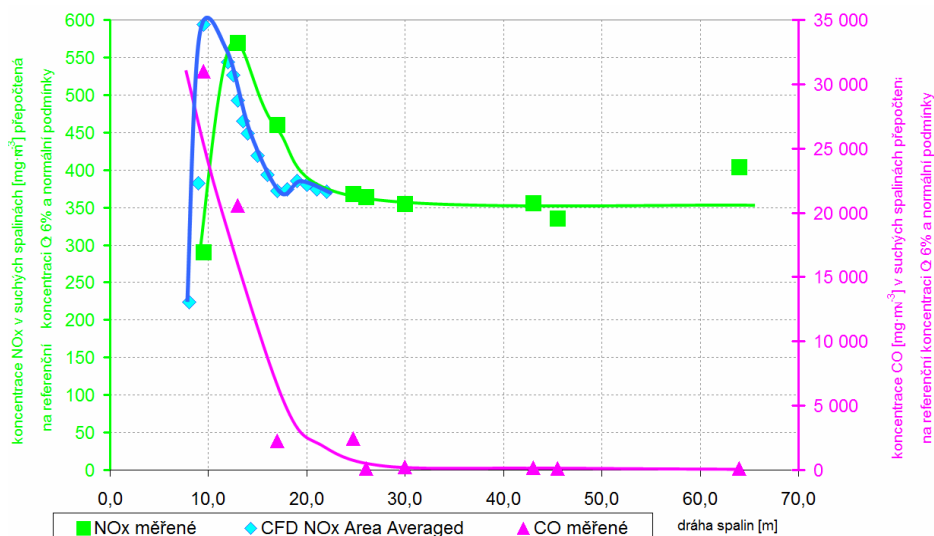


Obr. č. 1 G230 IPO s vyznačenými měřicími body

Porovnání výsledků CFD modelu s naměřenými hodnotami je uvedeno v **Grafech č. 1 a 2**. V grafech jsou uvedeny průměrné hodnoty v jednotlivých výškových úrovních po dráze spalin.



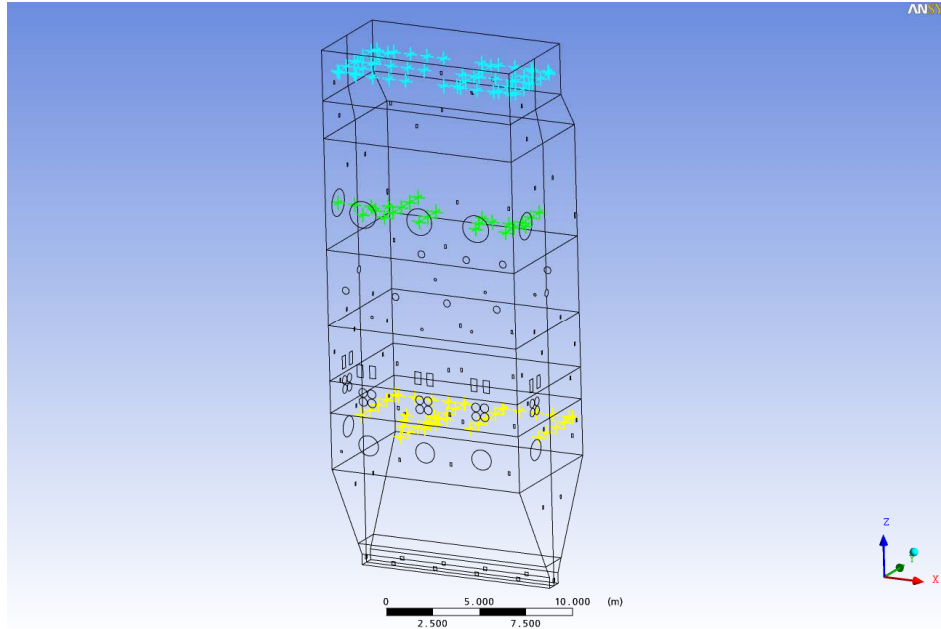
Graf. č. 1 Průběh teploty a koncentrace O₂ po dráze spalin



