

KONVERTERES ACÉLGYÁRTÁSNÁL ALKALMAZOTT ELSZÍVŐRENDSZER-MODELL VIZSGÁLATA

/ A NYERSVAS BEÖNTÉSÉNÉL KELETKEZŐ MÁSODLAGOS KIPORZÁS
CSÖKKENTÉSÉRE ALKALMAZOTT ELSZÍVŐRENDSZER HATÁSOSSÁGÁNAK
MODELL-VIZSGÁLATA/

MÉRÉSI SEGÉDLET

1. A mérés célja

Konverteres acélgyártás során a másodlagos kiporzást csökkentő füstgáz elszívőrendszert alkalmaznak. A mérés célja az Áramlástan Tanszék laboratóriumában felállított M=1:20 modell elszívőrendszer hatásosságának vizsgálata bizonyos változtatható paraméterek függvényében.

A modell berendezés hallgatói méréshez való felhasználásához a DUNAFERR Acélművek Kft. hozzájárult.

!Figyelem! A mérés során fokozottan figyelni kell a forró levegővel működő modell berendezés érintésénél, szerelésénél, mivel a berendezés részei a felhevülnek, az alkatrészek (csavarok, csőidomok, és egyéb elemek) forróak!

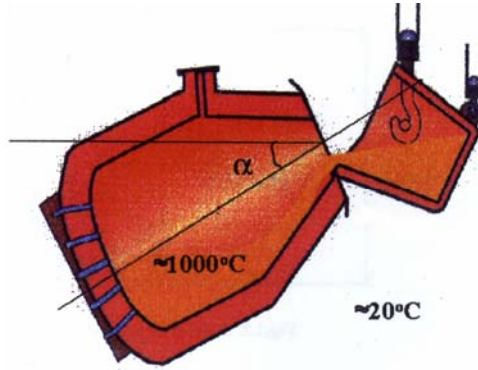
2. Bevezetés

A konverteres acélgyártás során, a ciklus elején, az acélhulladék beöntése után izzó nyersvasat öntenek a kibillentett konverterbe. A csőrös üsttel történő nyersvas beöntése közben intenzív kilángolás tapasztalható (szekunder kiporzás), amely főként az acélhulladékon lévő szennyeződésre vezethető vissza. A kiáramlást segíti a konverterbe ömlő nyersvas által leadott hő is. Ezt követi az oxigénfúvatás, amely közben a konverter függőlegesen áll, és a keletkező szennyeződések (primer kiporzás) a konverter fölött lévő kazán belépőnyílásán keresztül távoznak. A fúvatás befejeztével próba-csapolást, majd a nyersvas beöntés oldalán csapolást végeznek. Eközben is kilángolás, füstképződés tapasztalható, amelynek intenzitása azonban lényegesen elmarad a nyersvas beöntésnél tapasztalttól.

A jelenleg tervezés alatt álló elszívőrendszer jelentősen csökkenti a nyersvas beöntésnél keletkező szekunder kiporzás miatt a csarnok légtérébe és onnan a szabadba jutó szennyeződést. Az elvégzendő feladat: ezen elszívőrendszer-modell hatásosságának vizsgálata.

