

Miskolci Egyetem
Műszaki Anyagtudományi Kar
Kémia Intézet

**Gáz - szilárd rendszerek szétválasztása ciklonok
segítségével**

DIPLOMAMUNKA

Készítette:

Kertész Kitti

Konzulensek:

**Dr. Szepesi L. Gábor PhD, egyetemi docens, Vegyipari Gépészeti Intézeti
Tanszék**

Varga Márta élelmiszerbiztonsági mérnök, Nestlé Hungária Kft.

2015.

Diplomamunka feladatkiírás
Kertész Kitti – Msc nappali tagozatos hallgató részére

Dolgozat címe: Gáz-szilárd rendszerek szétválasztása ciklonok segítségével

Elvégzendő feladatok:

- Ismertesse a gáz-szilárd rendszerek szétválasztásának lehetőségeit
- Mutassa be a ciklonok működési elvét, határszemcséjét
- Végezzen irodalomkutatást ciklonok nyomásvesztésének meghatározására
- Egy adott geometriájú ciklon nyomásvesztését határozza meg a vonatkozó irodalomban található összefüggések segítségével
- Határozza, meg az adott ciklon nyomásvesztését numerikus áramlástani szimulációval egy adott méretű háló esetén valamint mutassa be a szimuláció lépéseit.

A Diplomamunka leadási határideje: 2014. november 24.

A Diploma terjedelme terjedelme: min. 50, max 60 A/4 oldal

Külső konzulens: Varga Márta élelmiszerbiztonsági mérnök, Nestlé Hungária Kft.

Belső konzulens: Dr. Szepesi L. Gábor PhD, egyetemi docens, Vegyipari Gépezeti Intézeti Tanszék

Miskolc, 2014. szeptember 15.

intézetigazgató

Igazolás

Alulírott Kertész Kitti (Neptun kód: GAB9A7, született: Debrecen, 1991.07.10.) igazolom, és büntetőjogi felelősségem tudatában kijelentem, hogy a leadott szakdolgozat a saját munkám.

Miskolc, 2014. november 24.

hallgató

Az igazolást átvettem.

Miskolc,

tanszékvezető

A szerzői jogok részleges átadásáról szóló nyilatkozat

Alulírott Kertész Kitti (Neptunkód: GAB9A7
szül.hely: Debrecen év: 1991 hónap: 07 nap: 10) ezúton nyilatkozom, hogy a dolgozat
nem tartalmaz a tudományos etikát, valamint vállalatok és intézmények érdekeit sértő
bizalmas információkat. Dolgozatom az Egyetemi Könyvtár részére mind elektronikus-, mind
nyomtatott formában átadható, és annak tartalma a Szerző nevének és a Dolgozat címének
feltüntetésével nyilvános tárhelyre feltölthető.

Miskolc, 2014. november 24.

hallgató

Az igazolást átvettem.

Miskolc,

intézetigazgató

Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretnék köszönetet mondani, Dr. Szepesi L. Gábornak, hogy lehetővé tette a diplomamunkám elkészítését a Vegyipari Gépezeti Intézeti Tanszéken, értékes és hasznos tanácsokkal látott el, mindig segítőkész volt a munkám során. Köszönettel tartozom még Varga Mártának a Nestlé Hungária Kft. mérnökének, a gyakorlatom során nyújtott folyamatos segítségéért.

És végül, de nem utolsó sorban szeretném megköszönni szüleimnek a támogatást és határtalan szeretetüket.

TARTALOMJEGYZÉK

1.	BEVEZETÉS.....	1
2.	ALAPFOGALMAK [3.].....	3
3.	PORLEVÁLASZTÓK [3., 2.].....	5
3.1.	FŐBB TÍPUSAI	5
3.2.	MINŐSÉGI JELLEMZŐI [3.]	9
3.3.	NYOMÁSVESZTESÉG	10
3.4.	ENERGIASZÜKSÉGLET	12
3.5.	PORLEVÁLASZTÓK KIVÁLASZTÁSA	13
3.6.	PORROBBANÁS	15
4.	CIKLONOK [2., 3., 4.]	17
4.1.	A CIKLONOK TÖRTÉNELMI ÁTTEKINTÉSE.....	17
4.2.	A CIKLONOK MŰKÖDÉSI ELVE	17
4.3.	A CIKLONOK ÁRAMLÁSI VISZONYAI.....	19
4.4.	A PORTALANÍTÁSI FOK SZÁMÍTÁSA	21
4.5.	A BARTH ELMÉLET	24
4.6.	A CIKLON NYOMÁSVESZTESÉGE.....	26
4.7.	A CIKLON ELLENÁLLÁSA	30
4.8.	A POR HATÁSA A CIKLON MŰKÖDÉSÉRE	32
5.	A CIKLONOK MODELLEZÉSE CFD SZOFTVER SEGÍTSÉGÉVEL.....	33
6.	ÖSSZEHAISONLÍTÁS.....	46
7.	ÖSSZEFOGLALÁS	47
8.	SUMMARY	48
9.	JELÖLÉSJEGYZÉK	49
10.	IRODALOMJEGYZÉK	51

1. Bevezetés

A por az iparban és a természetben különféle megjelenésben fordul elő. Ezeket a szilárd szennyeződések vagy folyékony halmazállapotú cseppeket általában minden esetben el kell választani a gáz halmazállapotú hordozó közegüktől (levegőtől), amelynek a módja a porleválasztás vagy gáztisztítás.

Ezekre a folyamatokra több szempontból is szükség van. Egyrészt a por ártó hatással van a környezetre. Befolyásolja egyes városok, ipartelepek klímaviszonyait, a mezoklímát. A por és a gáz kémiai hatását nem lehet elválasztani egymástól, ugyanis korróziót idézhetnek elő a porral együtt járó gázok minden fémből és vasból készült tárgyon. Poros anyagokat feldolgozó gyártás során értékes portömegek mennének veszendőbe, ha nem nyernék vissza őket megfelelő porleválasztó készülékekkel. Továbbá említésre méltó, az ipari gázok és porok együttesének negatív hatása az állatvilágra, mivel ezek közös hatása a növényzet minőségének romlását idézi elő, amely közvetlen hatást gyakorol az állatokra.

Másrészt egészségügyi és munkavédelmi szempontból is fontos a levegő megtisztítása az ártalmas és kellemetlen szennyeződésektől. Az egészségügyi porkárok leg többje levegőszennyezés eredményeképp áll elő.

A gázok tisztítására alkalmas szerkezeteket gáztisztítóknak vagy porleválasztóknak nevezzük. Technológiai készülékekben kialakuló szilárd szennyeződések elszívó berendezésekkel távolítják el. Környezetvédelmi előírások szabályozzák a légtérbe kibocsátható szilárd szennyezőanyagok tömegáramát. A legtöbb esetben az elszíváshoz porleválasztót alkalmaznak. A munkahelyek belső légállapotához kapcsolódó szabályok elrendelik a klíma-, szellőztető készülékek által a helyiségekbe befűjt levegő szűrését, merthogy az atmoszférikus levegő – főképp a városokban – szennyezett. Ezért a külső levegő portalanítására is megfelelő porleválasztót kell működtetni. Kifejezetten vonatkozik ez a nagy tisztaságigényű helyiségekre (pl. laboratóriumok, műtők... stb.). A klíma-, szellőztető készülékekben alkalmazott porleválasztókat általában szűrőknek nevezik.

A dolgozatom témáját a ciklonok képezik. Gyakorlatomat a Nestlé Hungária Kft. szerencsi gyárában töltöttem, ahol kakaó és kávé porokat gyártanak nap, mint nap hosszú évek óta. Az üzemet bejárva több műszaki, technológiai berendezést megismertem, de nagyobb érdeklődés a gáztisztító berendezések irányába alakult ki

bennem. Ezek a készülék véleményem szerint a gyár legfontosabb és nélkülözhetetlen eleme.

Elengedhetetlenek, mert az üzemben poros anyagokat dolgoznak fel. Értékes félkész- és nyers anyagok sokaságának kezelésekor jelentős porveszteség adódna, ha potenciális portalanító és porleválasztó berendezéssel az anyagokat nem nyernénk vissza.

Utoljára, de nem utolsó sorban említeném meg a gáztisztító készülékek alkalmazásának legfontosabb indokát. A pornak komoly élettani hatása van az emberi szervezetre. Káros hatását három féle úton fejtheti ki: bőrön át, légzőszervek - valamint táplálkozás útján. Az egészségtelen hatás sokszor csak évek múltán jelentkezik, nem befolyásolja akár évig a dolgozó munkateljesítményt.

2. Alapfogalmak [3.]

Por: tetszőleges alakú, szerkezetű és sűrűségű, apró szilárd vagy folyékony részecskékből álló diszpergált anyag, amely a közbenső összefüggő teret kitöltő gáz- vagy folyadékfázisú diszperziós közeggel együtt egy kétfázisú esetleg többfázisú diszperz rendszert alkot.

A por nagyság szerint lehet:

- durva por ($10^3 - 10^2 \mu m$)
- finom por ($10^2 - 10 \mu m$)
- nagyon finom por ($10 - 0,1 \mu m$)
- füst, köd ($0,1 - 10^{-3} \mu m$)
- molekula ($10^{-3} - 10^{-5} \mu m$)

Porszemcse: a porhalmaz részecskéje, amely rövid felgyorsulási szakasz után közel állandó sebességet ér el.

Pordiszperzió: gázhalmazállapotú közegben jelenlevő, egymástól független porszemcsék összessége.

Porhalmaz: gázhalmazállapotú közegben egymással érintkező porszemcsék összessége.

Por esési sebessége (v_e ; cm/s): a porszemcsének az az állandó sebessége, amely áramlásmentes folyadékban vagy gázban rövid útszakaszon tartó gyorsulás eredményeképp a nehézségi erő és a közegellenállás hatására alakul ki.

Porkoncentráció, porterhelés (k ; S ; u ; mg/m^3 , g/m^3): adott hőmérsékletű és nyomású $1 m^3$ gázban levő pormennyiség.

Porszemcseszám (N ; db/cm^3 ; db/m^3): adott hőmérsékletű és nyomású $1 m^3$ gázban levő porszemcsék száma.

Ekvivalens (egyenértékű) szemcseátmérő (d_e ; μm): mivel a gömbnél mind az erő, mind a mozgás hatása bármely irányban azonos, és mivel áramlástani tulajdonságát határozták meg a legjobban kísérletileg, a szemcsenagyság jellemzésére vezették be az ekvivalens gömbátmérők fogalmát. Ezek közül a porteknikában a leghasználatosabb az esési sebességből számított átmérő, amely annak a gömb alakúnak képzelt azonos sűrűségű porszemnek a mérete, amelynek esési

sebessége – azonos vizsgálati körülmények esetén – megegyezik a vizsgált porszemcse esési sebességével.

Abszolút portalanítási fok (E_0): a leválasztott és a porleválasztóba beáramló gáz pormennyiségének százalékos aránya.

Relatív portalanítási fok (E_f): valamely szemcsenagyság-frakció teljes mennyiségéből hány százalékot választ le a készülék.

3. Porleválasztók [3., 2.]

3.1. Főbb típusai

A porleválasztókat többféle szempont szerint csoportosíthatjuk.

▪ Teljesítményük szerint két főcsoportot különböztethetünk meg:

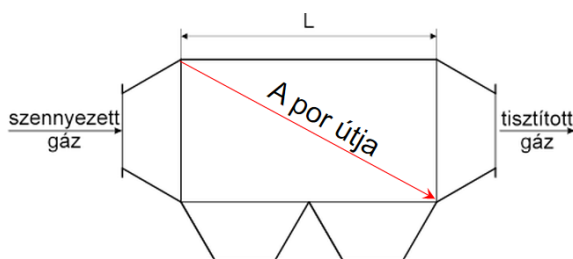
- Első csoportba főként ipari műszerekben alkalmazott porleválasztók, melyeknek abszolút portalanítási fokuk 70 – 98 % közé esik, és $0,4 - 50 \text{ g/m}^3$ por koncentrációs értékű gázok tisztítására alkalmazzák, zárt rendszerű ipari berendezésekben. A gáz halmazállapotú hordozó közegből annyi port választanak le, hogy az a szabadba kibocsátható legyen, de belégzésre ez még alkalmatlan. A leválasztott port folyamatosan eltávolítják. Ebbe a kategóriába tartoznak a következő porleválasztó típusok: ciklonok, porkamrák, multiciklonok, szövetszűrők, nedves leválasztók, elektrofilterek stb.

- Második csoportba tartozó porleválasztók nagyobb levegő gáz tisztítására is megfelelőek, de csak kisebb porterhelésre alkalmasak. Alkalmazásukkor akár 99,9 % - vagy ennél nagyobb portalanítási fok érhető el. Az ilyen típusú porleválasztók képesek $2 - 50 \text{ mg/m}^3$ porterhelésű levegőt megtisztítani, úgy hogy az belélegezhető lesz. Ide tartoznak a különböző légszűrők.

▪ Működésük szerinti főbb csoportok:

- Nehézségi erővel működő porleválasztók (porkamrák):

Nagyméretű, de legegyszerűbb szerkezetű, legalacsonyabb beruházási és karbantartási költségű porleválasztó készülékek a porkamrák (1. ábra). Elő- vagy durva leválasztóknak alkalmazzák, mert portalanítási fokuk kicsi. Nehézségi erőter segítségével történik a porleválasztás, melynek hatására a porszemcsék lefelé kezdenek mozogni és a porkamra fenekére ülepednek le.

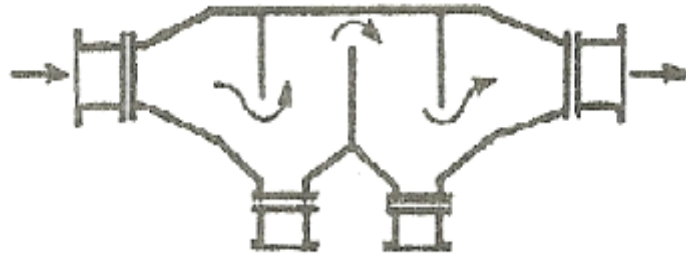


1. ábra: Porkamra vázlata

[1]

- Irányeltereléses porleválasztók (különleges porkamrák):

A porkamrák az az egyedi típusa, amelyekbe válaszfalat, terelőlapátokat, ütköztető lemezeket építenek (2. ábra). Ezeknek a beépített részeknek az a feladatuk, hogy megnöveljék a gáz útját, ezáltal az irányeltereléseket a porszemcsék nem tudják követni a tehetetlenségük következtében.

