

# SZÉNTÜZELÉSŰ KAZÁNOK NO<sub>x</sub>-KIBOCSÁTÁSÁNAK CSÖKKENTÉSE

AZ ERBE ENERGETIKA KFT. NAGY HANGSÚLYT FEKTET A KORSZERŰ SZÁMÍTÓGÉPES SZOFTVEREK ENERGETIKAI CÉLÚ ALKALMAZÁSÁRA, MELY TÉREN EGYÜTTMŰKÖDÉST ALAKÍTOTT KI A BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM ÁRAMLÁSTAN TANSZÉKÉVEL. E CIKKBEN A FLUENT VÉGES-TÉRFOGATOK ELVÉN ALAPULÓ SZOFTVER SIKERES ALKALMAZÁSÁT MUTATJUK BE EGY KONKRÉT ENERGETIKAI FELHASZNÁLÁSON KERESZTÜL.

VARGA LAJOS–DR. KRISTÓF GERGELY

## MOTIVÁCIÓ

A Vértesi Erőmű Rt. a környezetvédelmi törvény levegőtisztasági moratóriumának lejárta (2004. december 31.) előtt megkezdte az Oroszlányi Erőműben lévő kazánok retrofit programjának végrehajtását. A program céljai között szerepel a kazánok NO<sub>x</sub>-kibocsátásának 400 mg/Nm<sup>3</sup> alá csökkentése.

A négy kazán közül először a 2. számú átalakítására került sor, melyre előirányzott módosításokat a nyertes vállalkozó kiemelkedő gyorsasággal hajtott végre. A gyors megvalósítást azonban problémák kísérték: a kazán NO<sub>x</sub>-kibocsátása a szerződéses határérték fölötti volt (mért érték: 500 mg/Nm<sup>3</sup>). Az NO<sub>x</sub>-kibocsátás limit teljesülése érdekében az ERBE ENERGETIKA Kft. – a BME Áramlástan Tanszékének támogatásával – felajánlotta közreműködését a retrofit program eredményes végrehajtásában. A gyors és hatékony mérnöki elemző munka jelentősen hozzájárult ahhoz, hogy a 2. kazán NO<sub>x</sub>-kibocsátása megfelelő biztonsággal az előírt határérték alá csökkent (385 mg/Nm<sup>3</sup>).

## Erőművek nitrogén-oxid-kibocsátása

Szénerőművek szennyezőanyag-kibocsátásánál a szilárd szennyezők és a kén-dioxid mellett a nitrogén-oxidok emisszióját is vizsgálnunk kell. A környezetet károsító hatások miatt

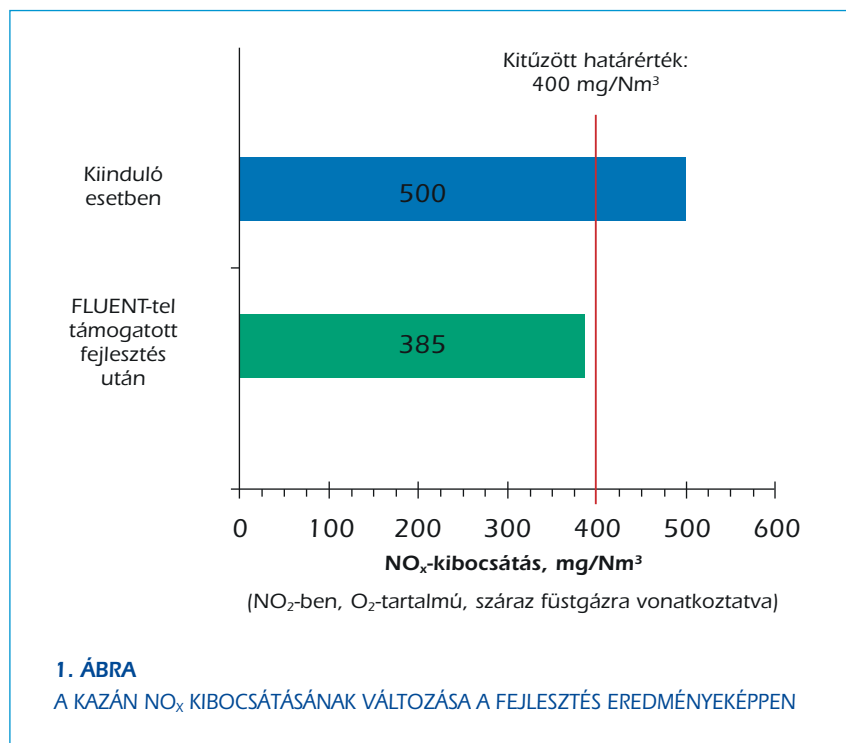
legfontosabbak: az NO, NO<sub>2</sub> és a N<sub>2</sub>O vegyületek. Jelölésükre az „NO<sub>x</sub>” kifejezést használjuk.