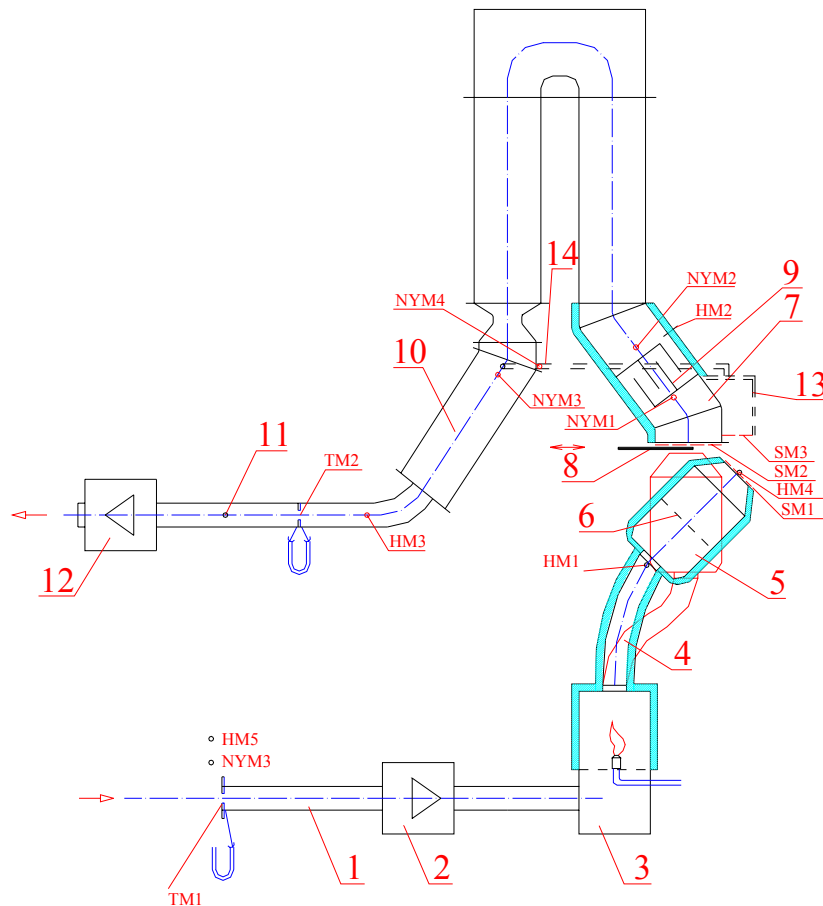
3. A mérőberendezés ismertetése

Miután az elszívás hatékonysága szempontjából igen fontos a konverterből kilépő gázsugár alakja, ezért a modellkísérleteknél alapvető fontosságú az áramlás hasonlóságát biztosító modelltörvények betartása. Ez jelen esetben a Froude-szám $/Fr/$ ill. a valós és a modell berendezés geometriai hasonlóságának biztosítását jelenti.



1.ábra Nyersvas beöntés konverteres acélgyártásnál

Jelen esetben a forró gáz szabadsugár meleg levegővel történő modellezését alkalmazzuk. Emellett a szakirodalomban két másik módszert is bemutat a konverterből kilépő meleg gázsugár modellezésére: hélium-levegő keverékkel és vízben, sótartalmú vízzel modellezve a gázsugarat (a vízszög sűrűsége nagyobb a környezeténél, így ebben az esetben lefelé görbül a sugár).



2.ábra Modell berendezés vázlatja

A mérőberendezés modellje a mellékelt ábrán látható. A modell két fő részre bontható:

a., *konverter oldali modell-rész*: ez a befűvató egység, mely áll a beszívó mérőperemmel ellátott oldalszatórnás fűvóból, amely a két Bunsen-égővel ellátott hevítőkamrába szállítja a beszívott környezeti hőmérsékletű levegőt, mely így felmelegedve jut a konverterbe. Az intenzív forró levegő kiáramoltatásával -az érvényes modellörvények betartásával- modellezzük a konverterből történő intenzív kilángolást.

b. *elszívás oldali modell-rész*: az un. primer és a szekunder elszívóegységből áll. A primer rész a technológiai folyamat ezen időszaka alatt a konverter felől fojtott állapotban van vagy teljesen le van zárva (a mérőberendezésen a zárt állapot egy teljesen betölt fémlappal modellezett), mely segíti a szekunder elszívást. A szekunder elszívás fő eleme az elszívóernyő, mely geometriai paraméterei (szélesség) változtathatók. Az elszívóernyő a primer elszívás vezetékébe csatlakozik, majd az elszívott forró levegő a kazánt modellező egység után egy térfogatáram mérő szakaszon (átfolyó mérőperemen) át egy fokozatmentesen szabályozható radiális ventilátoron keresztül jut a szabadba.

A berendezés fő egységei hőszigeteléssel vannak ellátva, hogy a falon történő hőátadást minimalizáljuk. A mérőberendezésen a bevitt és elszívott hőteljesítmények meghatározására hőmérőszondák vannak elhelyezve, a mért hőmérsékletek számítógépes mérőprogram segítségével rögzíthetőek. A külső környezeti levegő hőmérséklete egy digitális hőmérővel mérhető.