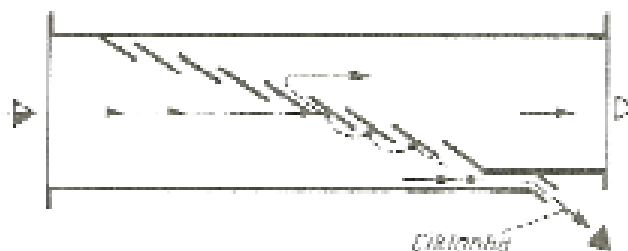


2. ábra: Irányeltereléses porleválasztó

[2., 390. oldal]

- Ütközéses (zsalus) porleválasztók:

Az ilyen típusú berendezésekben a poros gáz nagy sebességgel áramlik, és ferdén elhelyezett zsalulemezekkel bontják keskeny rétegekre (3. ábra). Ezek között a gáz olyan irányváltozást szenved, amit a porszemcse nem tud követni. Így a szemcse egyik lemeztől a másikra jut. A berendezés alsó zsalujára érve a kiválasztott port kevés levegővel elszívják és ciklonban leválasztják, majd a megtisztított gázt a zsalus leválasztó előtti gázáramba vezetik vissza.

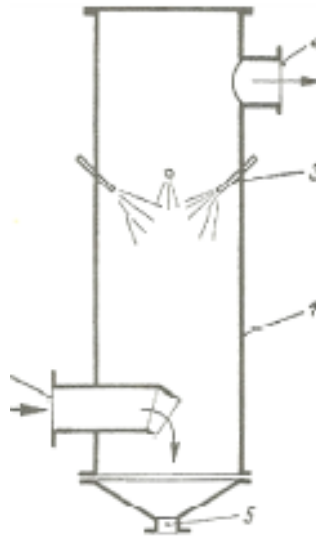


3. ábra: Ütközéses porleválasztó

[2., 391. oldal]

- Nedves porleválasztók:

Finom porszemcsék leválasztására használják az ilyen típusú porleválasztókat. Az ilyen szemcséknek túl kicsit a tömegük ahhoz, hogy a rájuk ható tömegelő le tudja választani őket a gázáramból. Ezért nedvesítéssel növelik meg a tömegüket. Egyik fajtája a Venturi-mosó, melyben a porok nedvesedése a vízporlasztás közben következik be és kerül nedves ciklonba, ahol a por a vízcseppekkel együtt válik ki.



4. ábra: Nedves porleválasztó

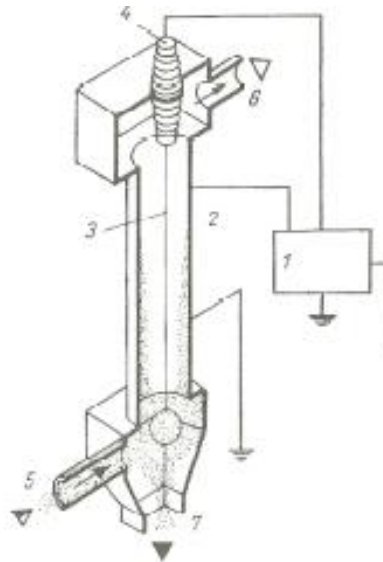
[2., 418. oldal]

- *Elektrosztatikus porleválasztók:*

Az ilyen típusú porleválasztóknál a villamos térerőt használják fel a gáz halmazállapotú hordozó közegben lévő folyékony vagy szilárd részecskék elválasztására (5. ábra). Működésüknek lényege, hogy a gázban lebegő elektromos töltésű porszemcsék az ellentétes polaritású felület felé haladnak és ott leülepednek.

A következő típusú elektrosztatikus porleválasztókat lehet megkülönböztetni:

- Durva töltőanyaggal készült rétegszűrők
- Lamellás vagy spirál töltőanyagú szűrők
- Szálhalmazokkal készült rétegszűrők
- Coriolis porleválasztók
- Agglomerálással kombinált porleválasztók
- Egyéb különleges eljárással működő szerkezetek: mágneses térrel működő porleválasztók és a felsoroltak kombinációi.



5. ábra: Elektrosztatikus porleválasztó

[2., 407. oldal]

5.ábrán szemléltetett elektrosztatikus porleválasztó elvi működése koronakisülésen alapszik. A hálózati váltakozó áramot transzformálják, és egyenirányítják. A nagyfeszültségű egyenáramú áramforrás negatív pólusát (1) az ionizáló elektródára (3), míg a pozitív pólusát a porgyűjtő elektródára (2) kapcsolják. A porgyűjtő elektródát és a pozitív pólust is földelik. Az elektródákra kapcsolt feszültség eredményeképpen villamos erőter keletkezik az elektródák között. A tisztítandó gáz az (5) csonton érkezik. A tisztított gáz és a por a (6) illetve (7) csonton keresztül távozik.

3.2. Minőségi jellemzői [3.]

A porleválasztók minőségi szempontból jellemző tulajdonságai:

- E_o és E_f össz – és frakcióportalanítási fok
- a terhelésváltozás befolyása a szerkezet működésére
- a különböző tulajdonságú porok befolyása a porleválasztásra
- a porleválasztók ellenállása
- a porleválasztók energiaszükséglete
- a korrózió-állóság
- az erózió, kopásállóság
- az üzemben tartási költségek
- a beruházási költségek
- a beszerzési és gyártási lehetőség
- a helyszükséglet

3.3. Nyomásveszteség

A nyomásveszteség mindig az össznyomásveszteséget (Δp_0) fejezi ki, Pa mértékegységben. A nyomásveszteség mért értéksorozataival vagy az ellenállás-tényezővel (ξ) határozzák meg a porleválasztók nyomásveszteségét. A nyomásveszteség megadása, ha ismerjük az ellenállás-tényezőt :

$$\Delta p_0 = \xi \frac{\rho_g}{2} w^2$$

ρ_g : leválasztóba belépő gáz sűrűsége adott hőmérsékleten és nyomáson [kg/m^3]

w: az az áramlási sebesség, amelyre az ellenállási-tényező vonatkozik [m/s]

ξ : ellenállás tényező [-]

A nyomásveszteség értéksorozatát áramlási sebességre, tömegáramra és térfogatáramra vonatkoztatják:

$$\Delta p_0 = f(w) ; \Delta p_0 = f(\rho_g w) ; \Delta p_0 = f(\dot{V})$$

Légtechnikai elemek nyomásveszteségének meghatározása könnyebb feladatot jelent, mint a porleválasztó berendezések nyomásveszteségének definiálása. Az ellenállás tényező tiszta levegő esetén is függ a Re-számtól, de ezt a gyakorlatban általában figyelmen kívül hagyják. Az ellenállási tényező nagyobb portartalmú levegő esetén függ a porterheléstől is. Először Pápai L. mutatott rá arra, hogy a szilárdanyag koncentráció növekedésével a nyomásveszteség csökken.

Általában a belépési sebességre vonatkoztatják az ellenállási-tényezőt, de nedves ciklonok esetében az axiális sebességre. Figyelembe kell venni, azt a megállapítást, hogy a nyomásveszteség megadását ellenállástényező ismeretében, csak turbulens áramlásnál lehet alkalmazni. A néhány irodalomban közölt $\Delta p_0 = \xi \frac{\rho_g}{2} w^n$ felírást lehetőleg mellőzni kell, mivel az n kitevő értéke befolyásolja az ellenállás-tényező dimenzióját. Értéksorozattal kell megadni a nyomásveszteséget abban az esetben, ha az áramlás nem turbulens.

A teljes leválasztó rendszer nyomásveszteségét definiálni kell, amennyiben a leválasztókat több egységből építik fel (soros vagy párhuzamos kapcsolással). Az ilyen esetek nehezítik a számítást és mérést.

A szűrőtípusú porleválasztókban az áramlás különböző lehet az anyagoktól függően. A szűrőanyagokban az áramlás lamináris, míg a levegő ki – és bevezetésére kialakított rendszerekben turbulens áramlással hömpölyög. Ilyen esetekben a nyomásveszteség méréssel és számítással sem határozható meg pontosan, még akkor, sem ha a szűrőanyag nyomásveszteségét sikerült megállapítani.

A nyomásveszteség mérése összetett feladat a porleválasztóknál, mert a belépő keresztmetszet nem azonos a kilépő keresztmetszettel, ebből adódóan az össznyomásesés eltérő a be- és kilépő csomópontokon mért statikus nyomások különbségétől.

Párhuzamosan mérni kell a be- és kilépő csomópontokon a gáz térfogatáramát, ugyanis sok esetben ún. hamis levegő áramlik be vagy ki a leválasztóból a tömítetlenségek miatt, ami a mérés hitelességét ronthatja.

Pontosan kell rögzítenünk az előzőek miatt a nyomásveszteség megadásakor a mérés feltételeit és paramétereit. Általában a méréssel meghatározott nyomásveszteségek levegőre vonatkoznak. Azoknál a porleválasztóknál, ahol a port nem ürítik állandóan, a nyomásesés a por mennyiségének növekedése függvényében nő. A berendezés ventilátorának közvetlenül a szűrőcseréje előtt is tudnia kell a tervezett légmennyiséget szállítania, így a berendezés megtervezéséhez szükséges az előző mondatban említett függvénykapcsolat ismerete.

3.4. Energiaszükséglet

A porleválasztók energiaszükségletét a ventilációs energiaigény és segédenergiaigény együttese adja.

A ventilációs energiaigény számolásához szükség van a porleválasztó össznyomásvesztésére és a gáz térfogatáramára. A számolás nem egészen nyilvánvaló, mert a ventilációs energiaigényt befolyásolja az alkalmazott ventilátor összhatalásfoka.

Elméleti összefüggés:

$$P = \dot{V} \Delta p_{\delta}$$

P: energiaigény [W]

$\dot{V}$: leválasztón áthaladó gáz térfogatáram [m³/s]

Δp_{δ} : leválasztó össznyomásvesztés [Pa]

Ventilátor összhatalásfokával korrigált elméleti összefüggés:

$$P = \dot{V} \Delta p_{\delta} \eta_{\delta}^{-1}$$

η_{δ} : a ventilátor és hajtás összhatalásfoka

A leválasztó készülékek tökéletes működéséhez szükséges segédberendezések különféle energiaigénye, a segédenergiaigény. Ilyenek lehetnek a szivattyúk, rázószervezetek energiafogyasztása. A teljes számításhoz nyilvánvalóan hozzátartozik a több elemből álló teljes berendezés valamint a rendszerbe való beépítéshez szükséges csővezetékek ellenállástöbblete is.

3.5. Porleválasztók kiválasztása

A porleválasztók különbözőségét az adja, hogy eltérő hatásfokkal és energiafogyasztással is készülhetnek. Kiválasztásuknál elsősorban figyelembe kell venni azt a szempontot, hogy a tisztítás utáni levegő hova kerül. E szerint különféle minőségű porleválasztókat vehetünk igénybe. Az első csoportba olyan porleválasztók tartoznak, melyek a megtisztított levegőt az egészségügyi szabályoknak megfelelően tisztítják meg, kis porterhelésű gáz vagy levegő megtisztítására alkalmasak, és nem mindig automatikus ürítéssel dolgoznak. Ezek többnyire szövetszűrőket és a viszkóz anyaggal bevont szűrőket. A második csoportba olyan porleválasztók tartoznak, amelyek nagy porterhelést is elviselnek, állandó ürítéssel dolgoznak, és nem az egészségügyi szabályoknak előírtan tisztítják meg a levegőt. Ezek leggyakrabban porkamrák, ciklonok, zsalszűrő leválasztók, multiciklonok, elektorfilterek vagy szövettömlős berendezések. Ahhoz, hogy a két csoportból kijelöljük a számunkra legmegfelelőbb berendezést a következő paramétereket is figyelembe kell vennünk:

- a por jellemző méretét
- a por koncentrációját
- a részecske sűrűségét
- a por koptató hatását
- a por tapadási hajlamát
- a tisztítás előírt mértékét (leválasztás fokát).

Egy gáztisztító berendezés kiválasztásakor lényeges szempont: a gáz hőmérséklete, mennyisége, helyszükséglete, beruházási – és üzemelési költségek, egészségügyi kérdések valamint a gázban levő leválasztandó porteher összetétele és mennyisége továbbá a tiszta gáz megengedhető legnagyobb porterhe. Ez a kettő utóbbi a legfontosabb szempont.

A szemcseméret kijelöli a használható berendezést egy bizonyos fokig, ugyanis ez a paraméter csak nagyságrendi tájékoztatást ad.

A határszemcse alapján a következő csoportokat lehet megkülönböztetni:

- legfinomabb leválasztás: megvalósításának eszköze az ultraszűrő, ahol a speciális szűrőpapír a szűrőközeg. Abban az esetben, ha optimális minőségű

szűrőközeget alkalmazunk, akkor a $2\mu\text{m}$ méretű szemcséket 100%-ban, a $0,4\mu\text{m}$ nagyságú szemcséket 97 - 99,98 %-ban lehet elkülöníteni.

- finom leválasztás: gázszűrők, elektrosztatikus porleválasztók és Venturi-mosók alkalmazásával valósítható meg. Kis porterhelés esetén $0,01 - 10\mu\text{m}$ méretű részecskék elhatárolására alkalmas. A határszemcse mérete $0,5 - 5\mu\text{m}$.
- jó leválasztás: nedves gáztisztító készülék használatával érhető el. Nagy porterhelésnél is megfelelően működnek. A határszemcse mérete $5 - 10\mu\text{m}$.

Kisméretű, jó hatásfokkal dolgozó ciklonokkal $15 - 25\mu\text{m}$ nagyságú határszemcse méret érhető el. Ilyen eszközök a cseppleválasztók és Viscin-szűrők, amelyek $10\mu\text{m}$ -nél is nagyobb részecskék leválasztására is ideálisak.

