



Fluidizációs-porlasztásos granulálási technológiák méretnövelését segítő szimulációs modell kialakítása

Varga¹ M., Balogh¹ S., Csukás¹ B., Bézy² Z., Virágh² M., Nagy² T.

¹Kaposvári Egyetem, 7400 Kaposvár, Guba S. u. 40.

²Richter Gedeon NyRt., 1103 Budapest, Gyömrői út 19-21.

ÖSSZEFOGLALÁS

A fluidizációs-porlasztásos granulálás szimulációs modellezésére vonatkozóan a szakirodalomból két szélsőségesen különböző megközelítés ismert. A modellek egyik csoportja az elemi folyamatok részletes leírásából kiindulva, elosztott paraméterű parciális differenciál-egyenletrendszer (populáció mérleg) segítségével próbálja meg követni a szemcseméret eloszlás és az egyéb fizikai tulajdonságok változását. Ezen modellek gyakorlati alkalmazhatósága nehéz, mivel a szükséges elemi fizikai-kémiai paraméterek meghatározása a gyakorlatban lehetetlen. A másik szélsőséges megközelítés a különböző méretű készülékekben kimért empirikus összefüggések, és a gyakorlati tapasztalatokon alapuló heurisztikus szabályok alkalmazásával próbál a gyakorlat számára segítséget nyújtani. Ezek a tapasztalati összefüggések a készülékméretre nagyrészt nem invariánsak, ezért elsősorban jól bevált szakértői szabályokat kombinálnak az egyes anyagokra vonatkozó intuitív következtetésekkel, mely hátránya, hogy fontos jellegzetességek (pl. a szerkezeti anyag hőkapacitása) nem vehetők figyelembe. Munkánkban egy olyan, a gyakorlatban is alkalmazható, közepesen bonyolult megoldást dolgoztunk ki, amely a fluidizált réteg mozgásállapota és a rétegben lévő anyag tapadó-képességét kifejező nedvességtartalom közötti összefüggést leíró, úgynevezett rétegállapot diagram követségén alapul. A folyamat állapoteteleleit jellemző, úgynevezett passzív elemek és változáseleleit leíró aktív elemek generikus szimulációs modellje a készülék hőtehetetlenségét is figyelembe vevő hőmérleg-rendszeren, a nedvességmérlegen, valamint a porszűrő rendszerbe kerülő szilárd anyag mérlegének követségén alapul, miközben a szemcseméret eloszlás és a fizikai tulajdonságok megfelelő kialakulását az adott sávban elhelyezkedő rétegállapot-diagram garantálja implicit módon. Tapasztalataink szerint a tervezést és méretnövelést a gyakorlatban is jól segítő programrendszert alakítottunk ki, és megkezdjük a módszer gyakorlati alkalmazását.

(Kulcsszavak: fluidizációs-porlasztásos granulálás, rétegállapot diagram, generikus szimulációs modell, méretnövelés)

ABSTRACT

Development of a Simulation Model for Scaling-up of Fluid Bed Granulation Processes

M. Varga¹, S. Balogh¹, B. Csukás¹, Z. Bézy², M. Virágh², T. Nagy²

¹University of Kaposvár, H-7400 Kaposvár, Guba S. u. 40.

²Gedeon Richter Ltd., H-1103 Budapest, Gyömrői út 19-21.

There are two extremely different approaches for the modeling and simulation of the fluidized bed granulation in the literature. The first part of the models, starting from the detailed

description of the elementary processes, derives a system of partial integro-differential equations (population balance) for the description of the changing particle size distribution and of the other physical properties. Because of the practically unavailable physical parameters the industrial application of these models is very difficult. The second approach, utilizes the empirical relationships, measured in laboratory and pilot equipments of various size. These relationships, combined with heuristic rules are used to support the solution of practical programs. These empirical models are often not invariant to the size of the equipment. Consequently, some general expert rules used to be combined by the intuitive conclusions about the various materials, while some important knowledge (e.g. about the heat capacity of the construction material) cannot be taken into consideration. In this study a practically usable, intermediate solution has been elaborated, based on the so-called "bed-state diagram". This essential functionality describes the relationship between the motion and the agglomerating ability (stickiness) of the bed. The generic simulation model describes the state elements and the elementary transitions of the processes. The resulted simulation tool describes the heat balance (including also the heat capacity of the construction material), the solvent balance, as well as the elutriation of the solid particles to the filter, and their cyclic or continuous removal. The particle size distribution and other appropriate physical properties are guaranteed by the well-shaped bed-state diagram in implicit. According to the preliminary applications, the simulation program seems to afford practical help for design and scaling-up.