A térfogatáramok meghatározására alkalmazott beszívó mérőperem és az elszívás-oldali átfolyó mérőperem nyomáskivezetései egy digitális nyomásmérő-egységhez csatlakoztathatóak, majd szintén a számítógépes mérőprogram segítségével rögzíthetőek.

A meleg levegő konverterből való kiáramlásának szemléltetésére egy nagyteljesítményű spotlámpát használunk, mellyel az áramlást átvilágítva (kihasználva azt az optikai tulajdonságot, hogy a különböző hőmérsékletű levegőrétegeknek különböző a törésmutatója) az elszívóernyő körüli áramlási tér könnyen láthatóvá tehető, szemrevételezhető és kvalitatívan jellemezhető.

A modell berendezés leírása

A mérőberendezés 1:20 modell-léptékű kivitelének vázlatát az **1. ábra** mutatja. A konverter modellből kifűjt levegőt a **2** jelű fokozatmentesen változtatható fordulatszámú (légszállítású) oldalszatórnás fűvó szívja be a térfogatáram mérésére szolgáló mérőperemmel (**TM1** mérési hely) ellátott **1** jelű mérőcsövön keresztül. A levegő fűvóból egy flexibilis csövön keresztül jut el a **3** jelű léghevítőbe, amelyben két Bunsen égővel PB gázt elégetve 420-550 °C hőmérsékletre melegítjük fel a levegőt. A léghevítőből a meleg levegő a **4** jelű flexibilis csövön keresztül jut az **5** jelű dönthető konverter modell beömlőnyílásához, amelynek tengelyében hőmérsékletet mértünk (**HM1**). A konverter modell belsejében lévő **6** jelű perforált lemez egyenletesíti az áramlást. A konverter modell kilépő keresztmetszetének középpontjában mérhetjük a hőmérsékletet (**HM4**) és a sebességmegoszlást (**SM1**).

Az elszívó rendszer **7** jelű kazán modelljének beömlőnyílását a **8** jelű lemezzel el lehet zárni. A kazán modell nyitott állapotában a belépő-keresztmetszetben sebességmegoszlásokat is mérhetjük (**SM2**). A kazán alsó részében egy hőmérséklet-egyenletesítő „labirintus” (**9**) helyeztünk el, amelynek kilépésénél mérjük az elszívott levegő hőmérsékletét (**HM2**). A „labirintus” előtt és után meghatározható a helyi statikus nyomás és a külső nyomás különbsége (**NYM1, NYM2**). A kazán felszálló és leszálló ágát követően a levegő a **10** jelű kör keresztmetszetű csőbe jut, amelyben ugyancsak a helyi statikus nyomás és a külső nyomás különbsége mérhető (**NYM3**). A léghevítőtől a **HM2** hőmérsékletmérési helyig a vezetékek, a konverter falát kb. 200 mm vastag üvegyapot hőszigeteléssel láttuk el. Ezt követi a **11** jelű mérőcső, amelynek elején mérjük a levegő hőmérsékletét (**HM3**), majd mérőperemmel a térfogatáramát (**TM2**). A levegő egy fokozatmentesen változtatható fordulatszámú ventilátoron (**12**) keresztül hagyja el a mérőberendezést. Mértük továbbá a külső levegő hőmérsékletét (**HM5**) és nyomását (**NYM3**).

A modellezés szempontjából fontos a falakon keresztül történő hőátadás lehetőség szerinti csökkentése, amit 20mm vastag üvegyapot hőszigeteléssel oldunk meg (a modell vázlatán megvastagított, satírozott falakkal jelöltük a szigetelést).

Modelltörvények

A modellkísérleteknél a hasonlóság a Reynolds-szám és a Froude-szám azonossága, valamint a peremfeltételek hasonlósága esetén biztosított.

A tehetetlenségi- és súrlódó erők hányadosát kifejező Reynolds-szám a

$$Re = \frac{v D}{\nu} \quad (1)$$

alakban írható fel, ahol v [m/s] jellemző sebesség (esetünkben a gáz sebessége a konverter nyitott keresztmetszetében) a D [m] jellemző méret (esetünkben a konverter nyílásának átmérője: D) és ν [m²/s] a füstgáz kinematikai viszkozitása. Ha a modellben biztosítjuk, hogy a szabadsugárban az áramlás a nagy kivitelhez hasonlóan turbulens legyen, a modell és a nagy kivitel áramlásának hasonlósága a tapasztalatok szerint csak kis mértékben függ a Reynolds-szám értékétől. Ebből következően a Reynolds-szám azonos értéken tartása nem feltétele a modellkísérletek eredményei alkalmazhatóságának.