Nagyméretű, egyszerű ciklonokkal $30\mu\text{m}$ -nél nagyobb határszemcseméret is elérhető. Az ilyen készülékekkel $60\mu\text{m}$ -nél nagyobb részecskék is teljesen elkülöníthetőek.

Durva leválasztásra és előleválasztásra porkamrákat alkalmaznak, amelyeknek határszemcse nagysága $100 - 200\mu\text{m}$.

A portalanító szerkezeteket elhagyó por tisztaságára vonatkozó követelmények megszabott frakcióhatásfokot jelentenek a berendezésnél.

1. táblázat: A portalanítási fok értékei különböző berendezések esetén

Portalanítási fok (%)	Porleválasztó berendezés
99	gázszűrő, Venturi-mosó, elektrosztatikus portalanító
96	nedves gáztisztító
82	multiciklon
60	kisméretű ciklon
20	nagyméretű ciklon

[2. 437. oldal]

3.6. Porrobbanás

A porrobbanás olyan üzemekben fordulhat elő, ahol éghető poros vagy por halmazállapotú anyagokkal dolgoznak.

Éghető poros anyagok azok a porok, amelyeknek anyaga hőfejlődés mellett oxidálódik. Minden olyan por, amelynek anyaga vagy legalább egyik összetevője oxidálódik, porrobbanás előidézője lehet.

A porrobbanás három feltétele:

- por éghető legyen
- a port körülvevő levegő vagy gáz oxigén tartalmú legyen
- energiaforrás szükséges a folyamat elindításához

A leülepedett por levegővel találkozáskor nem robban, csupán meggyullad és nehezen oltható tüzet gerjeszt. A porok robbanóképességét az okozza, hogy a folyamat gyors véghezvitelére képesek, mert kis szemcsészetüknek köszönhetően nagy felületük van.

Geck két porrobbanási veszélyességi fokot állapított meg, amik az alábbiak:

- 1. veszélyességi fok: ebben a csoportba tartoznak a finom szemcsés, száraz, kis hamutartalmú anyagok porai, amelyek levegőben lebegve könnyebben gyulladnak, mint leülepedve. Meggyulladva gyorsan továbbterjednek és szúrólángot adnak, amely megfelelő nagy nyomást biztosít a robbanáshoz. Ilyenek pl.: fa, parafa, cukor, liszt, bőr, keményítő, maláta, keménygumi, növényi rostok és műtrágyák porai.
- 2. veszélyességi fok: ebbe a kategóriába tartozó porok szárazak és nagyobb hamutartalmúak. Levegőben lebegve csak nagyobb hőfok és hosszabb ideig tartó meleg forrástól gyulladnak be. Elégséges mennyiségű finom szemcse elkeverése már szúrólángot is tud eredményezni, ami nagyobb tüzet okozhat, de robbanás előidézésére nem képes. Ilyenek pl.: cink, pamut, szurok, kakaópor, fűszer, egyes szappanok és egyes festékanyagok porai.

Az anyag kémiai és fizikai tulajdonságai befolyásolják a por robbanásának és meggyulladásának lehetőségét. Ilyen tulajdonságok pl.: a por diszperzitásfoka, a por felületének nagysága, salak – és nedvességtartalma, az aeroszol koncentrációja, az illótartalom mennyisége és a gyújtás hőfoka.

A robbanóképesség a szemcsefinomság növekedésével nő. Ennek oka, hogy a szemcsék felülete megnő így egymástól való távolságuk csökken. A por robbanásának és gyulladásának a kis szemcsenagyság a feltétele. 100 μm -nél kisebb szemcseméret felett a gyúlékonyság és robbanóképesség feltűnően csökken. A gyulladási képességet nagymértékben befolyásolja a szemcse morfológiai tulajdonsága is. Tehát a szemcse nagysága mellett a szemcse alakja, struktúrája, kapillaritása, azaz az anyag viszonylagos felülete is figyelemre méltó. A por gyúlékonyságát, robbanóveszélyét az anyag nedvességtartalma lényegesen csökkenti, de a robbanás továbbterjedése 30% nedvességtartalom mellett is elképzelhető. A rendszer robbanásveszélyét a gázban lévő oxigén mennyisége határozza meg.

Az öngyulladás a porok olyan tulajdonsága, amelynél bizonyos körülmények között hosszú ideig tárolt portömeg külső hő hozzávezetése nélkül is felmelegszik a gyulladási hőmérsékletig.

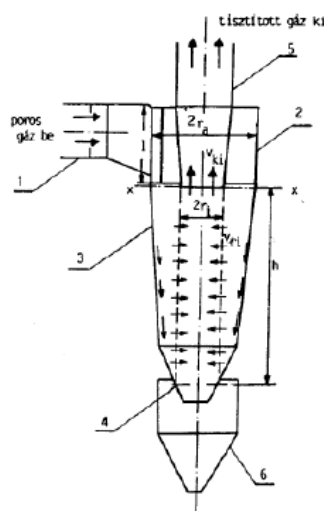
4. Ciklonok [2., 3., 4.]

4.1. A ciklonok történelmi áttekintése

1886-ban az USA-ban és Németországban került szabadalmaztatásra M. Morse „ciklon alakú porgyűjtő” találmánya a Knickerbocker Company cég által. Portechnikai nehézségek léptek fel az első világháború után, melyek megkövetelték, hogy nagyobb figyelmet fordítsanak a ciklonok kedvező tulajdonságaira. Amelyek szerint a geometriai méretek és formák módosításával illetve a gázsebesség növelésével a portalanítási fokot lényegesen növelni lehet. Kedvező eredményeket értek el a holland van Tongeren-féle és az amerikai „multiciklonokkal”. Prandtl, Barth, ter Linden, Feifel, Meldau, azok a személyek, akik meghatározták a por mozgásegyenleteit az örvénytérben, értelmezték a portechnikai alapfogalmakat, a modellkísérletek feltételeit, a kiértékelési és mérési módszereket.

4.2. A ciklonok működési elve

A legelterjedtebb mechanikus porleválasztó készülékek, melyek a centrifugális erőter elve alapján üzemelnek. Ez az erőter segít abban, hogy mozgó alkatrész hiányában a porszemcsék elkülönüljenek a gázáramtól. Megfelelő hatásfokot 10 μm -nél nagyobb méretű szilárd részecskék leválasztásánál tudunk megvalósítani. Porleválasztó ciklon részei 6. ábra jelöléseivel: (1) gázbevezető csomak, (2) hengeres rész, (3) kúpos rész, (4) porkivezető nyílás, (5) gázkivezető, (6) portartály.



6. ábra: Porleválasztó ciklon részei

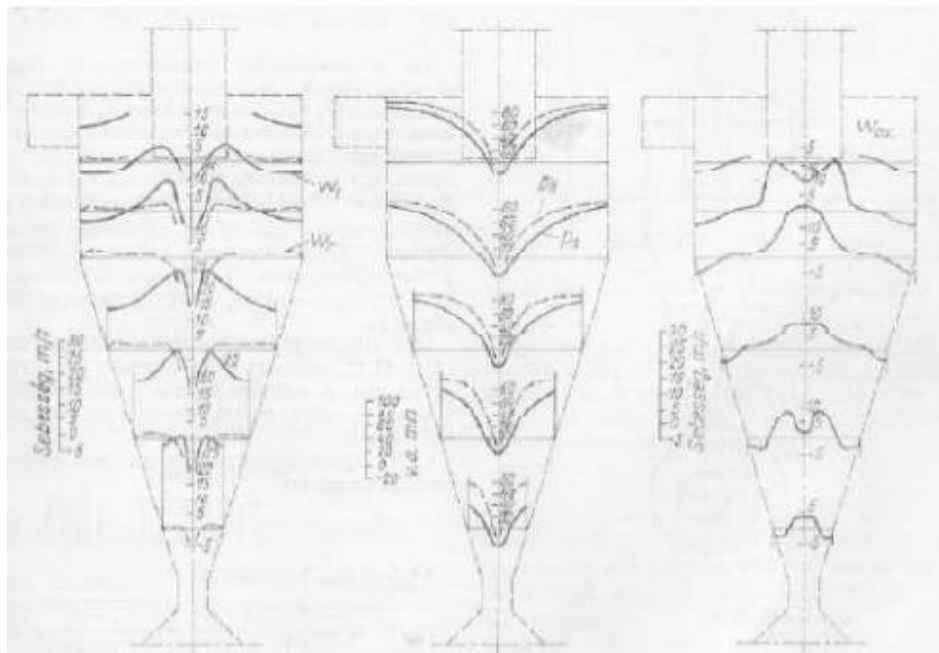
[5., 7. oldal]

A megtisztítandó gázt a hengeres tartályba fújják. Ez a poros gáz a ciklonba több kört téve ívelt pályán halad a leválasztótérben. A körmozgást a ciklonba vezetett gázáram idézi elő. A centrifugális erő hatására a porszemcsék a ciklon fala felé vándorolnak, ahol először mozgásuk lelassul, majd kiválnak. A kivált porszemcsék az alsó kúpos tölcserbe hullanak a nehézségi erő befolyására majd a portartályba kerülnek ahonnan a por elvezethető. A porszemcséktől elkülönített gáz az elvezető csövön (merülőcső) keresztül felfelé távozik, amely a hengeres rész tengelyének közepén van elhelyezve. A ciklon a finomabb komponensű porokat nem tudja leválasztani, ezért azok a megtisztított gázárammal együtt távoznak. A szemcsék mozgásának irányát a szemcsékre ható sebesség-komponensek eredője adja meg. A ciklonokban bonyolult áramlások uralkodnak.

Vannak olyan ciklonok, melyeket olyan nagyra méreteztek, hogy az egész gázmennyiség képes egyetlen készüléken keresztül menni. Ezek az egyszerű ciklonok. A multiciklonokat az jellemzi, hogy több kisebb ciklonból épülnek fel, melyeket a kívánt portalanítási foknak megfelelően méreteznek. Annyi ciklont alkalmaznak hozzájuk, amennyi a teljes gázmennyiség megtisztításához szükséges. A fejlődés alatt az egyes típusok ciklonformája egészen megváltozott és a szerkezet örvénycső alakot vett fel. Ennél a kis átmérőjű csőszerkezetnél a perdületes áramlást perdületelemekkel, rozettákkal vagy irányelterelő lapátokkal biztosítják. A kívánt gázmennyiség megtisztításához jó néhány örvénycsövet kell használni, mert az elemek mérete kicsi. Az örvénycső elemeket csoportokba (battériába) beépítve helyezik el. A ciklonok és örvénycsövek előnyös tulajdonsága, hogy olcsók és könnyen gyárthatók. Hátrányuk az, hogy erősen kopnak, nagy ellenállásúak és mérsékelt portalanítási fokuk van.

4.3. A ciklonok áramlási viszonyai

Egy ciklon áramlási képének megadása elengedhetetlen ahhoz, hogy a ciklon működésének ismerete. Ehhez bonyolult matematikai leírások és egy háromdimenziós áramlási kép szükséges. Ezeket az előbb említett tényezőket manapság már számítógépek segítségével szimulálni tudjuk. A korábbi években Kelsall, ter Linden, Sheppard és Lapple, Fontein és Dijksman kísérleti módszerek segítségével adták meg a ciklonok áramlási képét.



7. ábra: Áramlás képe a ciklonban

[3., 206. oldal]

Az 7. ábrán ter Linden kísérleti eredményeit láthatjuk, ahol a gáz tangenciális, radiális és axiális sebességének továbbá az összenyomás és statikus nyomás változását szemlélteti a ciklon különböző metszeteiben. A képekből hasznos tanulságok vonhatóak le. A tangenciális sebesség közel azonos a befúvósebességgel és a ciklon fala mentén a legkisebb. Továbbá ez a sebesség a por elvezető nyílása felé folyamatosan növekszik a sugár csökkenésével arányosan. A ciklonban 30 g/m^3 porkoncentrációig az áramlási képet a potenciális áramlásnak megfelelő $w^t r^n = \text{állandó}$ összefüggés határozza meg. Abban az esetben ha $n = -1$, akkor a közeg merev testként mozog. Ez leginkább a centrifugákra jellemző leginkább. Ugyanakkor, ha $n = +1$, akkor ideális

súrlódásmentes áramlásról beszélhetünk. Ez a szabad örvénylés esete, ami a $v_t r$ perdület állandóságát jelenti. A ciklonban súrlódási veszteségek adódnak, azaz $n < 1$ pontosabban $n = 0,5 \dots 0,7$ értékekkel kell számolnunk.

A tangenciális sebesség lefelé mindig csökken, de legnagyobb értéket az elvezető csőnél kisebb körön ér el. A merőleges potenciális örvényáramlásokra tengelyirányú mellékáramlások összegződnek. A gáz a tengely közelében felfelé, míg a fal mentén lefelé áramlik az ismeretlen tulajdonságokkal rendelkező belső örvénytérben.

A határszemcse mérete a szívónyílás közelében nagyobb, mint lejjebb, mert a felfelé irányuló áramlás az elvezető cső felé nő. Ez hatást gyakorol a frakció portalanítási görbe alakjára. A felfelé áramló örvény szívó hatással van a porelvezető nyílásban tartózkodó porok nagy részére. A porok onnan kikerülve a külső örvényáramba kerülnek ismét a centrifugális erő következtében. Kettős örvény is keletkezhet, ha az elvezető cső megfelelő mélyen benyúlik a ciklonba.

4.4. A portalanítási fok számítása

A portalanítási fok pontos matematikai megállapítása eddig sikertelen a ciklonban zajló bonyolult folyamatok miatt. Ezért a számításoknál közelítéseket, kísérleti módszereket és empíriákat veszünk figyelembe, úgy hogy számos tényezőt elhanyagolunk.

Ezek az elhanyagolt tényezők a következők:

- a szemcsék mozgásuk közben nem befolyásolják egymást
- a nehézségi erőtől eltekintünk
- a Stokes - törvény igaz a szemcsék mozgására
- a szemcse leválasztásának feltétel, hogy az elérje a ciklon falát
- a gömb alakú szemcséket feltételezünk
- a gázsebesség a szemcseeloszlás egyenletes a belépőnyílásban
- a belépő sebességgel megegyező gáz és a szemcse csavarmenetben állandó kerületi sebességgel mozog, Rosin, Rammler és Intelmann elhanyagolása szerint.