A nitrogén-oxidok által okozott legfőbb globális hatás az üvegházhatás erősítése és a Földet védő ózonsztréteg pusztulása. A kibocsátó forrás közelében úgynevezett regionális hatás érvényesül, ami legfőképp a fotokémiai szmog és a földfelszín elsavasodását jelenti. Bár korábban az SO<sub>x</sub>-vegyületek emissziója környezetvédelmi szempontból fontosabb volt, kibocsátásuk csökkentésére tett erő-

tesztések következtében relatív mennyiségük csökkent, ami megnövelte így az NO<sub>x</sub>-emisszió fontosságát. A nitrogén-oxidok hatásának globális és regionális jellege miatt nemzetközi szerződések kötelezik az aláíró országokat a kibocsátás csökkentésére. [4]

## A FEJLESZTÉS CÉLKITŰZÉSE

A bemutatott fejlesztés célja a kazán NO<sub>x</sub>-kibocsátásának 500 mg/Nm<sup>3</sup>-ről 400 mg/Nm<sup>3</sup> alá csökkentése úgy,



hogy közben a kazánhatásfok nem csökken, és a CO-kibocsátás nem növekszik az előírt határérték fölé.

### A cél megközelítése

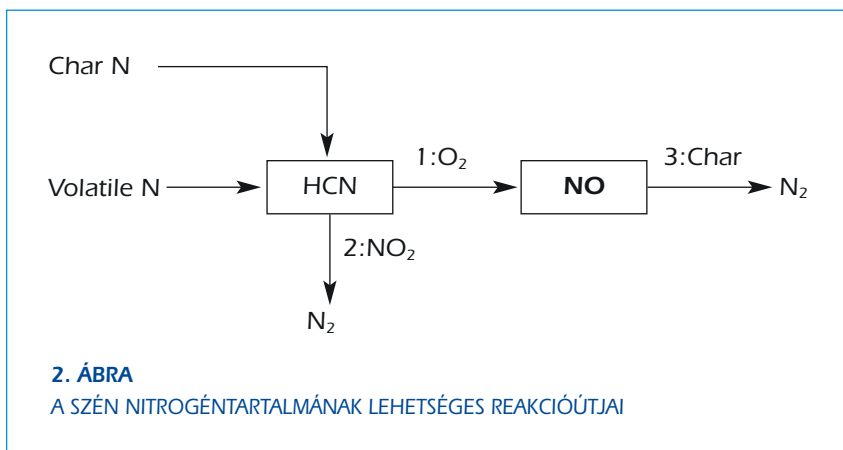
- A feltárjuk a széntüzelés során jellemző NO<sub>x</sub>-keletkezési mechanizmusokat. Megvizsgáljuk az egyes mechanizmusokat befolyásoló paramétereket.
- Kialakítjuk a kazán kiinduló állapotának számítógépes modelljét (Fluent-es referencia eset).
- A modell segítségével meghatározzuk, hogy az adott kazán esetében az egyes NO<sub>x</sub>-keletkezési mechanizmusok milyen súllyal vesznek részt a teljes NO<sub>x</sub>-kibocsátásban.
- Meghatározzuk a domináns NO<sub>x</sub>-et produkáló mechanizmusokat, majd ezek csökkentéséhez vezető eljárásokat.
- Modellezzük a lehetséges NO<sub>x</sub>-csökkentő eljárásokat, és összevetjük egymással, illetve a Fluent-es referencia esettel.
- A modellezés alapján kiválasztjuk azt az eljárást, amely legnagyobb mértékű NO<sub>x</sub>-csökkenést valószínűsít, miközben az egyéb paraméterekre (pl: kazán teljesítményre) a legkisebb negatív hatása van.
- Ténylegesen megvalósítjuk a modellezéssel kiválasztott eljárást, és mérési sorozatokkal ellenőrizzük a számítások helyességét.
- A mérési sorozatokkal meghatározzuk a kazán automatikus szabályzásához szükséges paramétereket a kazán teljes üzemi tartományában. Elvégezzük a szabályzás megfelelő átprogramozását, majd hitelesített mérőrendszerrel ellenőrizzük a kazán szennyező anyag kibocsátását.