Forró füstgáz szabadsugár esetén a gáz mozgását nyugalomban levő környezeti levegő esetében részben a *tehetetlenségi erő*, részben pedig a *hidrosztatikai felhajtóerő* befolyásolja. Ha a tehetetlenségi erő dominál (a füstgáz nagy sebességgel áramlik ki a konverter nyílásán), akkor a gázsugár csak kis görbülettel hajlik el felfelé. Ha a nehézségi erőter hatása, a hidrosztatikai felhajtóerő dominál, akkor a gázsugár a konverterből való kilépés után kis távolságon belül függőlegesbe fordul. A tehetetlenségi erők és a hidrosztatikai eredetű felhajtóerő hányadosát kifejező Froude-szám az alábbi megfontolással határozható meg. Ha a füstgáz v jellemző sebességgel áramlik, a tehetetlenségi erővel arányos mennyiség a v^2/D gyorsulás dimenziójú mennyiség és a $\rho_g D^3$ tömeg szorzataként állítható elő: $\rho_g D^2 v^2$, ahol ρ_g a meleg füstgáz sűrűsége. A hidrosztatikai felhajtóerővel arányos mennyiség a térfogat D^3 , a környezeti hideg levegő és a füstgáz sűrűségének különbsége: $\rho_h - \rho_g$ és a Föld nehézségi erőterének térerőssége: $g=9.81\text{N/kg}$ szorzatából adódik: $D^3(\rho_h - \rho_g)g$. Képezve a hányadost, a Froude-szám négyzetét kapjuk:

$$Fr^2 = \frac{\rho_g v^2}{D(\rho_h - \rho_g)g} \quad (2)$$

A ρ_g sűrűséggel elosztva a számlálót és a nevezőt, és figyelembe véve, hogy a gáztörvény

$$\rho = \frac{p}{R T} \quad (3)$$

értelmében azonos R gázállandójú és p nyomású gáz esetén a sűrűségek hányadosa fordítottan arányos a hőmérsékletekkel írható

$$Fr^2 = \frac{v^2}{D \left(\frac{\rho_h}{\rho_g} - 1 \right) g} = \frac{v^2}{D \left(\frac{T_g}{T_h} - 1 \right) g} = \frac{T_h v^2}{D (T_g - T_h) g} = \frac{T_h v^2}{D \Delta T g} \quad (4)$$

A (3) és (4) összefüggésben p [Pa] a nyomás, T [K] a hőmérséklet, R [J/kg/K] a gázállandó, a "g" és "h" index rendre a meleg gázra és a hideg levegőre vonatkozó mennyiséget jelöl.

A Froude-szám értéke és a környezeténél kisebb sűrűségű közeg áramlásakor keletkező szabadsugar alakja közötti kapcsolatot jellemzi, hogy a Froude-szám csökkenésével egyre nagyobb hatása van a felhajtóerőnek, a sugár egyre gyorsabban fordul függőlegesbe.

A modellkísérletnél az áramlás abban az esetben hasonló a nagy kiviteléhez, ha a nagy kivitelre és a modellre vonatkozó Froude-szám megegyezik:

$$Fr_M = Fr, \quad (5)$$

azaz (4) kifejezés (5) egyenletbe való behelyettesítése és a sebességviszony kifejezése után adódik:

$$\frac{v_M}{v} = \sqrt{\frac{D_M \Delta T_M g_M T_h}{D \Delta T g T_{hM}}}. \quad (6)$$

Miután a nagy kivitelnél és a modellkísérlet során a Föld nehézségi erőterének térerőssége (g) és környezeti hideg levegő hőmérséklete megegyezik, ezért írható:

$$\frac{v_M}{v} = \sqrt{\frac{D_M}{D} \frac{\Delta T_M}{\Delta T}}, \quad (7)$$

azaz akkor lesz a szabadsugarak alakja hasonló, ha a konverter modell nyílásában a sebesség a nagy kivitelnél érvényes sebesség, valamint a modell-lépték és a hőmérsékletkülönbség-viszony négyzetgyökének szorzatával egyezik meg.