A határszemcsék (d_h), azok a szemcsék, amelyeknél nagyobb szemcsék elméletileg 100%-ig leválasztódnak. Kiszámításának módja:

$$d_h = \sqrt[3]{\frac{\eta}{\pi \rho_1 v_t}} * \sqrt{A(1 - \frac{A}{D}) \frac{1}{U}}$$

U: gázáram keringésének száma a ciklonban ($U = \frac{tv_t}{\pi D}$)

t: szemcse ciklonban tartózkodási ideje ($t = \frac{V_{ciklon}}{\dot{V}}$)

A belépőnyílás keresztmetszetét függőleges részekre osztva, különböző határszemcse értékeket kapunk. A legkisebb határszemcse érték a ciklon falánál adódik. A részek számát n-nel, míg a faltól való távolságukat s-sel jelöljük.

Az s_i helyen a határszemcse számolásának módja:

$$d_h = C \sqrt{Ds_i - s_i^2}$$

Az s helyen az ε_f frakcióportalanítási fok görbe $d_h = d_{hip}$ pontjában $\varepsilon_{fi} = s_i/A$. Ez az $\varepsilon_f = 0$ -tól $\varepsilon_f = 100\%$ -ig az $x - \varepsilon_f$ koordinátán egy monoton növekvő görbét ad. A görbe eltér a valóságtól a zavaró hatások miatt fellépő szórás következtében. Jellemző szemcsenagyságnak $d_h = d_{hip}$ ($\varepsilon_f = 50\%$) értéket veszünk, amely a valósághoz közelebb áll.

C. N. Davies képlete a fenti gondolatmenetet követve az alábbi:

$$d_{hip} \cong d_h = \frac{3}{2} \sqrt{\frac{\eta D^2}{8\rho_1 w_b h} * \left[1 - \left(\frac{d_1}{D}\right)^4\right]}$$

Muhlrad összefüggése az alábbi:

$$d_{hip} \cong d_h = \frac{3}{4} \sqrt{\frac{3}{\pi} * \frac{\eta}{\rho_1 w_b} * \frac{D^2}{r_b U} * \frac{1 - \chi^4}{1 + \chi + \chi^2}}$$

E. Feifel által kidolgozott örvényszita elmélet alapja, az hogy az elszívó nyílással azonos d_1 átmérőjű, hengeres kontroll felületen egyensúlyban levő szemcse méretével megegyezik a határszemcse mérete örvénynyelő mozgásban. Örvényszita elmélet onnan ered, hogy itt élesebb a szétválás, mint a szitában.

Amennyiben a $v_t r =$ állandó az alábbi összefüggéssel számítható ki a határszemcse:

$$d_h = \sqrt[3]{\frac{\eta d_1^2}{2\rho_1 w_b r_b} * \operatorname{tg} \alpha}$$

A d_1 vitatható kontrollfelület, melyet Feifel és Barth is elfogadott.

Feifel képletből levezetett határszemcse meghatározás ideális áramlásra:

$$d_h = C\alpha\beta w^{-0,5}$$

C: fizikai állandók összevonása

$$C = \sqrt{\frac{18\eta}{2\pi\rho_1}} = \sqrt[3]{\frac{\eta}{\pi\rho_1}}$$

α, β : geometriai jellemzők

$$\alpha = \frac{r_1}{r_b} \quad \beta = \sqrt[2]{\frac{AB}{h}}$$

A valóságban fennálló összefüggés a következő : $w_b r^m = \text{állandó}$, ami közelítő számításra alkalmazható az alábbi módon:

$$d_{\text{hip}} \cong d_h = C\alpha_m \beta w_b^{-0,5} = C\alpha^m \beta_1 D^{0,5} w_b^{-0,5}$$

$$\beta_1 = \sqrt{\frac{ab}{c}} \quad a = \frac{A}{D}; \quad b = \frac{B}{D}; \quad c = \frac{h}{D}$$

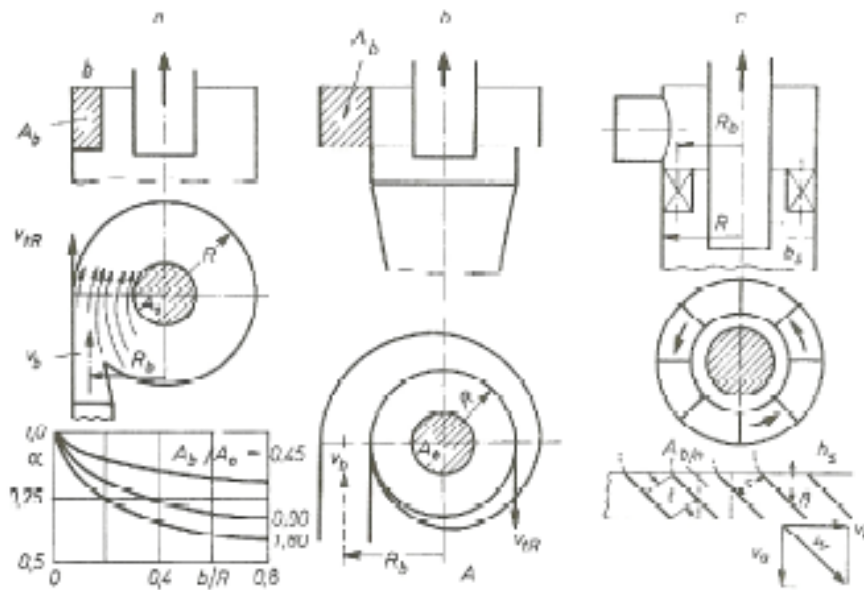
Az m értéke bizonytalan a kontrollfelületen, függ az $\alpha = r_1/r_b$ viszonytól és a ciklon geometriai alakjától. Ciklonban $\alpha = 0,8 \dots 0,3$ közötti érték m pedig $0,9 \dots 0,5$ közötti. Ter Linden kísérleteivel korrigálta Feifel képletét. Úgy gondolta, hogy az egyensúlyi állapot szempontjából mérvadó maximális kerületi sebesség, amely εr_1 sugáron alakul ki, ahol $\varepsilon \cong 0,65$. Így a fenti d_{hip} kifejezésére szolgáló egyenlet a következőre változott:

$$d_{\text{hip}} \cong d_h = C\alpha^m \beta_1 D^{0,5} w_b^{-0,5}$$

$$\alpha_1 = 0,65\alpha = 0,65 \frac{r_1}{r_b}$$

4.5. A Barth elmélet

$v_t r^n = \text{állandó}$ összefüggést gondolták át a Barth iskolában. Hangsúlyt fektettek a belépő v_b sebesség és az R sugáron a keringés v_{tR} sebesség viszonyára. Az ellenállást osztva számolták, amelyhez a maximális v_{to} tangenciális sebesség meghatározására is szükség van. A belépéstől a gázelvező csőig terjedő rész összes ellenállását egy közepes sugarú henger felületére fókuszálva számolták ($R_{köz} = \sqrt{R * R_0}, h_0$). Az ellenállás második részét a gázelvező csövön keresztüli kiáramlás súrlódás vesztesége adja.



8. ábra: Gázbelépés a ciklonba

[2., 398. oldal]

Az 8. ábra a leggyakoribb gázbevezetési kialakításokat mutatja. Az első kép (a), egy tangenciális csontot mutat. Az A_b keresztmetszeten v_b közepes sebességgel poros gázáram áramlik be, majd az R sugarú ciklonban összehúzódik és v_{tr} sebességre felgyorsul. A leválasztó tér R sugarához egy M_r impulzusnyomaték tartozik, ami az összehúzódás miatt különbözik a belépő keresztmetszethez tartozó M_b impulzusnyomatéktól. A két impulzusnyomaték aránya adja meg, az 1-nél kisebb α korrekciós tényezőt:

$$\alpha = \frac{M_b}{M_r} = \frac{\rho Q v_b R_b}{\rho Q v_{tr} R} = \frac{v_b R_b}{v_{tr} R}$$

Ebből az előző képletből v_{tr} kifejezve:

$$v_{tr} = \frac{1}{\alpha} * v_b * \frac{R_b}{R}$$

A második kép (b), egy másik leggyakoribb gázbevezetési kialakítást ábrázol, ami a bevezető spirál. Ennél a kialakításnál a tangenciális csonttól eltérően nincs összehúzódnás. Az áramlást falsúrlódás fékezi le. Muschelknautz szerint az α korrekciós tényező az alábbiak szerint módosul:

$$\alpha = \frac{M_b}{M_R} = 1 + \sqrt{3}\pi\lambda \frac{R_b}{\sqrt{A_b}}$$

ahol λ a fal és a gázáram közötti súrlódási tényező értéke 10^{-1} és 10^{-3} között változik.

A harmadik képen (c), látható gázbevezetési kialakítás a multiciklonok körében elterjedt túlnyomórészt azoknál használatos. Ennél a kialakításnál a poros gázáramot axiálisan vezetik be és perdítőelemekkel, vezetőlapátok segítségével hozzák létre a forgó áramot. Az impulzusnyomaték (M_0) az R_0 sugarú hengerfelületen M_R -nél M_L súrlódási nyomatékkal kisebb.

A Barth-féle modell a súrlódás $R_{köz}$ sugarú és h_0 magasságú hengeres felületen van összpontosítva. A felület előtt és után veszteségmentes az áramlás és a henger felületén sebességkülönbség lép fel. Barth és társai a h magasságú hengerfelületre koncentrálják a súrlódást.

R_0 sugáron a maximális tangenciális sebesség az következő:

$$v_{t0} = v_{tR} * \frac{\frac{R}{R_0}}{1 + \lambda * \frac{h}{R_0} * \frac{R}{R_0} * \frac{v_{tR}}{v_0}} = \frac{v_0}{\frac{A_b}{A_0} * \frac{R_0}{R_b} * \alpha + \lambda * \frac{h}{R_0}}$$

ahol $\lambda \approx 0,005(1 + 3\sqrt{\mu})$ és μ a gáz porterhelése tömegarányban.

4.6. A ciklon nyomásvesztesége

• Barth szerint a ciklon nyomásveszteségét (Δp) két tényező segítségével tudjuk megadni. Az egyik a leválasztó tér vesztesége (Δp_1), a másik a gázelvezető cső vesztesége (Δp_2). Az előző megállapítás szerint: $\Delta p = \Delta p_1 + \Delta p_2$.

Barth szerint a leválasztó tér vesztesége a tangenciális sebességre vonatkoztatva az alábbiak szerint írható fel:

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta p_1}{v_{t0}^2 * \frac{\rho}{2}} = \frac{R_0}{R} * \left[\frac{1}{\left(1 - \frac{v_{t0}^2}{v_0^2} * \frac{h}{R_0} * \lambda\right)^2} - 1 \right]$$

v_0 az átlagos kiömlési sebességre vonatkoztatva:

$$\xi_I = \frac{\Delta p_1}{v_0^2 * \frac{\rho}{2}} = \frac{R_0}{R} \left(\frac{v_{t0}}{v_0} \right)^2 * \left[\frac{1}{\left(1 - \frac{v_{t0}}{v_0} * \frac{h}{R_0} * \lambda\right)^2} - 1 \right]$$

A nyomásveszteség kisebb lesz, ha a bevezető spirált alkalmazunk. Az R_0 sugarú csövön való kiömlésnél adódik a nyomásveszteség második része. Általában itt azt feltételezik, hogy a gáz a fal melletti keskeny gyűrűkeresztmetszeten áramlik kifelé. Ebből kifolyólag a v_0 átlagos sebesség kisebb lesz, mint a valódi sebesség. A veszteség második részének dimenzió nélküli formája az alábbi:

$$\varepsilon_{II} = \frac{\Delta p_{II}}{v_{t0}^2 * \frac{\rho}{2}} = 2 * \left(\frac{v_0}{v_{t0}} \right)^2 + 3 * \left(\frac{v_0}{v_{t0}} \right)^{2/3} + 1$$

$$\xi_{II} = \frac{\Delta p_{II}}{v_0^2 * \frac{\rho}{2}} = 2 + 3 * \left(\frac{v_{t0}}{v_0} \right)^{4/3} + \left(\frac{v_{t0}}{v_0} \right)^2$$

Pontossága $\pm 12\%$, de az értéke kúpos és lekerekített belépőnyílású gázelvezető csőnél kisebb. Ha $\frac{v_{t0}}{v_0} < 2$, a $Re_{R0} = D_0 v_0 \frac{\rho}{\eta}$.

A teljes nyomásesés egység nélküli alakja:

$$\varepsilon = \varepsilon_I + \varepsilon_{II} \quad \text{ill.} \quad \xi = \xi_I + \xi_{II}$$

A teljes nyomásesés:

$$\Delta p = (\varepsilon_I + \varepsilon_{II}) * \frac{\rho}{2} * v_{t0}^2 = (\xi_I + \xi_{II}) * \frac{\rho}{2} * v_0^2$$

• J. Chen, M Shi szerint a ciklon nyomásvesztesége a következő 4 részből tevődik össze: tágulási veszteség a belépő csornánál (ΔP_1) összehúzódsági veszteség a gázelvezető cső bejáratánál (ΔP_2), örvénylési veszteség a gáz-fal közötti súrlódásból adódóan (ΔP_3) a gáz dinamikus energiájának szóródási vesztesége a gázelvezető csőben (ΔP_4).