### A nitrogén-oxid keletkezésének rövid ismertetése

A tüzelési folyamatok során a következő NO<sub>x</sub>-keletkezési mechanizmusokkal találkozhatunk [1]:

- Termikus NO,
- Prompt NO,
- A tüzelőanyag nitrogéntartalmából keletkező NO.

A ténylegesen kibocsátott NO<sub>x</sub> mennyiségét befolyásoló további effektus: az NO<sub>x</sub> Reburn folyamat.



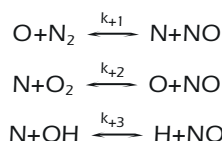
### 2. ÁBRA

#### A SZÉN NITROGÉNTARTALMÁNAK LEHETSÉGES REAKCIÓÚTJAI

A fenti mechanizmusok részesezése a teljes kibocsátott NO<sub>x</sub> mennyiségéből az adott tüzelési körülményektől függ.

### Termikus NO<sub>x</sub>-képződés

A termikus NO-képződés folyamatát 1947 óta ismerjük, melyet a felfedezésében élen járó kutatóról neveztek el. A kiterjesztett *Zeldovich*-mechanizmus a következő:



A fenti három egyenlet mindkét irányban lejátszódhat. A mechanizmus reakciósebességei ( $k_1, k_{-1}; k_2, k_{-2}; k_3, k_{-3}$ ) a hőmérséklettől különböző mértékben függenek, értéküket mérésből ismerjük.

Miután a három vegyérték kötésű nitrogén molekula bontásához nagy energia szükséges, az NO<sub>x</sub> keletkezésének sebessége csak magas hőmérsékleten [ $\sim 1800 \text{ K}$  ( $\sim 1527 \text{ °C}$ ) felett] jelentős. Amikor van elegendő oxigén a reakcióterben, akkor a szabad nitrogénatom (N) keletkezési és fogyási sebessége egyenlővé válik, így kvázi állandósult állapot feltételezhető. Ez a feltételezés helytálló a legtöbb tüzelési esetben. Így az NO keletkezési sebességét az alábbi formába írhatjuk:

$$\frac{d[\text{NO}]}{dt} = 2k_1[\text{O}][\text{N}_2] \frac{\left(1 - \frac{k_{-1}k_{-2}[\text{NO}]^2}{k_1[\text{N}_2]k_2[\text{O}_2]}\right)}{\left(1 + \frac{k_{-1}[\text{NO}]}{k_2[\text{O}_2] + k_3[\text{OH}]}\right)}$$

Ebből a formából láthatjuk, hogy az NO keletkezési sebessége növekszik az oxigén atom koncentrációjának növekedésével. Továbbá azt is megállapíthatjuk, hogy az NO keletkezési sebessége erősen hőmérséklet függő.

A kibocsátott termikus NO<sub>x</sub> mennyiségének csökkentését a tüztér hőmérsékletének csökkentésével, illetve az O<sub>2</sub>-koncentrációjának csökkentésével érhetjük el. Ezeket a beavatkozásokat a gyakorlatban megosztott levegő bevezetés, illetve füstgáz recirkuláció alkalmazásával valósíthatjuk meg.

### Prompt NO-képződés

Prompt NO keletkezhet bizonyos tüzelési körülmények között (alacsony hőmérsékletű, tüzelőanyagban gazdag régiókban, ahol a tartózkodási idő rövid). A prompt NO részesezése a teljes NO<sub>x</sub>-kibocsátásból azonban az esetek többségében csekély, ezért a képződési mechanizmus bemutatását mellőzzük.