A modell léptéket $D_M/D=1/20$ -ra választva (helyszükséglet, energiaigény miatt), a hőmérsékletviszony $\Delta T_M/\Delta T=1/2$ értékével pl. a sebességviszonyra így $v_M/v=0.158$ adódik. (Az M index a modellre vonatkozó mennyiségeket jelöl.)

Megjegyzés: a valóságban előforduló kilángolási sebességek ($v < 10$ m/s) esetében a nagyhőmérsékletű gáz szabadsugar áramlásánál a felhajtóerő dominál, így kis a Froude-számok jellemzők, a konverterből ferdén kilépő láng- és füstcsóva gyorsan közel függőlegesbe fordul. Ez kedvező, mert elősegíti a gáz elszívását a technológia következtében korlátozott méretű elszívóernyő segítségével.

Konverteren kilépő forró szabadsugar jellemzőinek számítása:

Δp_{mpk} [Pa] a 2 jelű mérőszakaszban látható mérőperem két oldalán mért nyomás különbsége
 T_{mpk} [K] a mérőperemnél uralkodó hőmérséklet
 p_{mpk} [Pa] abszolút nyomás

q_{mkM} [kg/s] fentiek mérésével, és a gáztörvény, ill. a mérőperem számítási képlete felhasználásával meghatározható a konverter modell nyílásán kilépő levegő tömegárama. (Az m index a tömegáramra, a k index a konverterre, más mennyiségeknél az e index az elszívásra vonatkozik. Az M index olyan mennyiségek esetén jelzi, hogy a modellre vonatkoznak, amelyeknek megfelelő mennyiségek a nagy kivitelnél is fontos szerepet játszanak.)

Mérve a konverter modellből kiáramló felmelegített levegő hőmérséklete és a külső hőmérséklet különbségét ($\Delta T_M \cong 4-500$ K) meghatározható a konverter modellből kilépő gázsugar hőtéljesítménye:

$$q_{QkM} = c_p \cdot q_{mkM} \cdot \Delta T_M, \quad (8)$$

ahol c_p [J/kg/K] a levegő állandó nyomáson vett fajhője.

Az elszívóernyőn elszívott forró levegő jellemzőinek számítása:

q_{meM} [kg/s] Fentiekhez hasonló módon mérjük és számoljuk az elszívórendszer modellel elszívott levegő tömegáramát, a mérőperem nyomáskülönbség Δp_{mpe} [Pa], a mérőperemnél uralkodó hőmérséklet T_{mpe} [K] és az abszolút nyomás p_{mpe} [Pa] segítségével.

Mérve az elszívórendszerbe belépő levegő hőmérséklete és a külső hőmérséklet különbségét (ΔT_{eM}) meghatározható az elszívórendszerbe kerülő levegő hőteljesítménye:

$$q_{QeM} = c_p \cdot q_{meM} \cdot \Delta T_{eM}. \quad (9)$$

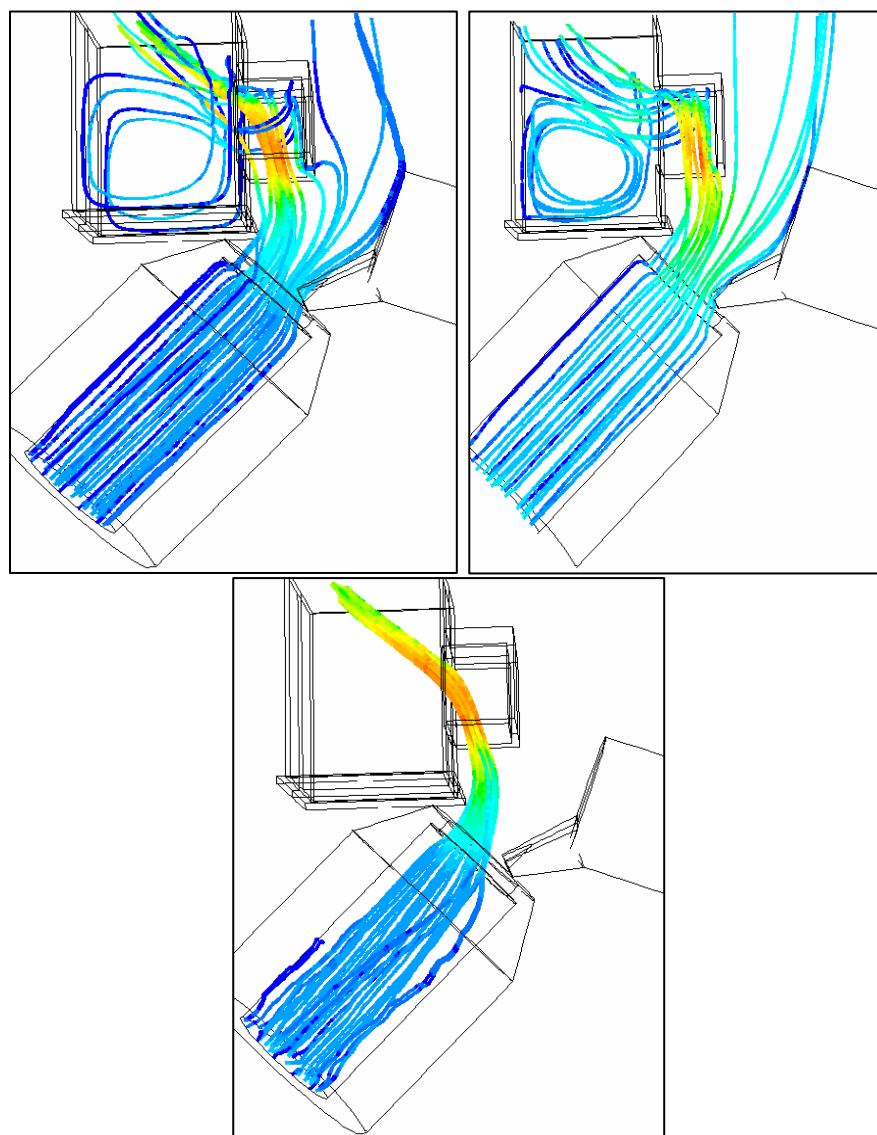
Elszívás hatásossága EH:

A (9) és a (8) összefüggéssel kiszámolt hőteljesítmények hányadosa megadja az elszívórendszer hatásosságára jellemző értéket, a konverter modellből kilépő közeg elszívórendszerbe kerülő részének arányát (EH[%]):

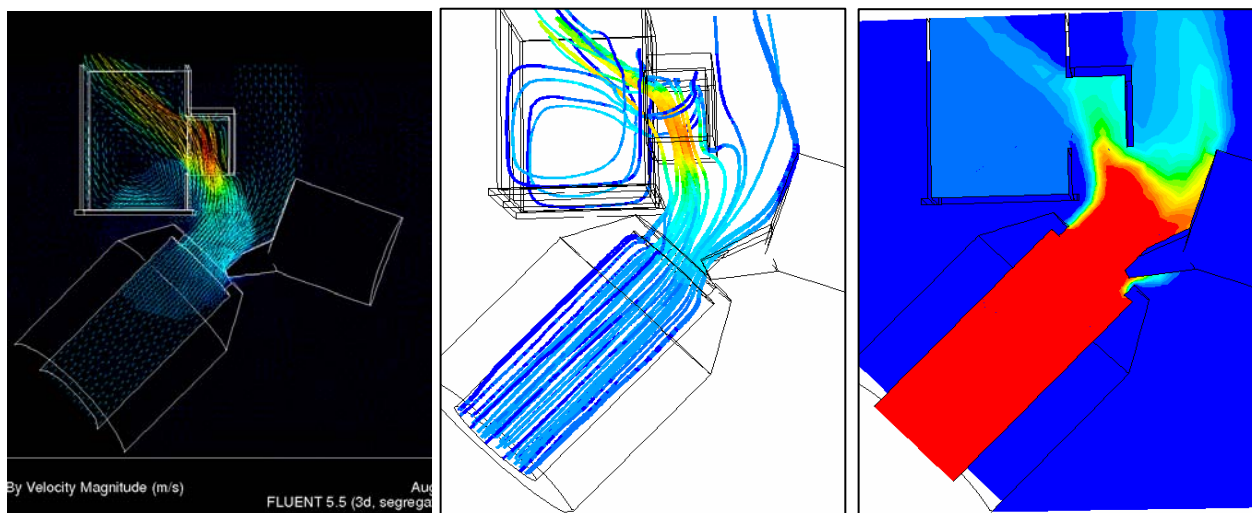
$$EH = q_{QeM} / q_{QkM} \cdot 100 \%. \quad (10)$$