A össznyomásveszteség a fent említettek összegéből adódik:

$$\Delta P = \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3 + \Delta P_4$$

ΔP_1 – a tágulási veszteség a belépő csornánál:

$$\Delta P_1 = \left(1 - \frac{2k_i b'}{1 + 1,33b' - d'_r}\right)^2 * \frac{\rho v_b^2}{2}$$

$$b^1 = b/D \quad d'_r = D_0/D$$

ΔP_2 – összehúzódsági veszteség a gázelvezető cső bejáratánál:

$$\Delta P_2 = 4,5 * \frac{(1 - 3d_r'^2)}{K_A^2} * \frac{\rho v_b^2}{2}$$

$$K_A = D^2 * \frac{\pi}{4} * a * b$$

ΔP_3 – örvénylési veszteség:

$$\Delta P_3 = 1,11 * \gamma * K_A * F'_s * v_{tR}'^3 * d_r'^{-1,5n} * \frac{\rho v_b^2}{2}$$

$$F'_s = 1 - d_r'^2 + 4d'_r S' + 4H' + (1 + d'_d) * \sqrt{4H_2'^2 + (1 - d'_d)^2}$$

$$v_{tR}' = \frac{1,11 K_A^{-0,21} * d_r'^{0,16} * Re^{0,06}}{1 + \gamma * F'_s * \sqrt{K_A * d_r'}}$$

$$Re = \frac{\rho * v_b * D}{\mu * K_A * d_r'}$$

$$n = 1 - e^{-0,25 * Re^{0,12} * (1 + |\frac{S-a}{b}|)^{-0,5}}$$

$$S' = S/D ; H_1' = H_1/D ; d_d' = d_d/D ; H_2' = H_2/D$$

ΔP_4 – szóródási veszteség:

$$\Delta P_4 = \left[\frac{v_{tR}'^2}{(r_c' * d_r')^n} + \frac{1}{K_A^2 (d_r'^2 - r_c'^2)^2} \right] * \frac{\rho v_b^2}{2}$$

$$r_c' = 0,38 * d_r' + 0,5 * d_r'^2$$

Az össznyomásveszteség a részveszteségek összegéből adódik, de az összehúzóási veszteség a gázelvező cső bejáratánál a teljes nyomásveszteség kevesebb, mint 1 %-át alkotja, így az a tag elhanyagolható. E megállapítás a szerint a teljes nyomásveszteséget az alábbi képlet szerint lehet megadni:

$$\Delta P = \left[\left(1 - \frac{2k_i b'}{1 + 1,33b' - d_r'} \right)^2 + 1,11 * \gamma * K_A * F_s' * v_{tR}'^3 * d_r'^{-1,5n} + \frac{v_{tR}'^2}{(r_c' * d_r')^n} + \frac{1}{K_A^2 (d_r'^2 - r_c'^2)^2} \right] * \frac{\rho v_b^2}{2}$$

- Dirgo összefüggése a nyomásveszteség kiszámítására: [4.]

$$\Delta P = \left(20 * \frac{ab}{D_0^2} * \left[\frac{S/D}{\left(H/D * H_1/D * d_d/D \right)} \right]^{\frac{1}{3}} \right) * \frac{\rho v_b^2}{2}$$

- First elmélete az össznyomásveszteség megadására: [4.]

$$\Delta P = \frac{ab}{D_0^2} * \frac{24}{\left[\frac{H_1 * (H - H_1)}{D^2} \right]^{\frac{1}{3}}} * \frac{\rho v_b^2}{2}$$

- Casal és Martinez egyenlőse a nyomásvesztés számítására[4.]:

$$\Delta P = \left[11,3 * \left(\frac{ab}{D_0^2} \right)^2 + 3,33 \right] * \frac{\rho v_b^2}{2}$$

- Shepherd és Lapple egyenlete a nyomásvesztés megadására[4.]:

$$\Delta P = \frac{16ab}{D_0^2} * \frac{\rho v_b^2}{2}$$

- Stairmand által javasolt összefüggés[4.]:

$$\Delta P = \left\{ 1 + 2 * \theta^2 * \left[\frac{2 * (D - b)}{D_0} - 1 \right] + 2 * \left(\frac{4ab}{\pi D_0^2} \right)^2 \right\} * \frac{\rho v_b^2}{2}$$

$$\theta = \frac{\left[\frac{D_0}{2(D - b)} + \frac{4\gamma A}{ab} \right]^{\frac{1}{2}} - \left[\frac{D_0}{2(D - b)} \right]^{\frac{1}{2}}}{\frac{2\gamma A}{ab}}$$

$$A = \frac{(D^2 - D_0^2)\pi}{4} + D\pi H_1 + D_0 S\pi + \frac{(D + d_d)\pi}{2} * \left[(H - H_1)^2 + \left(\frac{D - d_d}{2} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

- Alexander által publikált összefüggés [4.]:

$$\Delta P = 4,62 * \left(\frac{ab}{D * D_0} \right) * \left[\left(\left(\frac{D}{D_0} \right)^{2n} - 1 \right) * \left(\frac{1 - n}{n} \right) + f_g * \left(\frac{D}{D_0} \right)^{2n} \right] * \frac{\rho v_b^2}{2}$$

$$n = 1 - 0,67 * D^{0,14} * \left(\frac{T}{283} \right)^{0,8}$$

$$f_g = 0,8 * \left[\frac{1}{n(1 - n)} * \frac{4 - 2^{2n}}{3} - \frac{1 - n}{n} \right] + 0,2 * \left[(2^{2n} - 1) * \frac{1 - n}{n} + 1,5 * 2^{2n} \right]$$

4.7. A ciklon ellenállása

A ciklon ellenállásának pontos megadására megfelelő módszer még nem ismert, mert a ciklonokban komplikált folyamatok játszódnak le. Stairmand, Shepherd, Lapple, ter Linden és Barth különböző képleteket dolgoztak ki.

Barth módszere terjedt el leginkább, ami a következő: ha

$$\Delta p = \Delta p_{th} \quad \text{és} \quad \zeta = \frac{2\Delta p}{\rho_g * w_b^2}$$

ahol ζ a befúvónyílásban levő sebességre vonatkoztatott ellenállás tényező és w_1 az elvezető cső belépő keresztmetszeti sebességére vonatkoztatott ξ -vel jelölt ellenállás tényező:

$$\xi = \frac{2\Delta p}{\rho_g * w_1^2}$$

Továbbá bevezetésre került az ε -nal jelölt veszteségáram (jóságfok):

$$\varepsilon = \frac{2\Delta p}{\rho_g * w_{t1}^2}$$

ahol w_{t1} a maximális tangenciális sebesség a porkiválasztás szempontjából.

Az ellenállást a kontroll felület előtti leválasztó tér ellenállása (Δp_e) és a Δp_k elvezető cső ellenállásának össznymásvesztesége alkotja:

$$\Delta p_{\bar{o}} = \Delta p_e + \Delta p_k \quad ; \quad \xi_{\bar{o}} = \xi_e + \xi_k \quad ; \quad \zeta_{\bar{o}} = \zeta_e + \zeta_k$$

$$\Delta p_e = \frac{\rho}{2} * \frac{w_2^2 r_2}{r_1} - \frac{\rho_g}{2} * \frac{w_1^2 r_1}{r_2} \quad ; \quad \Delta p_k = \frac{\rho_g}{2} * w_{tl}^2 * \left[1 + \frac{K}{\left(\frac{w_{tl}}{w_1} \right)^2} \right]$$

A kísérletekből a következőket állapították meg K értékére:

- élesfalú merülőcső esetén, ahol $\frac{w_b}{w_1} \geq 1$, akkor $K = 4,4$
- legömbölyített merülőcső esetén, ahol $\frac{w_b}{w_1} \geq 1$, akkor $K = 3,4$

Ezen fenti megállapítások alapján a nyomásveszteség számításának képlete az alábbiak szerint módosul:

$$\Delta p_{\delta} = \frac{\rho g}{2} * w_{tl}^2 * \left[\frac{r_1}{r_2} * \left(1 - \frac{w_{tl}}{w_1} * \frac{h}{r_1} * \lambda \right)^{-2} + K \left(\frac{w_{tl}}{w_1} \right)^{\frac{-2}{3}} + 1 \right]$$

4.8. A por hatása a ciklon működésére

A gépi berendezések kopáskárai jelentősek lehetnek. Ezeket a kopásokat hatásmechanizmusuk alapján tudjuk csoportosítani a következők szerint:

- adhéziós (csúszó)
- abráziós (ledörzsölő)
- lefáradásos
- kémiai – és korróziós kopás

Ezek az előbb említett hatások rendszerint együttesen jelentkeznek. Az áramló gázokban található szilárd szemcsék koptató hatása a szilárd anyag koncentrációjától és a gáz sebességétől függ. A por ottléte komplikált folyamatokat eredményez, amelyek nehézséget okoznak. A por befolyását teljesen még nem sikerült tisztázni, de azt megállapították, hogy a ciklonformától és annak nagyságától függ a befolyásoló hatása.

Nagy fajlagos felületű kis ciklonban a falhatások jobban érvényesülnek. Mérések bizonyították, hogy a d_1/D viszonyszám megváltoztatásával kis koncentrációk esetén egy 400 mm átmérőjű normál ciklonban, észrevehető ellenállás-tényezőváltozást tapasztalhatunk.

5. A ciklonok modellezése CFD szoftver segítségével

Napjainkban a ciklonok tanulmányozásánál a végeselem-módszer játszik nagy szerepet. Nem mindig adnak megfelelő eredményt az egyes paraméterek kiszámításánál az egzakt számítási módszerek. Ennek következményeként az utóbbi évtizedekben a numerikus áramlástani modellek, az úgynevezett CFD szimulációs szoftverek kerültek előtérbe a ciklonok vizsgálatánál.

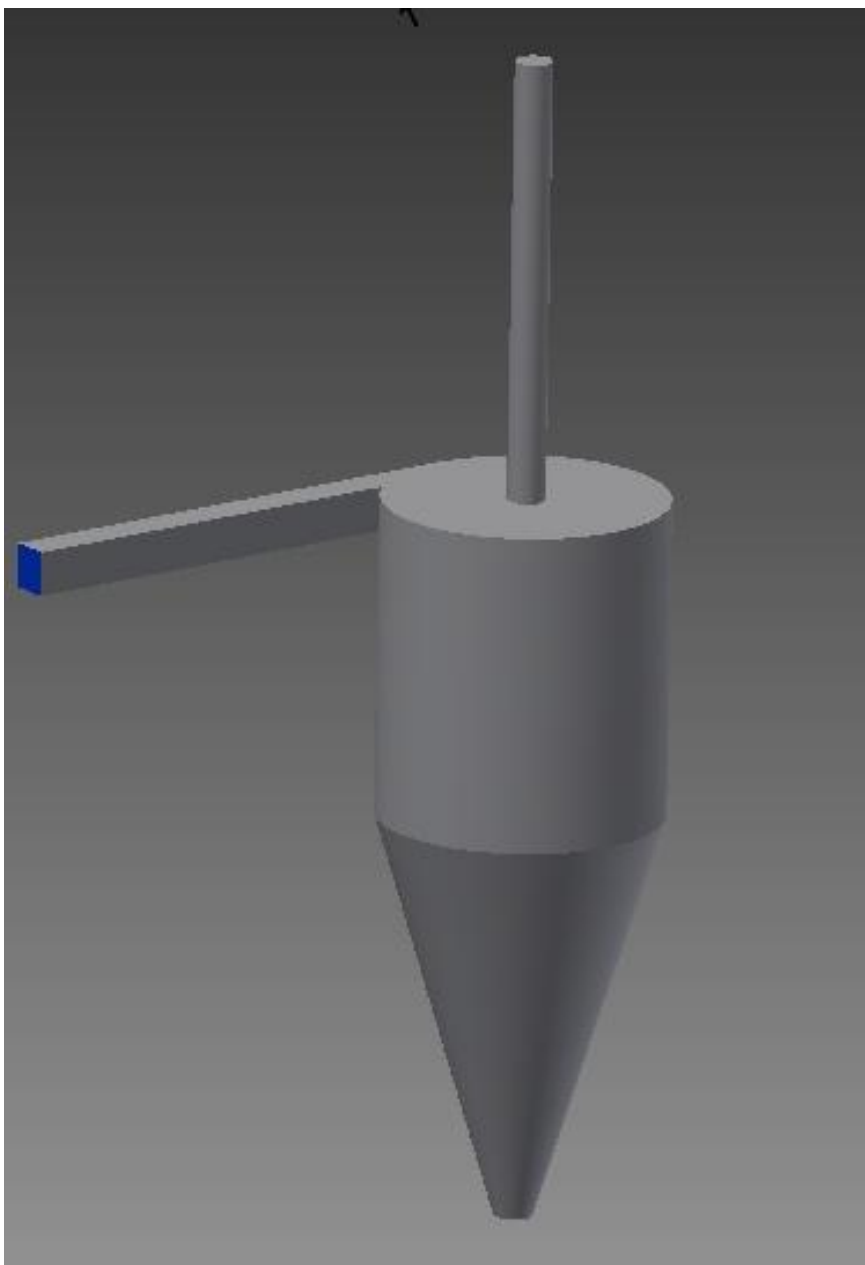
A CFD modellek a matematikai modellek egy alcsoportja, de manapság már külön tudományágnak tekinthetők. Ezek a numerikus áramlástani modellek numerikus metódusokat és algoritmusokat használnak a fluidumokkal kapcsolatos áramlástani problémák megoldásához, vagy néhány esetben az analizálásukhoz. Az ilyen szimulációs szoftverekkel elvégzett számítások pontosabbak, valamint olyan tényezőket sem hagynak figyelmen kívül, mint a magas hőmérséklet, az áramló fluidum több neműsége vagy a szokványostól eltérő geometria.

A ciklonokban kialakuló áramlás erősen turbulens. Az ilyen típusú áramlások modellezésére jó néhány módszer létezik, amelyeket turbulencia modelleknek nevezünk. Egy áramlástani feladat megoldásához kritikus fontosságú a megfelelő modell kiválasztása, hiszen a rossz turbulencia modell választásakor könnyen rossz eredményt kaphatunk. A ciklonok áramlási jellege erősen örvénylő, ezért olyan modellt szükséges használnunk, amely illik erre a feladatra. Az alábbiakban ismertetett geometriájú ciklon (2. táblázat) modellezésénél az SST k-OMG modellt alkalmazzuk az SC-Tetra szoftver segítségével.