(Keywords: fluidized bed granulation, bed-state diagram, generic simulation model, scaling-up)

BEVEZETÉS

A fluidizációs-porlasztásos granulálási technológia lényege, hogy a készülék alátétlemezen elhelyezett, porszerű kiinduló anyagra kötőanyagot tartalmazó oldatot porlasztanak, így jó tablettázhatóságot biztosító, előírt szemcseméret eloszlású granulátum keletkezik.

A granuláló berendezés mérő- és szabályozó felszereltsége fejlett, így nagy mennyiségű, automatikusan rögzített adat állt rendelkezésre (1. ábra).

Munkánk során a fluidizációs-porlasztásos granulálási technológiák adatelemzésének tapasztalatai alapján kezdtük el egy a gyakorlatban is hasznosítható, méretnövelést segítő szimulációs modell kialakítását.

A technológia egymást követő műveleti lépések összességéből áll, melyek a következőképpen csoportosíthatók:

- betöltés,
- homogenizálás,
- előmelegítés,
- porlasztás és szárítás lépcsőzetesen változó levegő-árammal,
- végül a termék ürítése regranulálással.

A technológiai folyamat szakaszolása az alapanyag és a kötőanyag minőségétől is függ. Az egyes szakaszokban változtatható technológiai paraméterek a következők:

- levegő térfogatárama,
- levegő hőmérséklete,
- beporlasztott oldat mennyisége,
- és a porlasztás sebessége.

A paraméterek megadását – ahogy a szakaszok meghatározását is – jelentős mértékben befolyásolja az alap- és kötőanyag minősége.

1. ábra

A fluidizációs-porlasztásos granuláló berendezés adatgyűjtése

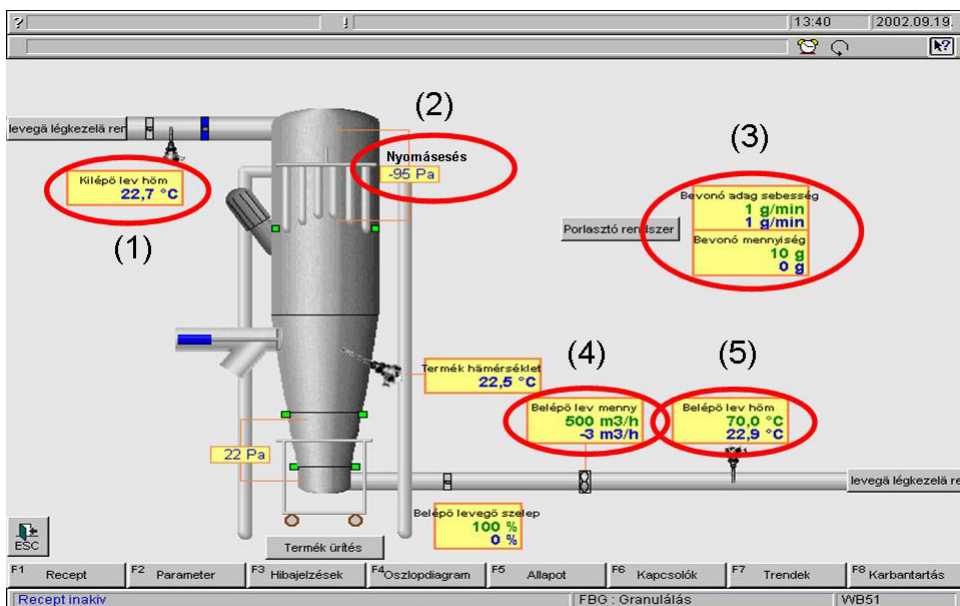


Figure 1: Data acquisition system of the fluidized bed granulator

Outlet air temperature(1), Pressure drop(2), Spraying system(3), Quantity of inlet air(4), Inlet air temperature(5)

A gyakorlat által felvetett probléma egyrészt a különféle anyagokra vonatkozó, legjobb granulátumot eredményező technológia megtervezése, másrészt a **labor** (\varnothing 0.14 m) → **pilot** (\varnothing 0.385 m) → **üzemi** (\varnothing 1-1.5 m) készülékek közötti méretnövelés megoldása. A méretnövelés gyakorlati megvalósítását nehezíti, hogy az adott méretű készülékben kialakított technológia lineárisan nem vihető át másik méretű készülékre.