A mérés célja néhány szekunder elszívó rendszer változat kialakítása, és az EH értékének a számítások alapján való összehasonlítása a különböző konfigurációk esetén. (Az elszívás hatásosságát az áramlás láthatóvá tételével is érdemes értékelni.)

Néhány szemléltető számítási eredményt mutatnak be az alábbi ábrák. FLUENT numerikus áramlástanai szoftverrel számolt áramképek láthatóak a konverter és az elszívóernyő környezetében a 3. és 4. ábrán.



3.ábra Forró szabadsugár áramvonalak /FLUENT számítás/



4.ábra Számított áramkép a sebesség /a, b/ és a hőmérséklet /c/ szerint színezve /FLUENT/

4. A mérés menete

A mérés során a berendezésen nyomások és hőmérsékletek mérése a végzendő feladat. A mért adatokból helyszínen kell térfogatáramokat (beszívóoldali és elszívott-oldali térfogatáramokat), ezekből a mért hőmérsékletek ismeretében tömegáramot valamint hőteljesítményt számítani. A konverterből kifúvott ill. az elszívóernyő által elszívott levegő hőteljesítményének hányadosa adja meg az elszívás hatásosságát (EH), mely meghatározása a mérés fő célja. Határozza meg és hasonlítsa össze, magyarázza az EH elszívás hatásosságát az elszívóernyő különböző geometriai beállításai esetén!

A mérés során a berendezés változtatható paraméterei:

- konverter kifúvási sebessége (térfogatárama) az oldalcsatornás fűvő fordulatszámának változtatásával a beszívott levegő térfogatárama
- levegő felhevítésének mértéke (kifűjt forró levegő tömegárama, hőteljesítménye)
- elszívott levegő mennyisége (szívóoldali radiális ventilátor fordulatszámának változtatással, vagy a ventilátor zárólapjának fojtásával)
- elszívóernyő geometriai kialakítása (szélesség, hossz) az oldallemezeinek változtatásával (cseréjével)
- az elszívóernyő belépőnyílása alá helyezett terelőlap alkalmazása (van/nincs)
- konverter állása (dőlésszöge), *a mérés során egy rögzített állapotban van!*
- csűrös üst állása (távolsága, dőlésszöge), *a mérés során a konvertertől eltávolítva áll!*

Mérési program:

A modell berendezés indítása (fontos a modell hőtehetetlensége miatti beállási idők kivárása!): meleg levegő előállítás (gázégők begyűjtása), ventilátorok fordulatszám-szabályozása, majd hőmérséklet, tömegáram mérés, adatgyűjtés, adatfeldolgozás.

5. Elvégzendő feladatok

Meghatározandó mennyiségek /általánosan/:

$\Delta T[K]$ hőmérséklet-különbségek (T_0 környezeti levegő hőmérséklete, konverterbeli levegő kilépés előtti átlaghőmérséklete ($T_{6, \text{átlag}} = T_6 \cdot 0,864$), elszívás utáni átlaghőmérséklete ($(T_5 + T_2)/2$), elszívó oldali átfolyó mérőperem mérőszakaszbeli levegő hőmérséklete (T_3))
 $\Delta T_k = T_{6, \text{átlag}} - T_0$; $\Delta T_e = (T_5 + T_2)/2 - T_0$;