2. táblázat: Ismert ciklon paramétereit és jelölésük

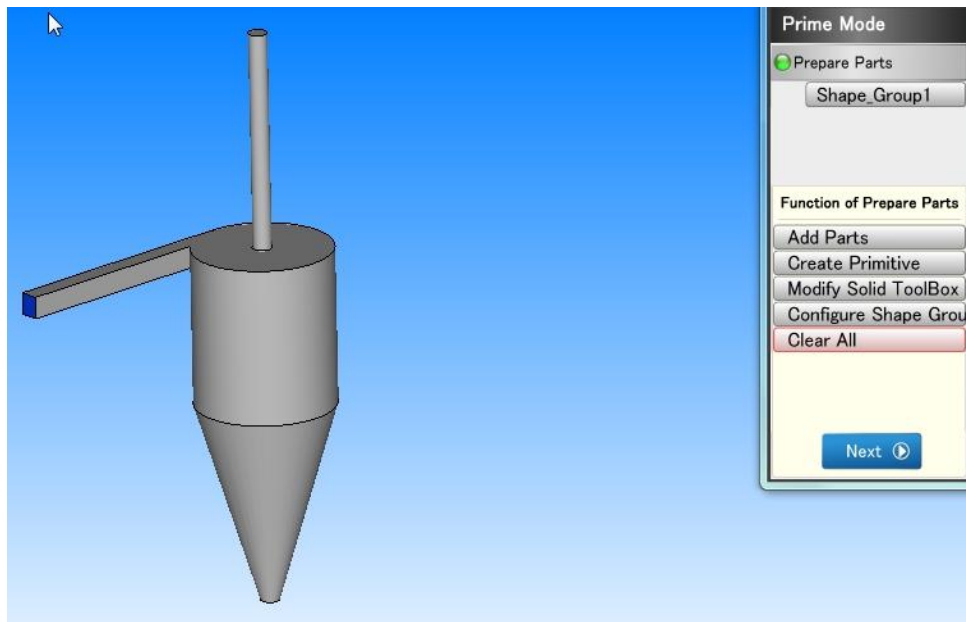
Adatok			
Megnevezés	Jele	Mért.e.	Mért érték
Belépőcsanak hossza	a	m	0,06
Belépőcsanak szélessége	b	m	0,07
Ciklon átmérője	D	m	0,45
Tágulási veszteség korrekciós tényezője	k_i	-	0,3
Gázvezető cső sugara	r_e	m	0,03
Ciklon sugara	R	m	0,225
Súrlódási tényező (tiszt gáz - fal)	f_0	-	0,005
Gázvezető cső benyúló hossza	S	m	0,05
Ciklon hengeres részének hossza	H_1	m	0,505
Porevezető csanak átmérője	d_c	m	0,06
Ciklon kúpos részének hossza	H_2	m	0,645
Gáz sűrűsége	r	kg/m ³	1,2
Gáz belépési sebessége	v_i	m/s	5
Gáz dinamikai viszkozitása	m	Pas	1,8E-05
Porterhelés	C_i	kg/m ₃	1
Gázvezető cső átmérője	D_e	m	0,06
Gáz hőmérséklete	T	K	293,15
Ciklon teljes hossza	H	m	1,15

A ciklonban végbemenő áramlás szimulációjának első lépése az, hogy megrajzoljuk a 2. táblázat által összefoglalt ismert ciklon paramétereiből, CAD szoftver segítségével a ciklon geometriáját. Itt fontos megjegyezni, hogy a modell elkészítése során nem a ciklont rajzoljuk meg, hanem az áramlási teret, mivel az áramlási folyamatok itt zajlanak le. A Solid Edge CAD szoftverben megrajzott geometria rajza az alábbi, 9. ábrán látható.



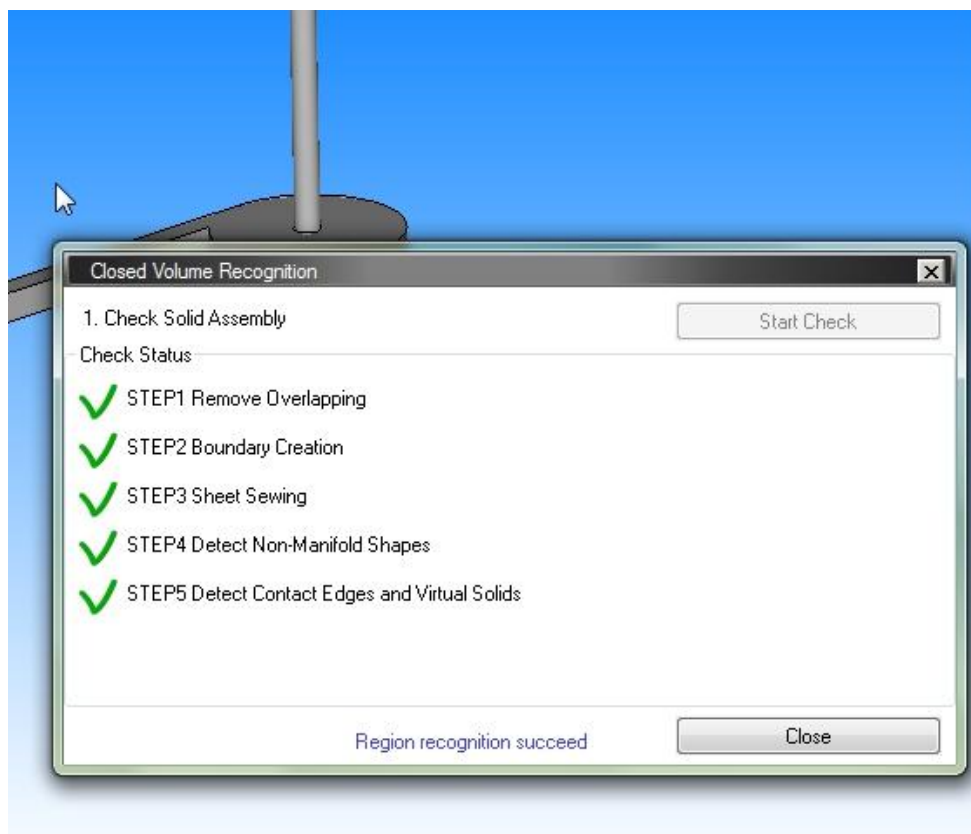
9. ábra: Ciklon geometriai modell (Solid Edge CAD)

Az elkészített geometriai modell importálása a Sc/Tetra programrendszer geometriai feldolgozójába (Prime Mode) (10. ábra).



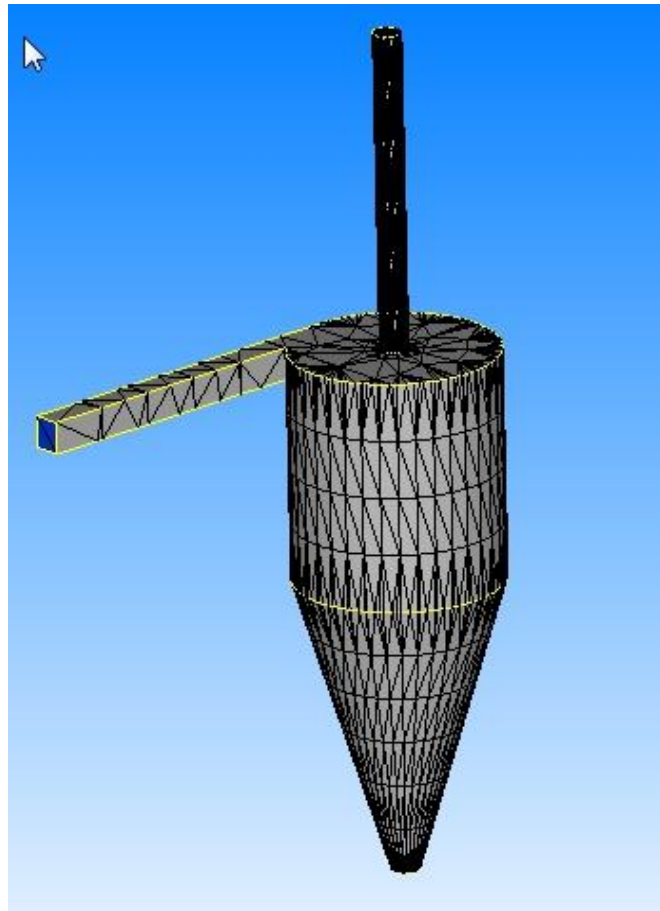
10. ábra: Importálás a geometriai feldolgozóba

Zárt térfogatok felismerése a Prime Mode környezetében (11. ábra).



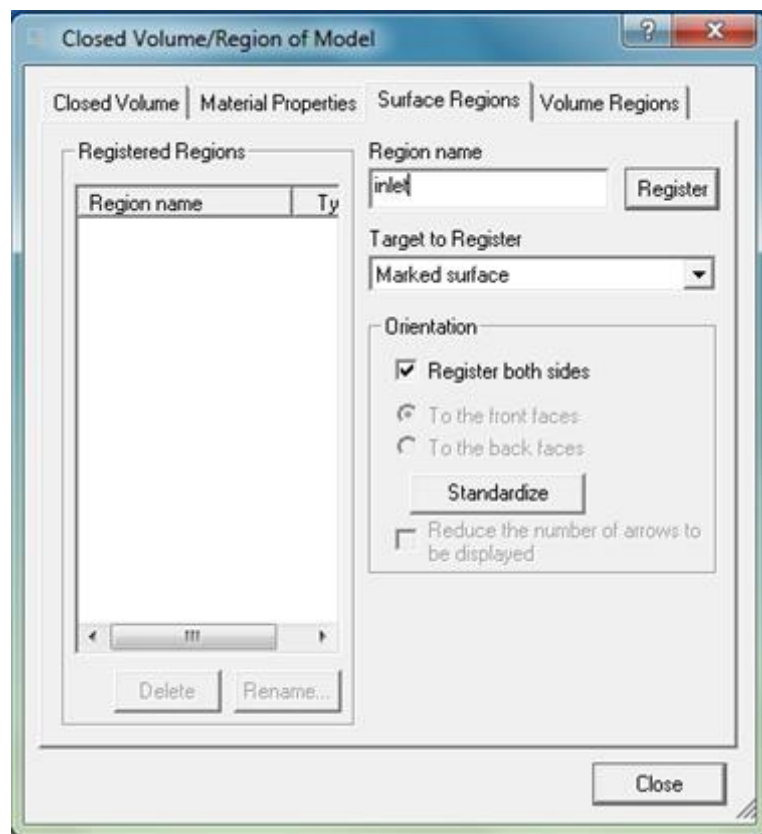
11. ábra: Zárt térfogat felismerése

Szimuláció megkezdéséhez szükséges .mdl kiterjesztésű geometriai fájl előállítása (12. ábra).

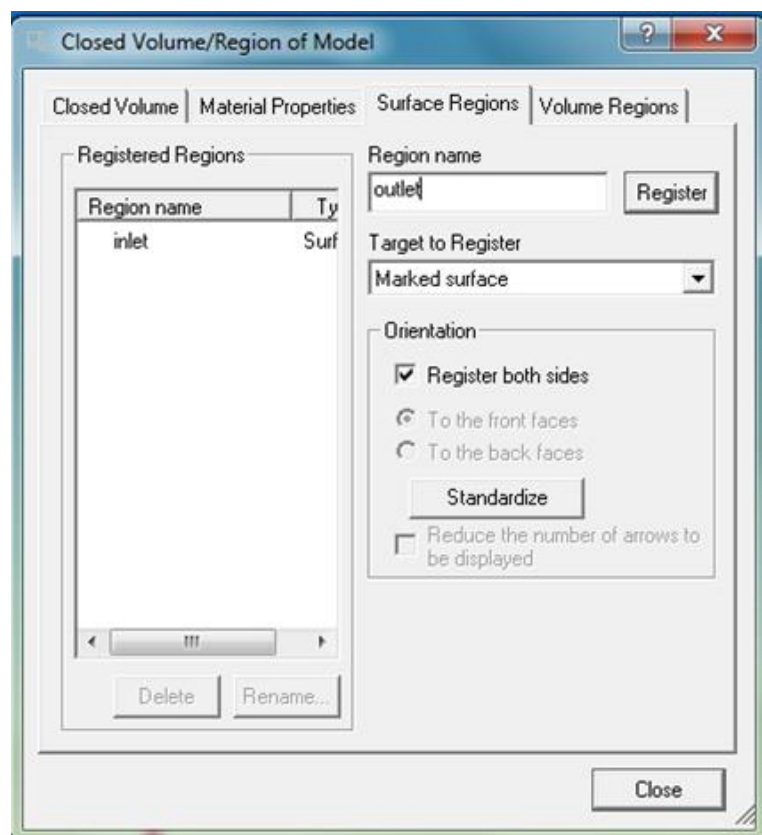


12. ábra: .mdl kiterjesztésű geometriai fájl

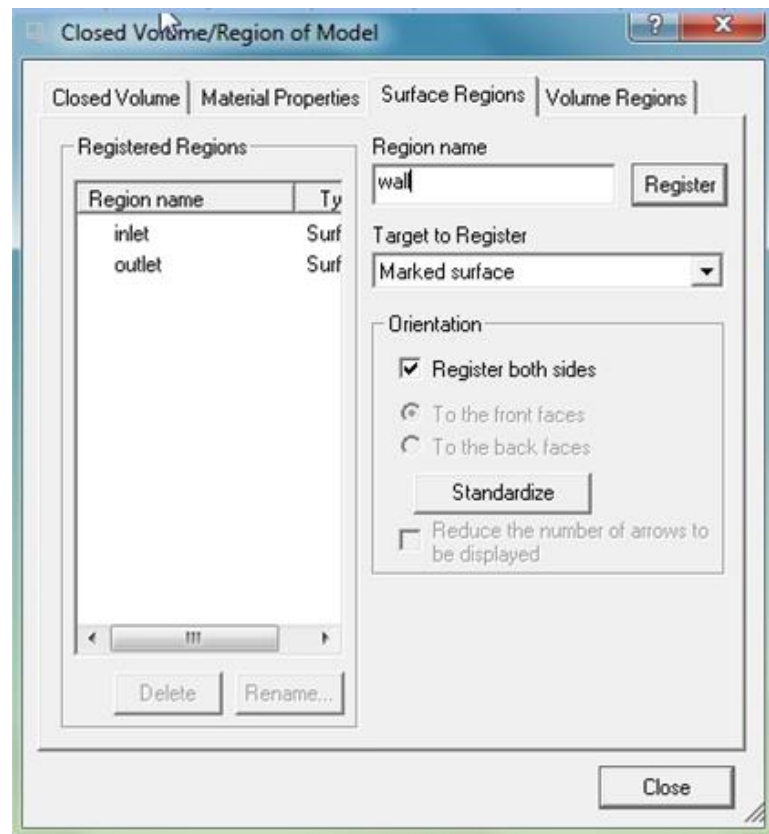
Az előfeldolgozó módban van lehetőség, azon felületek megadására, ahol valamilyen peremfeltételt kell figyelembe venni a szimulációnál. Az alábbi 13, 14, 15. ábrákon látható, hogy a bemenet, kimenet és fal felületeket jelöltem meg, ahol a későbbi beállításokban peremfeltétel értékeket fogok megadni.