### A tüzelőanyag nitrogéntartalmából keletkező NO

A szénben található nitrogén tartalmú szerves összetevők hozzájárulnak a tüzelési folyamatban keletkező teljes NO<sub>x</sub> mennyiségéhez. A szénben található nitrogén tartalom NO<sub>x</sub>-é történő átalakulása a helyi tüzelési körülményektől és a nitrogéntartalmú összetevők koncentrációjától függ. A szén nitrogén tartalmú vegyületei két úton jutnak a reakció zónába: egy részük a szénszemcse felmelegedése során az illótartalomban jelenik meg, másik része a szénszemcseben marad és a fix karbon heterogén kiégése során lép reakcióba. A nitrogén tartalmú vegyületek hő-

bojlása során gyökök (HCN, N, CN, NH) keletkezhetnek, melyek NO<sub>x</sub>-é konvertálódhatnak. Ezek a szabad gyökök két, egymással versenyző reakcióutat járhatnak be. Bár a valós mechanizmus még nem teljesen ismert, a különböző kutatók egyetértenek a következő egyszerűsített modellel (2. ábra).

Ebben a modellben az illóban és a szén szemcsében lévő nitrogéntartalom hidrogén-cianidra alakul, amely oxidáló környezetben NO, redukáló környezetben N<sub>2</sub> produkciójához vezet. Az oxidáló környezetben keletkezett NO a szén szemcse felületén heterogén reakcióval N<sub>2</sub>-vé redukálódhat. Az 1. reakció növeli, a 2. és 3. reakciók csökkentik a keletkezett NO mennyiségét. A szén nitrogéntartalmából ténylegesen keletkezett NO mennyiségét a három reakció sebessége határozza meg. A fenti modell szerinti három reakció sebessége rendre:

$$R_1 = A_1 X_{\text{HCN}} X_{\text{O}_2}^2 e^{-E_1/RT}$$

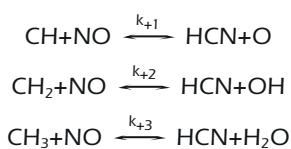
$$R_2 = A_2 X_{\text{HCN}} X_{\text{NO}} e^{-E_2/RT}$$

$$R_3 = A_3 e^{-E_3/RT} \bar{p}_{\text{NO}}$$

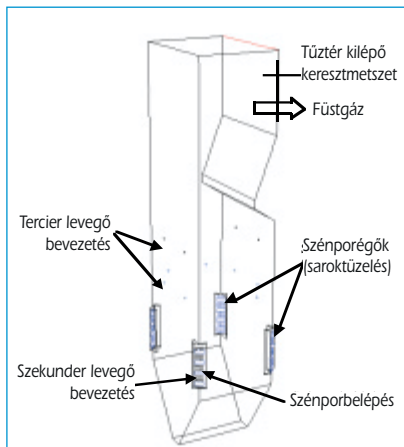
A szén nitrogéntartalmából keletkezett NO-mennyiséget csökkenthetjük, ha az 1. reakciót lassítjuk, a 2. és 3. reakciót gyorsítjuk. Az 1. reakciót úgy lassíthatjuk, ha az oxigén mólarányt csökkentjük, amit a tüztér légfeszültségének csökkentésével érhetünk el.

### NO<sub>x</sub> reburn folyamat

Az előzőekben megvizsgáltuk milyen módokon keletkezhet NO<sub>x</sub> a tüzelés során. A ténylegesen kibocsátott NO<sub>x</sub> mennyiségét még egy folyamat befolyásolja, ez az ún. NO<sub>x</sub> reburn folyamat. Ebben a folyamatban a reakcióterben jelenlévő (termikus, prompt, vagy tüzelőanyag nitrogéntartalmából keletkezett) NO reagál a tüzelőanyag szénhidrogén gyökeivel:



A reakció sebességi konstansok méréséből szintén ismertek. A reak-



3. ÁBRA  
A VIZSGÁLT GEOMETRIA

ciók hatására bekövetkező NO-csökkenés sebessége:

$$\frac{d[\text{NO}]}{dt} = -k_1[\text{CH}][\text{NO}] - k_2[\text{CH}_2][\text{NO}] - k_3[\text{CH}_3][\text{NO}]$$

A NO<sub>x</sub> reburn folyamat által redukált NO mennyiségét tüzelőanyagban gazdag régió kialakításával növelhetjük.