A technológiai folyamat szakaszos jellegéből adódóan a paraméterek nagyszámú kombinatorikus lehetőségeit, a korlátozott mennyiségben rendelkezésre álló anyagot és időt figyelembe véve az előbbi gyakorlati problémák pusztán kísérleti úton történő megoldása lehetetlen, egy célszerűen kialakított számítógépi szimulációs módszer azonban hatékony segítséget nyújthat.

A manapság ezen a területen létező modelleket két szélsőséges kategóriára oszthatjuk. A modellek egyik csoportja a szemcseképződés során lejátszódó elemi folyamatok részletes leírásából kiindulva egy elosztott paraméterű parciális differenciálegyenletrendszer (populáció mérleg) leírásával kísérli meg a szemcseméret eloszlás és az egyéb fizikai tulajdonságok változásának egzakt követését. A részletes modellezést nehezíti, hogy a csatolt populáció-, hő- és nedvességmérleg jellemzői a függőleges térkoordináta mentén is változnak, ráadásul a szilárd anyag fluidizált rétege nem homogén, hanem magasságfüggő méretű buborékokat tartalmaz. A modellanyagokkal kapott jelentős elméleti eredmények ellenére a mindennapi gyakorlatban ezen modellek

nehezen használhatók, mivel a szükséges elemi fiziko-kémiai paraméterek meghatározása a gyakorlatban szinte reménytelen feladat.

A modellezési törekvések másik nagy csoportja különböző méretű berendezésekben kimért empirikus összefüggések, illetve a gyakorlati tapasztalatokra alapozott heurisztikus méretnövelési szabályok alkalmazásával próbál segítséget nyújtani az üzemi gyakorlatnak. Az empirikus összefüggések sokszor nem invariánsak a készülék méretére, ezért a gyakorlatban elsősorban jól bevált szakértői szabályokat kombinálnak az egyes anyagokra vonatkozó intuitív következtetésekkel.

Munkánkban egy olyan harmadik utas megoldást dolgoztunk ki, amely a fluidizált réteg mozgásállapota és a rétegben lévő anyag tapadó-képességét kifejező nedvességtartalom közötti összefüggést leíró, úgynevezett rétegállapot diagram követésén alapul. A 2. ábrán egy tipikus rétegállapot diagramot láthatunk, ahol a világosabb színű, balról jobbra lépcsőzetesen tartó pontok a beporlasztás, a jobbról balra haladó sötétebb színű pontok pedig a szárítás szakaszait jellemzik.

2. ábra

A rétegállapot diagram

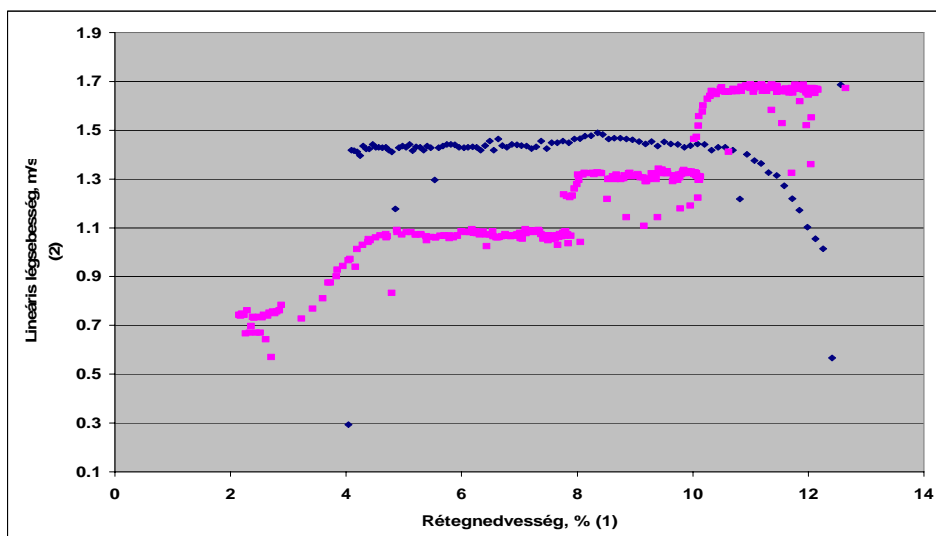


Figure 2.: Bed-state diagram

Humidity of the bed (1), Linear air flow rate (2)

ANYAG ÉS MÓDSZER

A szimulációs modell kialakításánál az állapotokat jellemző passzív elemek és a változásokat leíró aktív elemek közvetlen számítógépi leképezésén alapuló módszert alkalmaztunk.