Graf. č. 2 Průběh koncentrace NO_x po dráze spalin

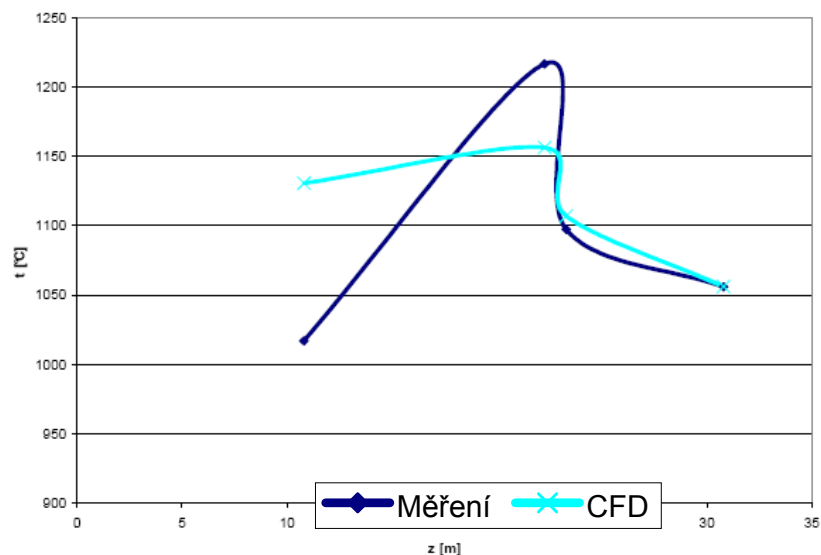
2. PG 350 Elektrárna Pruněřov 1.

Na kotli byla provedena diagnostika včetně komplexní diagnostiky mlýnských okruhů a sestavení materiálových a tepelných bilancí mlýnských okruhů, měření na vzduchovém traktu kotle, sestaven tepelně bilanční výpočet, tepelný výpočet a CFD model kotle. Na **Obr. č. 2** je zobrazen kotel PG350 s měřicími body.

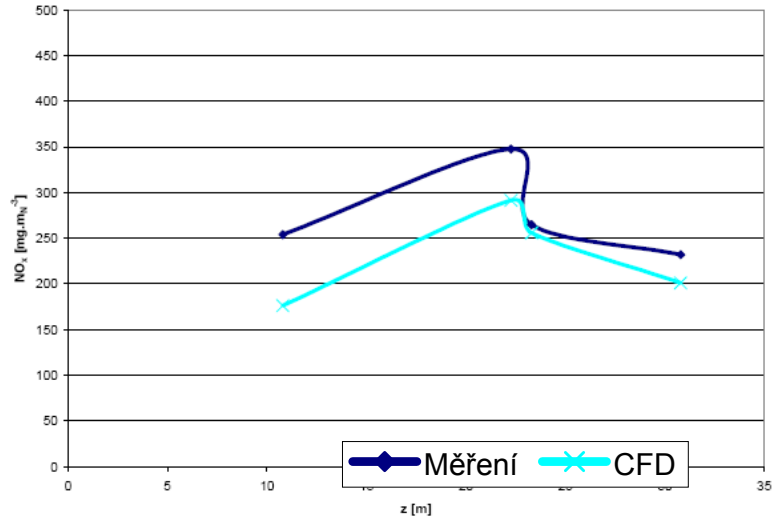


Obr. č. 2 PG350 EPR1 s vyznačenými měřicími body

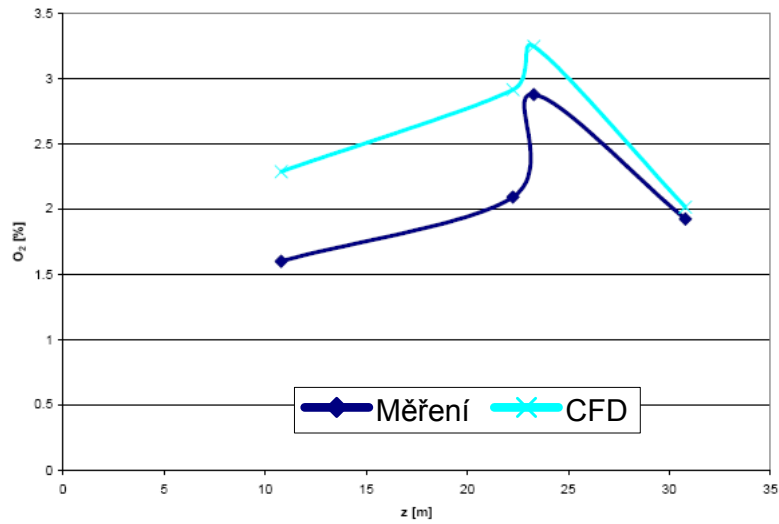
Porovnání výsledků CFD modelu s naměřenými hodnotami je uvedeno v **Grafech č. 3, 4, 5, 6 a 7**. V grafech jsou uvedeny průměrné hodnoty v jednotlivých výškových úrovních po dráze spalín.