13. ábra : Inlet felület megjelölése

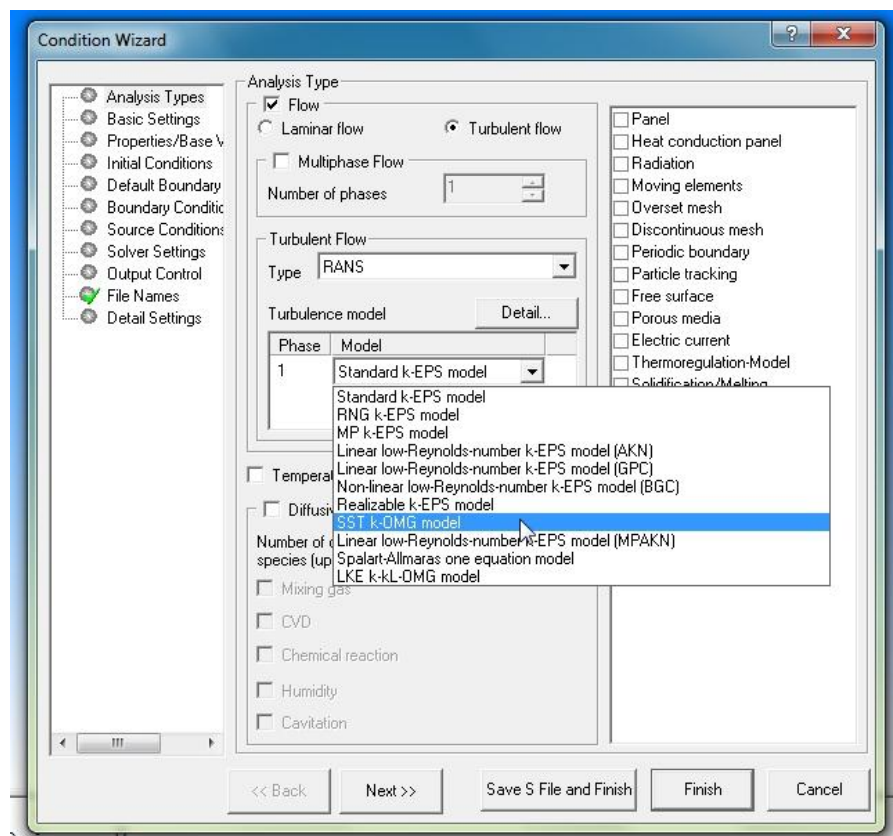


14. ábra: Outlet felület megjelölése

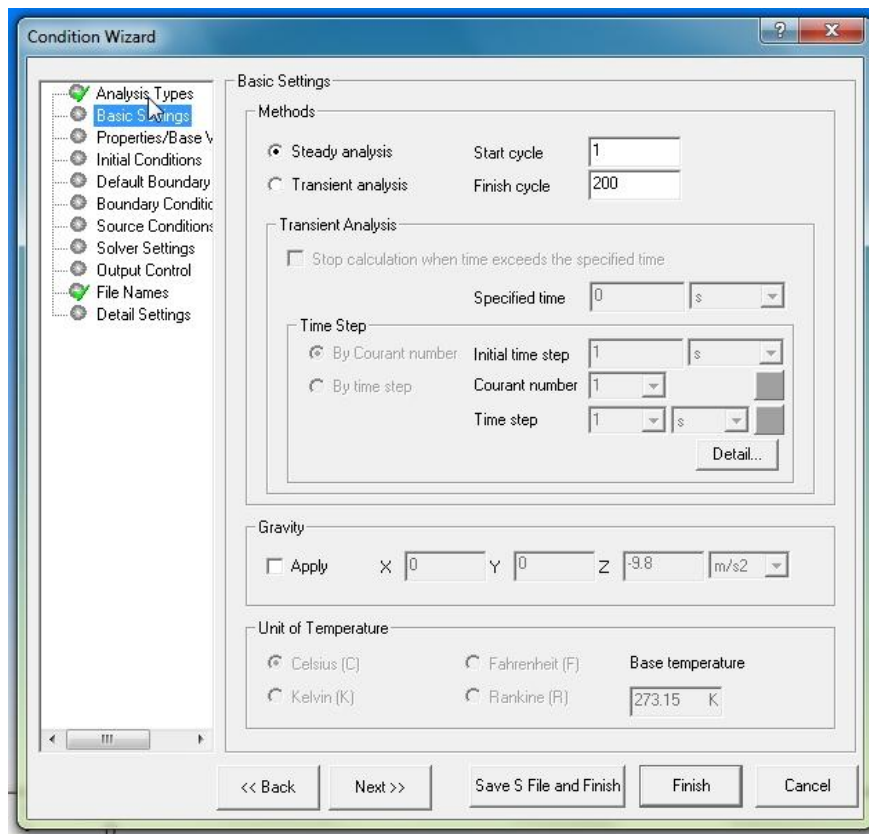


15. ábra: Wall felület megjelölése

A felületek megjelölését követően a további beállításokat végeztünk, amik a szimuláció elindításához nélkülözhetetlenek. Kiválasztottuk a turbulencia modellt, ami az SST k- ω model (16. ábra). Továbbá állandósult állapotot (steady analysis) választottunk, mert állandósult állapotban szeretnénk nyomásvesztést meghatározni (17. ábra).

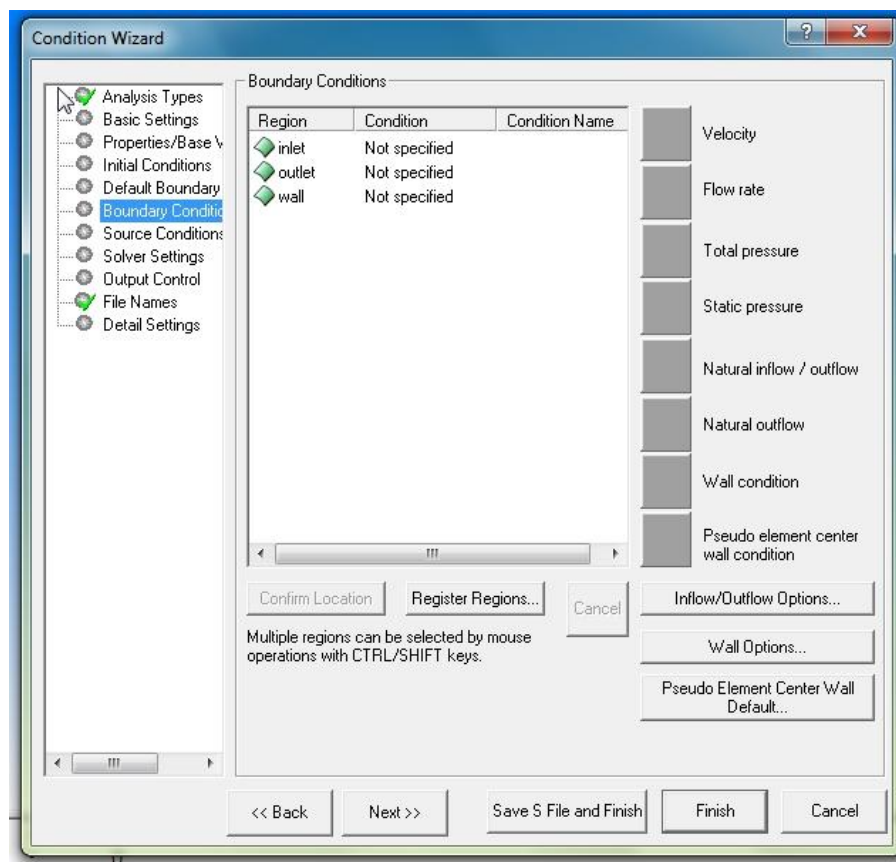


16. ábra: Turbulencia modell választása



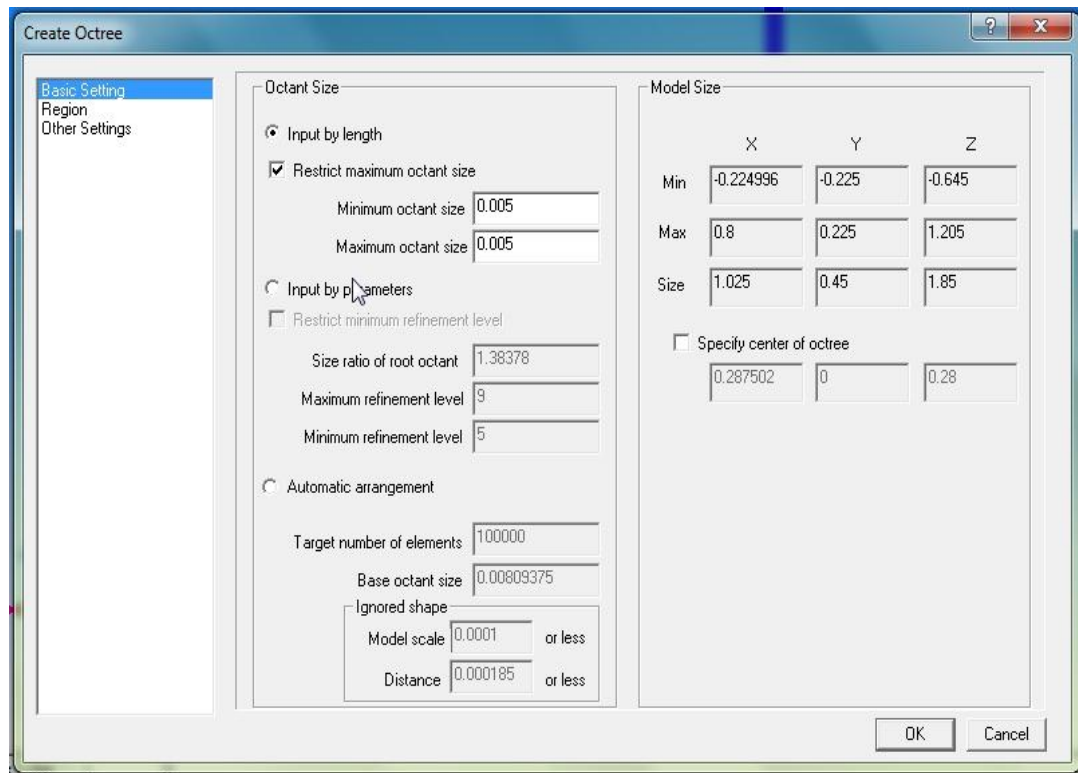
17. ábra: Állandósult állapot választása

A korábban megjelölt felületek (13, 14, 15. ábra) peremfeltételeinek megadására most nyílik lehetőség. A 18. ábra egy peremfeltétel összefoglaló lap, ahol az egyes fűlek megnyitásakor van lehetőségünk értékeket megadni. Nyomáskülönbség hajtotta áramlásoknál a tipikus peremfeltétel kombináció a következő: kezdeti feltételként előírjuk a belépőcsonkbeli átlagsebességet, ami ebben az esetben 5 m/s. Ahhoz hogy a ciklon nyomásveszteségét a szimuláció befejeztével le tudjuk olvasni, peremfeltételként a gázelvező csonek végén a nyomás értékét zérusnak kell venni. A wall egy nem átjárható, állandó fal.



18. ábra: Peremfeltétel összefoglaló lap

A feltételek megadását követően lehetőségünk nyílik a végeselemes háló elkészítésére. A hálózás elkészítésénél lehetőségünk van megadni, hogy milyen méretű kockákból építse fel a szoftver az előzőekben megadott geometriájú ciklont. Ebben az esetben 0,005 m élhosszúságú kockára bontást választottuk (19. ábra), mely azt eredményezte, hogy közel 8 millió előbb említett elemi méretű kockából lehet felépíteni a ciklonunkat (20. ábra).