A 3. ábra a modell felépítésének sematikus rajza, ahol az állapotokat téglalapokkal, a változásokat (levegőáram, párolgás, entalpia) pedig nyilakkal jelöltük.

3. ábra

A modell építőelemei

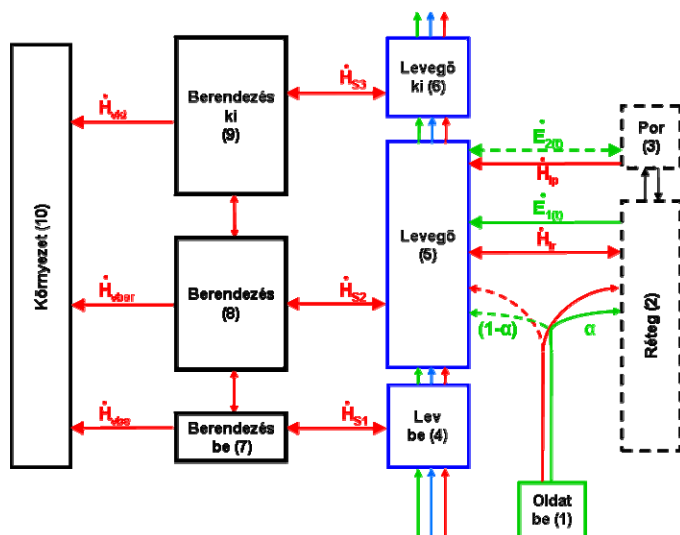


Figure 3: Building blocks of the model

Solution feed(1), Bed(2), Raw material(3), Inlet air(4), Air(5), Outlet air(6), Inlet part of equipment(7), Second part of equipment(8), Outlet part of equipment(9), Environment(10)

A granulálás folyamán a beporlasztott oldat (Oldat_be) hőátadás mellett – a 3. ábrán nyilakkal jelölve – a rétegbe kerül. A modellben lehetőség van annak figyelembevételére, hogy a beporlasztott oldatnak csak egy része kerül a rétegbe (α), másik része ($1-\alpha$) a levegőbe jut.

A rétegből a gyártás során folyamatosan történik porkihordás, melyet a készülék típusától függően folyamatosan vagy ciklikusan visszajuttatnak.

Az ábrán $E_{1(t)}$ -vel jelölt nyíl a réteg nedvességtartalmának levegőbe történő párolgását jelöli, míg H_{ir} a levegő és réteg közötti hőátadást. A por és a levegő között ugyanilyen jellegű kölcsönhatások mennek végbe ($E_{2(t)}$, H_{ip}).

A berendezés szerkezeti anyagát a 3. ábrán látható módon három részre bontva vettük figyelembe (Berendezés_be, Berendezés, Berendezés_ki), mely jelentős hőtehetetlensége miatt nem elhanyagolható a modellezés során.

Az egyes szerkezeti részekben lévő gázfázisok (Levegő_be, Levegő, Levegő_ki) között a levegőáram nedvességet és hőt visz magával.

A szerkezeti anyag és abban lévő levegő között hőátadás (H_{S1} , H_{S2} , H_{S3}), az egyes szerkezeti részek közt hővezetés van, míg a környezet felé hővesztés (H_{vbe} , H_{vber} , H_{vki}) történik.

A modell előzőekben bemutatott állapot- illetve változáselemeit egy megfelelően strukturált Excel munkafüzetben rögzítettük. A 4. ábra a munkafüzet harmadik lapján összegyűjtött passzív elemeket (állapotokat) mutatja.

A harmadik munkalapon az állapototelemek jellemzőit (tömeg, sűrűség, fajlagos hőkapacitás, kiindulási hőmérséklet és nedvességtartalom) adtuk meg.