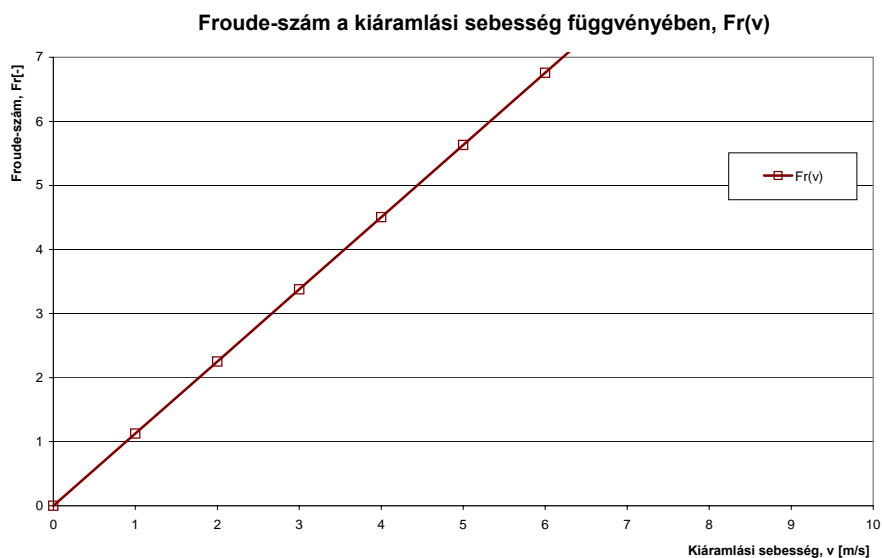
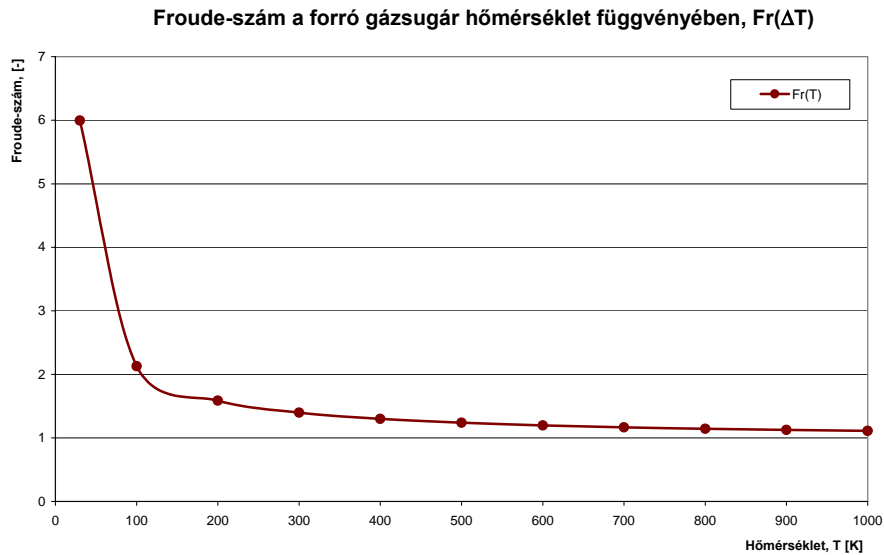
$q_v[\text{m}^3/\text{s}]$ térfogatáram (beszívó mérőperem, átfolyó mérőperemen)

$q_m[\text{kg}/\text{s}]$ tömegáram (konverterből kilépő forró szabadsugárban, elszívott levegő tömegárama)

$q_Q[\text{W}]$ hőáram, hőteljesítmény a fentiekből a kifúvás és elszívás oldalon

EH [%] elszívás hatásossága (a vizsgált különböző beállítások melletti kiértékelés és összehasonlítás, diagramban is ábrázolva, szöveges kiértékeléssel)

$Fr(v_{ki}, \Delta T)$ két diagram készítése: a Froude-szám alakulása a v_{ki} kiáramlási sebesség, és a ΔT_4 forró gázsugár hőmérséklet függvényében. /a (4) összefüggés alapján/



Figyelem!

- a., A rendszer változtatása után a hőtehetetlenség miatt ügyelni kell a megfelelő (20-25 perc) beállási idő betartására!
- b., Ügyelni kell a mérés kiértékelésekor a konverterből kilépő szabadsugár nem egyenletes hőmérséklet profiljának figyelembevételére, ennek megfelelő ($T_6 \cdot 0,864$) korrekcióra!
- c., Gondosan ellenőrizze a hőmérséklet szondák megfelelő helyzetét mérés előtt!
- d., Ne felejtse el rögzíteni a levegő sűrűségszámításhoz szükséges állapotjelzőket (p_0, T_0)!

6. Mellékletek

Térfogatáram-mérési segédlet.

Budapest, 2007. október

/Suda J.M./