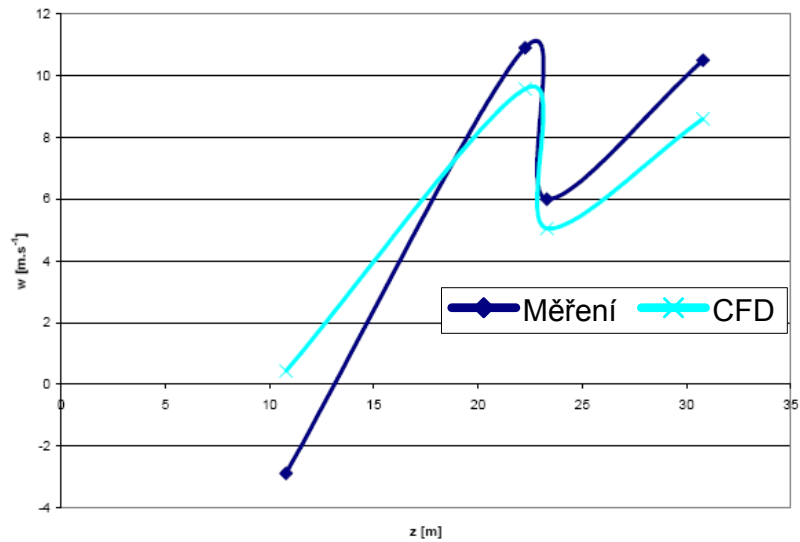
Graf. č. 3 Průběh teploty po dráze spalín



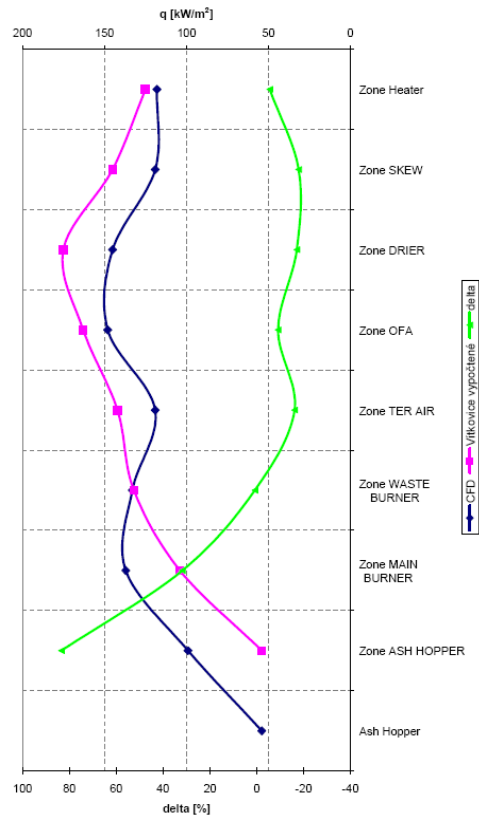
Graf. č. 4 Průběh NO_x po dráze spalín



Graf. č. 5 Průběh O₂ po dráze spalín



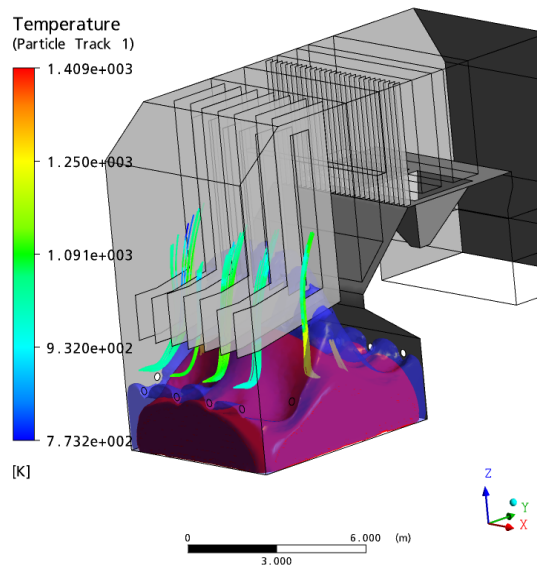
Graf. č. 6 Průběh rychlosti po dráze spalín



Graf. č. 7 Měrný tepelný tok po výšce SK

3. T700 teplárna Unipetrol RPA Litvínov.

Na kotli byla provedena diagnostika, byl sestaven CFD model kotle a optimalizováno umístění trysek SNCR. Na **Obr. č. 3** je zobrazeno teplotní okno a místa aplikace odného roztoku močoviny technologie SNCR.