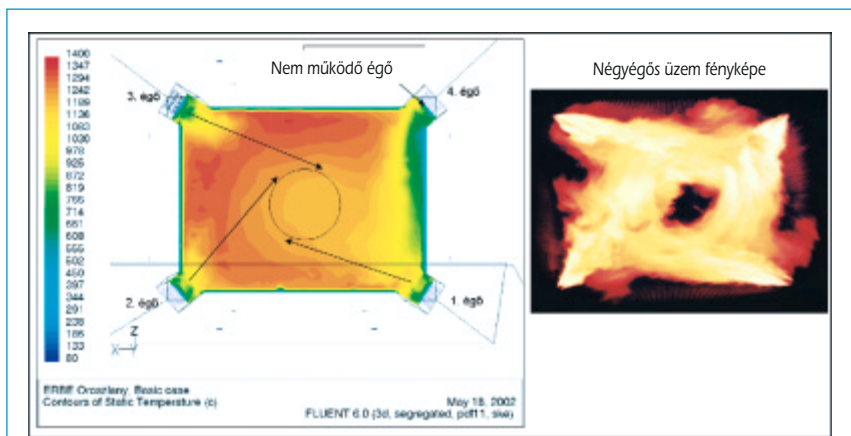
vábbá a levegő, a tüzelőanyag és a füstgáz turbulens áramlási viszonyait leírni. E tulajdonságai alkalmassá teszik kazánok komplex tüztér modellezésére, turbulens szénhidrogén lángok hő- és áramlástan leírására.

A FLUENT programban a vizsgálandó térfogatot (jelen esetben a kazán első huzamát) kis térfogatokra (cellákra) bontjuk, ezekre egyenleteket írunk fel, majd a peremfeltételek figyelembevételével iteratív módon megoldjuk az így kapott egyenletrendszert.

A FLUENT képes a bemutatott valamennyi NO<sub>x</sub>-képződési mechanizmus számítására, így segítségével előre jelezhetjük különböző változtatási alternatívák megvalósításának előnyeit és hátrányait.

A jelen esetben vizsgált modellezési tartomány a kazán első huzamának mennyezetéig tart (lásd 3. ábra).

A valóságnak megfelelően a modellezéssel a háromégős üzemet vizsgáltunk, mivel a negyedik égő a malom járókerekének cseréje miatt mindig karbantartáson van. A modellezéssel kapott eredményeket a következő ábrák szemléltetik. A kazán égő-



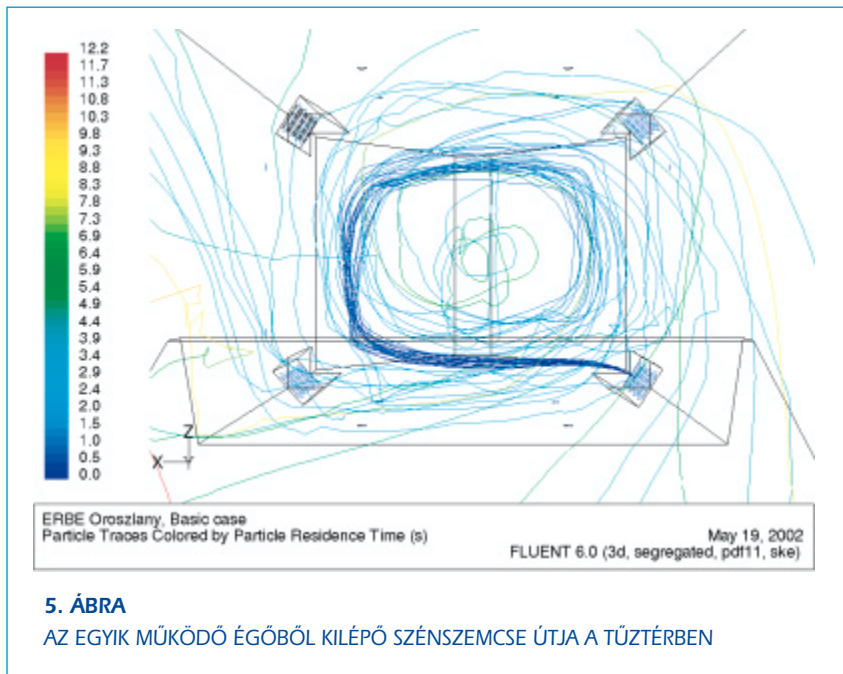
4. ÁBRA  
MODELLEZETT HŐMÉRSÉKLET-ELOSZLÁS HÁROMÉGŐS ÜZEMEN A KAZÁN ÉGŐ-SÍKJÁBAN, A NÉGYÉGŐS ÜZEM FÉNYKÉPEL VALÓ ÖSSZEHASONLÍTÁSBAN