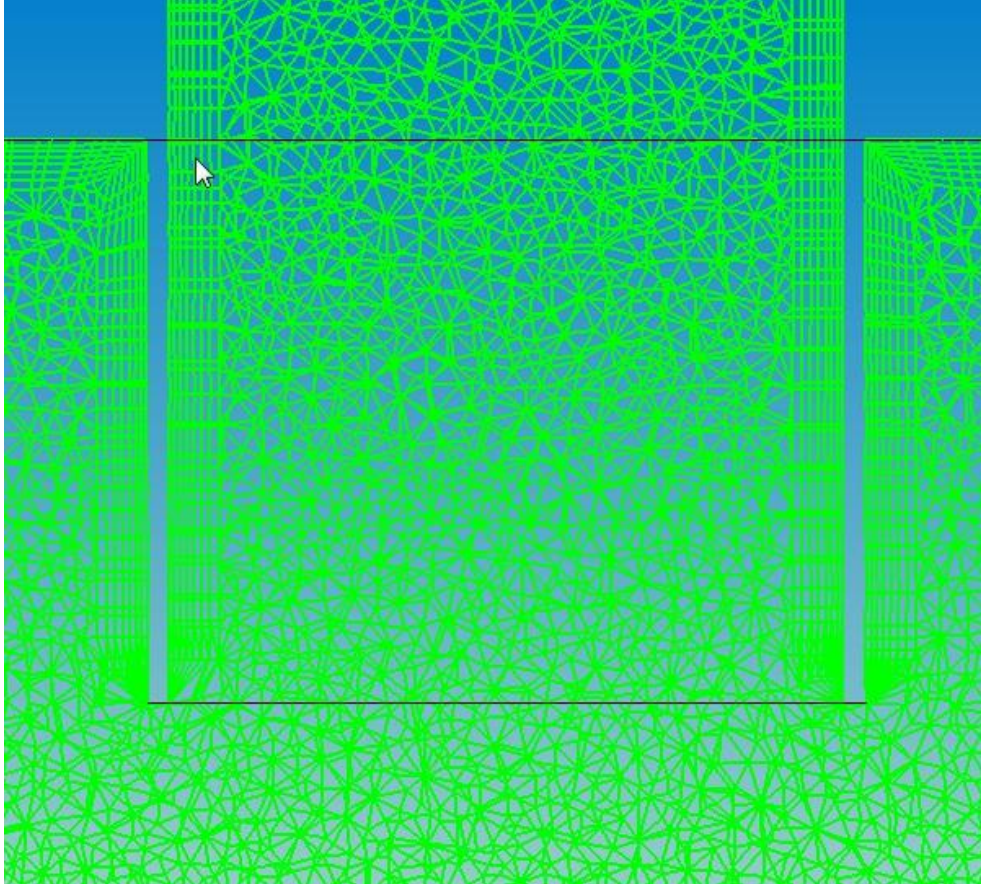


19. ábra: Végeselem háló kocka méret megadása

Octants	1061710
Displayed	1061710
Elements	7933066
Displayed	7933066
Nodes	1388820

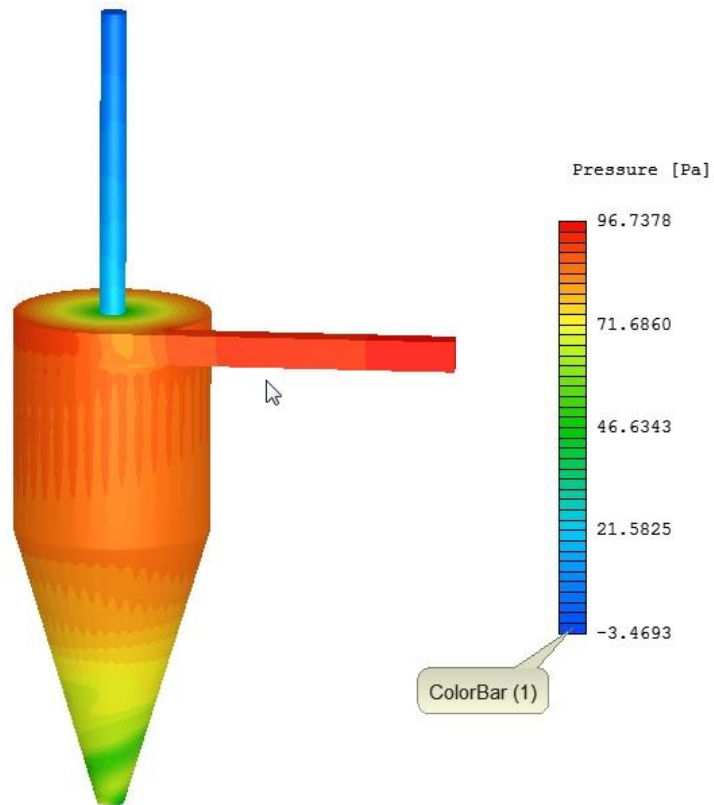
20. ábra: Végeselem háló eredménye

A 21. ábrán szemléltetem a végeselem módszerrel elkészült hálózást. Hálósűrítés figyelhető meg a kilépés környezetében. Jól látható a falakra elhelyezett prizmatikus hétrétegű elemek és a nem struktúrált tetraéder elemeket tartalmazó háló.

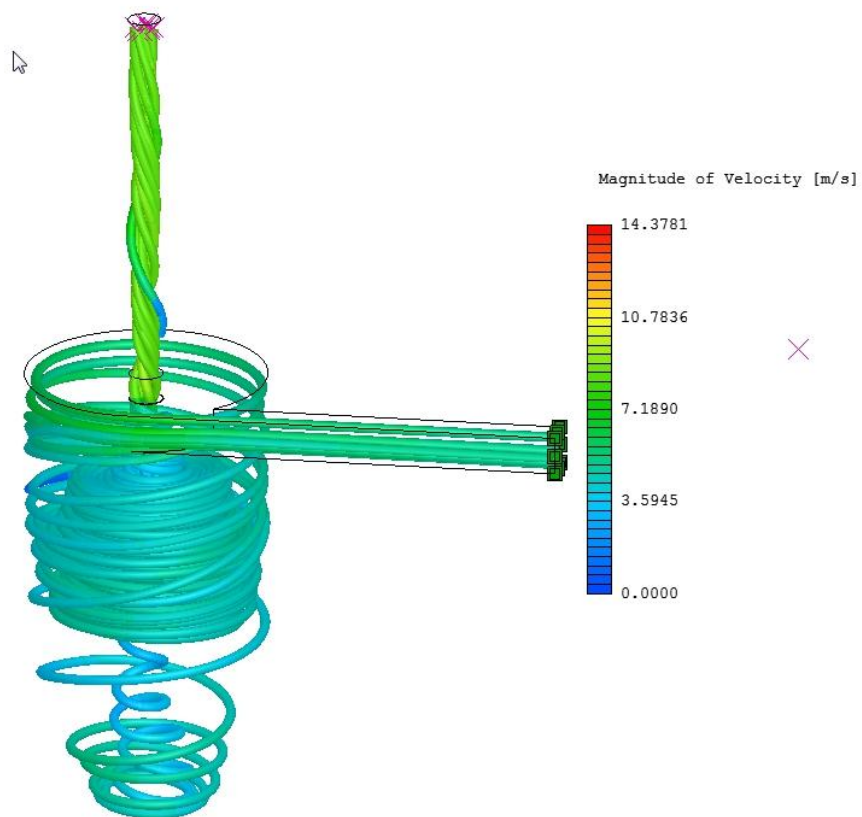


21. ábra: A hétrétegű prizmatikus háló a fal mentén

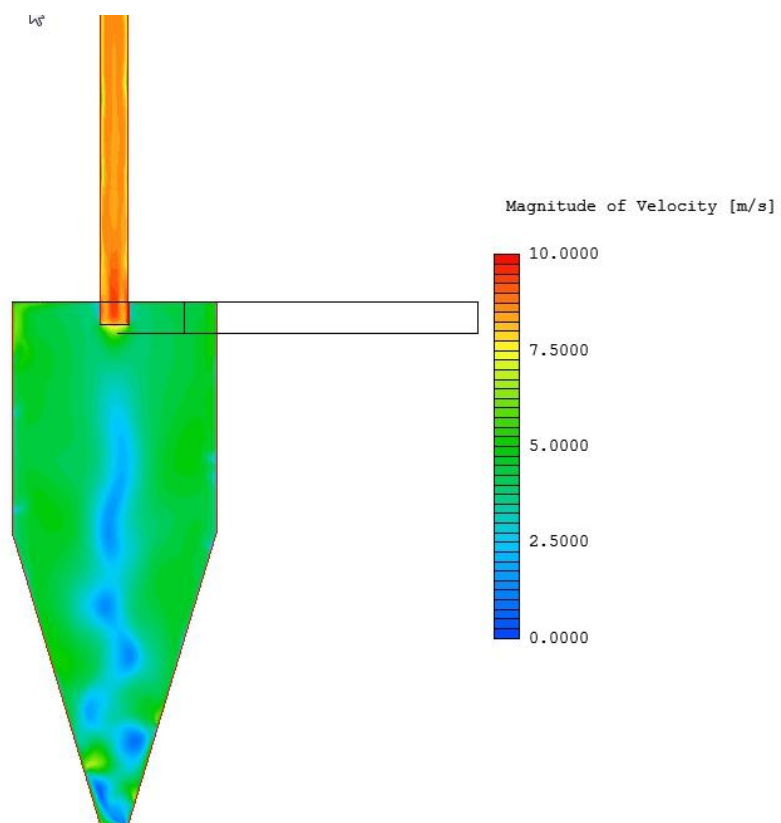
A következő néhány ábrán bemutatom a szimuláció végeredményét. Bemutatom a ciklon belsejében kialakuló nyomáseloszlást (22. ábra), az áramvonalakat (23. ábra) valamint a sebességmezőt (24. ábra).



22. ábra: Nyomáseloszlás a ciklon belsejében.



23. ábra: Áramvonalak a ciklon belsejében.



24. ábra: Sebességeloszlás a ciklonban

6. Összehasonlítás

Az alábbiakban a 4.6 fejezetben elméletek összehasonlítása látható egy ismert ciklon geometriára (2. táblázat) vonatkozólag.

3. táblázat: Nyomásveszteségek

Szerző	Nyomásveszteség (Pa)
Barth	667
J. Chen, M. Shi	198
Shepherd and Lapple	281
Alexander	168
Casal and Martinez	282
First	359
Stairmand	249
Dirgo	233
SC-Tetra	96

Eltérés oka: nem megfelelő finomságú háló alkalmazása nagymértékben befolyásolja a kapott végeredményt. A háló finomítása a számítási igényt növeli. A számításokat a Vegyipari Gépészeti Intézeti Tanszék laboratóriumában található számítógéppel végeztem (2x xeon 2Ghz, 8 mag, 16 GB Ram). Ezen hardver erősen korlátozta az alkalmazható elemszámot, ami esetünkben közel nyolc millió volt. A vizsgálatunkat meg kell ismételni egy kétszer ilyen finomságú hálón is. Abban az esetben, ha megfelelő tolerancián belül hasonló eredményt kapunk, akkor kijelenthető, hogy a megoldás hálófüggetlen.

7. Összefoglalás

A diplomamunkám keretein belül ismertettem a gáztisztítás műveletét és annak berendezéseit. Az ide vonatkozó szakirodalmat felhasználva vizsgáltam a ciklonok működését, áramlási viszonyait és szerkezeti kialakításait. Összefoglaltam a különböző elméletek szerinti nyomásveszteségek kiszámítására alkalmas összefüggéseket, valamint egy adott ciklon geometriára vonatkozóan alkalmaztam is azokat. Ismertettem továbbá a ciklonok ellenállásának és portalanítási fokának meghatározására szolgáló összefüggéseket és azok elméleti hátterét. Az adott ciklon geometriát megrajzoltam és elvégeztem a numerikus szimulációját a Solid Edge és SC-Tetra szoftverek segítségével. A szimuláció menetét összefoglaltam, továbbá az ezúton kapott és a számítással meghatározott nyomásveszteségi értékeket összehasonlítottam.

8. Summary

In the Thesis I have reviewed the procedure of dust cleaning and its devices. Using the relevant literature, I have examined the operation, flow conditions and structural performance of cyclones. I have summarized the correlations of various theories used to calculate pressure drop, and applied them for a given cyclone geometry. I have drawn the geometry of the cyclone and carried out its numerical simulation using Solid Edge and SC-Tetra. I have summarized the process of the simulation, and compared the pressure drop values given by the simulation and calculation methods.

9. Jelölésjegyzék

A	<i>ciklon belső felülete</i>	m^2
a	<i>belépőcsonk hossza</i>	m
A_0	<i>gázvezető cső keresztmetszete</i>	m^2
A_b	<i>belépő keresztmetszet</i>	m^2
b	<i>belépőcsonk szélessége</i>	m
C	<i>centrifugális erő</i>	m
d	<i>szemcseátmérő</i>	m
D	<i>ciklon átmérője</i>	m
D_0	<i>gázvezető cső átmérője</i>	m
d_d	<i>porelvezető csonk átmérője</i>	m
d_h	<i>határszemcse méret</i>	m
ΔP	<i>ciklon nyomásvesztesége</i>	Pa
F_S	<i>érintkező felület</i>	m^2
H	<i>ciklon teljes hossza</i>	m
H_1	<i>ciklon hengeres részének hossza</i>	m
H_2	<i>ciklon kúpos részének hossza</i>	m
K_A	<i>belépő keresztmetszet hányados</i>	-
k_i	<i>tágulási veszteség korrekciós tényezője ($k_i=0,3$)</i>	-
M_b	<i>belépő keresztmetszetbeli impulzusnyomaték</i>	$N \cdot m$
M_R	<i>R sugárhoz tartozó impulzusnyomaték</i>	$N \cdot m$
n	<i>örvénylési kitevő</i>	-
N	<i>gázáram keringésének száma a ciklonban</i>	-
Q	<i>térfogatáram</i>	m^3/s
r_c	<i>belső áramlás sugara a gázvezető csőben</i>	m
Re	<i>Reynolds-szám</i>	-
R_0	<i>gázvezető cső sugara</i>	m
S	<i>Stokes-féle közegellenállás</i>	N
S	<i>gázvezető cső benyúló hossza</i>	m
t	<i>szemcse ciklonban tartózkodásának ideje</i>	s
T	<i>hőmérséklet</i>	K
v_0	<i>gáz kilépési sebessége</i>	m/s
v_b	<i>gáz belépési sebessége</i>	m/s

v_t	<i>tangenciális sebesség</i>	<i>m/s</i>
v_{tR}	<i>tangenciális sebesség a ciklon falánál</i>	<i>m/s</i>
w_{050}	<i>a porteher közepes szemnagyságának ülepedési sebessége</i>	<i>m/s</i>
w_s	<i>ülepedési sebesség</i>	<i>m/s</i>
γ	<i>fal és a gázáram közötti súrlódási tényező ($\gamma=0,005$)</i>	<i>-</i>
μ	<i>gáz dinamikai viszkozitása</i>	<i>Pa*s</i>
ρ	<i>gáz sűrűsége</i>	<i>kg/m³</i>
ρ_s	<i>szemcse sűrűsége</i>	<i>kg/m³</i>

10. Irodalomjegyzék

- [1] : <http://slideplayer.hu/slide/2098197> ; (2014. november 3.)
- [2]: Fejes G. , Tarján G.; *Vegyipari gépek és műveletek*, Tankönyvkiadó, 1979.
- [3]: Dr. Koncz I.; *Portalanítás és porleválasztás*, Műszaki Könyvkiadó, 1982.
- [4]: Szűrös M.; *Ciklon nyomásveszteségének meghatározása*, 2012.
- [5]: Környezettechnika és menedzsment – oktatási segédlet, Budapest, 2002.
- [6]: Helmeczi R.; *Porleválasztó ciklonok vizsgálata*, 2010.
- [7]: Szepesi G., Siménfalvi Z.; Porleválasztó ciklonok nyomásveszteségének vizsgálata numerikus áramlástanai módszerekkel, International scientific conference on advances in mechanical engineering, Debrecen, 2013.
- [8]: <https://sites.google.com/site/cfdmodellezes/mi-az-a-cfd>; (2014. november 12.)