Obr. č. 3 Teplotní okno a trajektorie vstřikovaných kapiček močoviny

Závěr:

Vzhledem ke stále se zvyšujícímu výpočetnímu výkonu počítačů a stále se vyvíjejícímu teoretickému rámci nabývá CFD modelování a využití moderních softwarových prostředků stále více na významu. Stejně tak se vyvíjejí a zpřesňují i

moderní diagnostické metody. Přesto není samotné použití výpočetních metod, či pouze diagnostiky dostatečné pro posouzení vlivu provozních a konstrukčních změn na emise NO_x a dalších souvisejících parametrů kotlů.

Pouze spojením pokročilých diagnostických metod, aplikací pro tepelně-bilanční výpočty a CFD modelováním lze získat dostatečně mocný nástroj pro návrh a optimalizaci primárních a sekundárních opatření pro snižování emisí NO_x, umožňující predikovat vhodnost regulačních zásahů, rekonstrukcí a úprav s minimálními investičními náklady a riziky. Výsledky tedy mohou přinést nejen minimalizaci škodlivých vlivů na životní prostředí, ale také značné finanční úspory a zvýšení konkurenceschopnosti daných provozů.

Literatura

- [1] Stáňa M.: *Výpočetní a diagnostické metody pro snižování emisí NO_x kotlů velkých výkonů*, Disertační práce, Ostrava: katedra energetiky, Fakulta strojní, VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2007
- [2] Stáňa, M., Čech, B., Matoušek, J., Pumprla, O., Szeliga, Z.: *Snižování emisí NO_x u kotlů G230 Elektrárny Opatovice*, Sborník konference ENERGETIKA A ŽIVOTNÍ PROSTŘEDÍ 2007, VŠB-TU Ostrava, 2007, ISBN 978-80-248-1586-2
- [3] Stáňa, M., Čech, B., Matoušek, J., Szeliga, Z.: *Assembly of Mass Balance of Pulverizing Circuit with Fan Mill*, Sborník vědeckých prací Vysoké Školy Báňské-Technické univerzity Ostrava, VŠB-TU Ostrava, 2007, ISBN 978-80-248-1633-3, ISSN 1210-0471
- [4] Stáňa, M., Čech, B., Matoušek, J., Pumprla, O., Szeliga, Z.: *Tepelná bilance mlýnských okruhů s ventilátorovými mlýny Elektrárny Tušimice*, Sborník konference ENERGETIKA A ŽIVOTNÍ PROSTŘEDÍ 2007, VŠB-TU Ostrava, 2007, ISBN 978-80-248-1586-2
- [5] BLEJCHAŘ, T., PECHÁČEK, J., MALÝ, R., TOMČALA, J. *CFD model SNCR technologie*. In Sborník mezinárodní konference Ochrana ovzduší 2008. Štrbské Pleso Vydavatel: KONGRES management s.r.o., 2008. s 95-98. ISBN 978-80-89275-14-4, EAN 9788089275144
- [6] Blejchař, T., Stáňa, M., Malý, R.: *Matematické modelování spalovacích procesů v kotli PG350*, Studie ORGREZ, a.s., Divize ekologie a systémů jakosti 2008, Zadávatel: VÍTKOVICE POWER ENGINEERING, a.s.

Kontaktní adresa autora (autorů)

<i>Jméno:</i>	Bohumír Čech
<i>Firma:</i>	VŠB-TU Ostrava, KE DEZ
<i>Adresa pro korespondenci:</i>	17. listopadu 15, 708 33 Ostrava-Poruba
<i>E-mail:</i>	bohumir.cech@vsb.cz
<i>Fax:</i>	+420 596 918 308
<i>Telefon:</i>	+420 602 419 096

<i>Jméno:</i>	Rostislav Malý
<i>Firma:</i>	ORGREZ, a.s., Divize ekologie a systémů jakosti
<i>Adresa pro korespondenci:</i>	Počáteční 19, 710 00 Ostrava
<i>E-mail:</i>	rostislav.maly@orgrez.cz
<i>Fax:</i>	+420 596 220 315
<i>Telefon:</i>	+420 724 761 465