### FLUENT-es modellezés

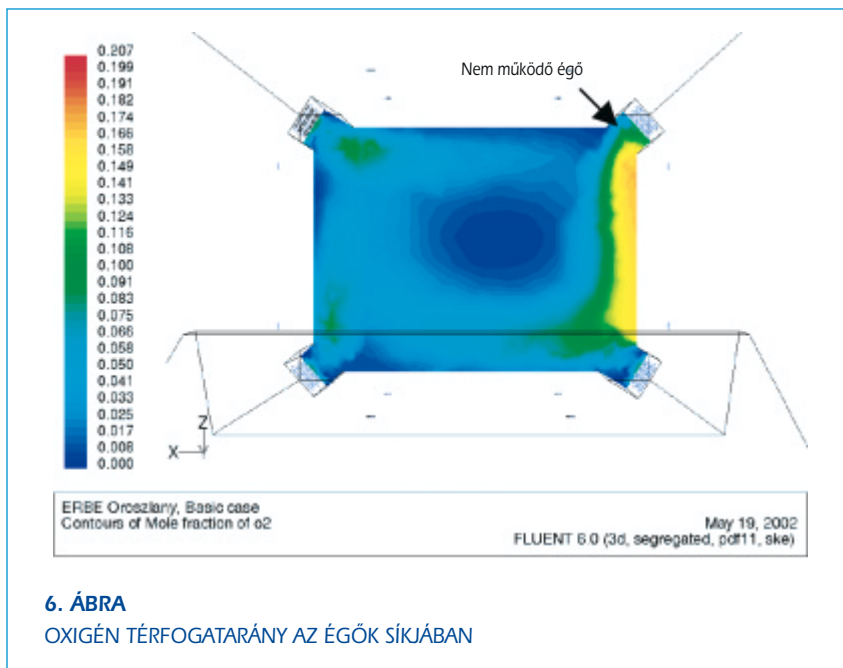
A FLUENT egy véges-térfogatok elvén alapuló számítógépes szoftver, amely képes numerikusan közelíteni valamely szénhidrogén égése során kialakuló oxidációs folyamatot, számítja a keletkezett reakciótermékek mennyiségét, a keletkezett hőt, valamint annak további útját (hőszugárzás, konvekció, hővezetés). Képes to-

síkban kapott hőmérséklet eloszlást a 4. ábra mutatja, amely a háromégős üzemnek megfelelő aszimmetriát tükröz.

Az ábrán nyílakkal jelöltük a működő égők befúvási tengelyét, és azt a képzeletbeli kört, amelyet ezek a tengelyek érintenek. A lángstruktúra felülnézetben az óramutató járásának megfelelő irányban forog. A négyégős üzem fényképével való össze-



**5. ÁBRA**  
AZ EGYIK MŰKÖDŐ ÉGŐBŐL KILÉPŐ SZÉNSZEMCSÉ ÚTJA A TÜZTÉRBE



**6. ÁBRA**  
OXIGÉN TÉRFOGATARÁNY AZ ÉGŐK SÍKJÁBAN

**1. TÁBLÁZAT**

A FLUENT-TEL VÉGZETT MODELLEZÉS EREDMÉNYEI

Eljárás:	Fajlagos NO <sub>x</sub> -kibocsátás-csökkenés a kiindulási esethez képest	Fajlagos membránfali hőáram-csökkenés a kiindulási esethez képest
Levegőmegosztás	-40%	-5%
Füstgázrecirkuláció	-10%	-19%

hasonlításban a modellezett hőmérséklet eloszláson jól látható a 4. égő lángjának hiánya.

A szén szemcsék követik a levegő-füstgáz keverék örvénylő

áramképét és egy spirális pályát írnak le.

Az 5. ábra ábrán látható görbék az áttekinthetőség kedvéért csak az egyik kiválasztott égőből kilépő szén-

szemcsék útját szemléltetik a kazán tüztérében. A görbe színezése a szemcsé belépése óta eltelt időt (tartózkodási idő) mutatja másodperc dimenzióban.

A nem működő égő lángja helyén egy nagy oxigén- és nitrogéntartalmú, hideg zóna alakul ki. Az ezzel a zónával szomszédos lángok pótlólagos levegőhöz jutnak (lásd 6. ábra), így az oxigénkoncentráció itt lényegesen magasabb, mint négyégős esetben lenne, aminek hatása lesz a keletkezett NO<sub>x</sub> mennyiségére.

A magas NO-tartalmú részek a lángmaghoz kapcsolódnak (7. ábra).

A kazán által kibocsátott NO mennyiségét a füstgáz kilépési keresztmetszetben számított NO-kibocsátás integrálásával kapjuk.

A megvizsgált NO<sub>x</sub>-keletkezési mechanizmusok, és FLUENT által kínált modellezési lehetőségek alapján elmondható, hogy az adott kazán esetében a szén nitrogéntartalmából képződő NO, illetve a termikus NO szerepe a meghatározó.

**Módosítási javaslatok**

Az NO<sub>x</sub>-csökkentés elérése érdekében két módosítási megoldást vizsgáltunk [2]:

- megosztott levegőbevezetést (megváltoztatta a szekunder/tercier levegő arányát),
- füstgáz-recirkulációt.

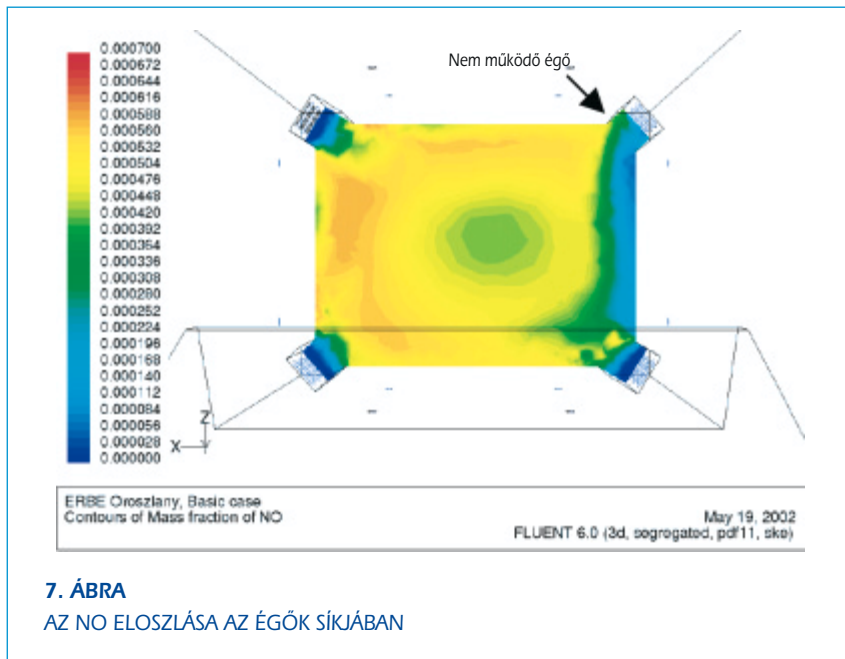
**NO<sub>x</sub>-csökkentő eljárás választása a modellezés alapján**

A modellezés eredményeit az 1. táblázat foglalja össze.

A modellezés alapján elmondható, hogy a kiinduló esethez képest mindkét vizsgált módosítási alternatíva csökkenti a kibocsátott NO<sub>x</sub> mennyiségét. Ugyancsak mindkét esetben számíthatunk a tüztérben lesugárzott hőmennyiség csökkenésére is, ami a kazán teljesítményére lehet hatással.

A számítások alapján két módosítási alternatíva közül – az adott körülmények között – a levegő megosztás eredményez nagyobb mértékű NO<sub>x</sub>-kibocsátás csökkenést, és ráadásul ennek a megoldásnak kisebb a hatása a kazán teljesítményére is.

Ennek megfelelően az Oroszlányi 2. számú kazán esetében – az ott alkalmazott tüzelőanyag, és működési



**7. ÁBRA**  
AZ NO ELOSZLÁSA AZ ÉGŐK SÍKJÁBAN

## 2. TÁBLÁZAT

A HITELESÍTETT MÉRŐRENDSZERREL TÖRTÉNT NO<sub>x</sub> ÉS CO-MÉRÉS ÉRTÉKEI, mg/Nm<sup>3</sup>

	Névleges terhelésen	Rész-terhelésen	Rendeleti határérték
<b>NO<sub>x</sub></b>	<b>384,8</b>	<b>332,8</b>	<b>650</b>
CO	112,2	185,3	250

paraméterek mellett – várhatóan a levegő megosztás megvalósítása eredményez nagyobb előrelépést a cél megvalósítása érdekében, így a levegő megosztás alkalmazását javasoltuk.

A megfelelő levegőmegosztás NO<sub>x</sub>-kibocsátásra gyakorolt hatását mérési sorozattal igazoltuk. A mérések alapján egy terhelésfüggő beállítás lista került felvételre, amely a kazán automatikus szabályozójának átprogramozását tette lehetővé. A Vállalkozó szakemberei elvégezték a szükséges irányítástechnikai módosításokat, így a kazán alacsony NO<sub>x</sub>-kibocsátású üzemre való átalakítása gyakorlatilag befejeződött. A kazán készen állt a hivatalos mérési rendszerrel történő mérésre.

### Hitelesített mérés

A kazán hitelesített mérőrendszerrel történő ellenőrzésére 2002. június 12-én került sor. A mérést a Villamosipari Kereskedelmi és Szolgáltató Kft. (Villkesz Kft.) Mozgó Vizsgáló Laboratóriuma végezte. A mérés tanúsága szerint a kazán NO<sub>x</sub>, illetve CO-

kibocsátása megfelel a 22/1998 (VI. 26.) KTM rendeletben előírtaknak. Az NO<sub>x</sub>-kibocsátás ezen túlmenően alacsonyabb, mint a fejlesztési célként kitűzött 400 mg/Nm<sup>3</sup>.

Fenti táblázatban szereplő mérési értékek száraz, 6% O<sub>2</sub>-tartalmú, normál állapotú füstgázra vonatkoznak, és tartalmaznak minden szükséges korrekciót, ennek megfelelően közvetlenül összevethetőek a 22/1998 (VI. 26.) KTM rendeletben előírt határértékekkel.

A hitelesített méréssel egy időben hatásfokmérést is végeztünk a kazánon, melynek eredménye azt mutatja, hogy nem csökkent a kazánhatásfok.

## ÖSSZEFOGLALÁS

A FLUENT általános célú véges térfogat alapú szoftver rendszer alkalmazásával sikeresen valósítottuk meg a fejlesztés során kitűzött célt, amely az adott széntüzelésű kazán NO<sub>x</sub>-kibocsátásának (a kiinduló esetben mért 500 mg/Nm<sup>3</sup>-ről) 400 mg/Nm<sup>3</sup> alá történő csökkentése volt (hitelesít-

tett mérés alapján 385 mg/Nm<sup>3</sup>). A módosítás hatására a kazán hatásfoka nem csökkent, illetve a CO-kibocsátás is az előírt határérték alatt maradt.

A választott megoldás egy speciális arányban megosztott levegőbevezetés volt, mely az adott kazán esetében nem igényelte a kazán fizikai átalakítását, sőt még annak leállítását sem; csupán a működési paraméterek megfelelő összehangolására volt szükség a felvett beállítási listának megfelelően. Így pótlólagos beruházási költség nem merült fel. (Megjegyezzük, hogy a kazán egyetlen hétvégére történő leállása körülbelül 50 Mft bevétel kiesést eredményezett volna az üzemeltetőnek.)

## IRODALOM

- [1] FLUENT 6 User's Guide, 2001 December
- [2] J.M. Beér, V. Homola: Innovative initiatives to upgrade power plants, IEA-USDOE-USAID International Conference in Clean Coal Utilization, Budapest, 1992. febr. 24–28.
- [3] *Mérési Jelentés VÉ Rt. Oroszlányi Erőmű 2. sz. Kazán Garanciális Méréséről*, 2002.febr. 22.
- [4] *Katona Zoltán: Nitrogén-oxidok kibocsátásának csökkentése erőművekben*, 1997

## HÍREK

### TATABÁNYÁN GÁZMOTOR ADJA MAJD A HŐT

Az MVM Rt. többségi tulajdonával létrehozandó Tatabánya Erőmű Kft. keretében kerül sor Tatabánya kommunális hőigényeinek ellátását szolgáló Tatabányai Fűtőerőmű technológiai megújítására. A projekt részeként egy 16-20 MW teljesítőképességű gázmotoros erőmű egység létesül, amelyre az MVM Rt. pályázatot írt ki.

A pályázatra benyújtott ajánlatokat október 17-én bontották. Négyen nyújtottak be pályázatot, a Vegyész Rt., az EGL Rt., a KIPCALOR Energetikai Kft. és a Kraft-szer Kft. A pályázatok részletes értékelésének tervezett befejezése október vége. *(Vajnai Attila)*