4. ábra

A modell állapotelemei

	A	B	C	D	E	F	G	H
3	Egység	Tömeg	Sűrűség	Fajl. hők.	Modell	Hőmérs.	Nedv. tart.	
4	neve (1)	kg (2)	kg/m ³ (3)	kJ/(kg.fok) (4)	(5)	C (6)	kg/kg (7)	
5								
6	Reteg	26 [2]	1520	1.2	granulas	23 [3]	0.002 [4]	
7	Por	0 [6]	1520	1.2		23 [7]	0 [8]	
8	Lev	0.26 [10]	1.12	1.04		23 [11]	0.00393 [12]	
9	Levbe	0.035 [14]	1.12	1.04		23 [15]	0.00393 [16]	
10	Levki	0.258 [18]	1.12	1.04		23 [19]	0.00393 [20]	
11	Oldbe	15 [22]	1000	4.18		53 [23]	0.8763 [24]	
12	Berbe	50 [26]	7700	0.5		23 [27]	0	
13	Ber	250 [29]	7700	0.5		23 [30]	0	
14	Berki	200 [32]	7700	0.5		20 [33]	0	
15	Korny	1000000000	1.12	1.04		23	0	
16					#			

Figure 4: The elementary states involved in the model

Name (see Figure 3)(1), Mass(2), Density(3), Specific heat capacity(4), Model(5), Temperature(6), Humidity(7)

Az 5. ábra az állapotelemek közötti kapcsolatokat mutatja. A munkalapon lehetőség van a réteg és a levegőben lévő szállópor anyag típusonként jellemző párolgási tényezőjének megadására (D6 és D7 cella). Ezen túl az egyes szerkezeti részek és az abban lévő fázisok közti hőátadó felület nagyságát, valamint a különféle anyagok hőátadási tényezőjét is itt rögzíthetjük.

5. ábra

A modell változáselemei

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
2													
3	Folyamat	Folyamat	Sebesség	Egyéb	A bemenő és kimenő jellemzők leírása								
4	neve (1)	tipusa (2)	1/s	paraméter	(5)								
5			kJ/(m ² .s.C) (3)	(4)									
6	Parolgas	evap	0.01	[2.382]	kJ/kg	Reteg						Lev	
7	Parolgas	evap	0.001	[2.382]	kJ/kg	Por						Lev	
8	H_Levbe_Berbe	adv heat transfer	0.09	[0.55]	m ²	Levbe						Berbe	
9	H_Lev_Ber	adv heat transfer	0.09	[0.97]	m ²	Levbe						Ber	
10	H_Levki_Berki	adv heat transfer	0.09	[2.3]	m ²	Levki						Berki	
11	H_Berbe_Korny	adv heat transfer	0.01	[0.57]	m ²	Berbe						Korny	
12	H_Ber_Korny	adv heat transfer	0.01	[0.97]	m ²	Ber						Korny	
13	H_Berki_Korny	adv heat transfer	0.01	[2.5]	m ²	Berki						Korny	
14	H_Berbe_Ber	adv heat transfer	0.02	[0.11]	m ²	Berbe						Ber	
15	H_Ber_Berki	adv heat transfer	0.02	[0.22]	m ²	Ber						Berki	
16	H_Lev_Reteg	adv heat transfer	0.05	[15]	m ²	Lev						Reteg	
17	H_Lev_Por	adv heat transfer	0.05	[15]	m ²	Lev						Por	
18													

Figure 5: The elementari processes involved in the model

Process name(1), Process type(2), Rate(3), Other parameters(4), Input and output characteristics(5)

A 6. ábrán bemutatott ötödik munkalapon a különféle technológiák ütemezését adhatjuk meg, porlasztási illetve szárítási szakaszonkénti bontásban.

6. ábra

A granulálási technológia ütemezése

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	
5														Rázatás	Y		
6	Hornan		Hova	Áram	Áram	Mennyiség	Mérték	Paraméter	Mérték	Kezdet	Tartam	Porlasztási	Megy	All	Kihordás		
7	egység		egység	jele	tipusa	(5)	(6)	(7)	(8)	s	s	g/perc	s	s	A	B	
8	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)		
9	Y	Levbe	Lev	L1	air	825 m ³ /h		20	C	0	300		60	20	0.015	6.5	
10	Y	Levbe	Lev	L2	air	825 m ³ /h		35	C	300	600		60	20	0.015	6.5	
11	Y	Levbe	Lev	L3	air	733.33333 m ³ /h		50	C	900	640	Kezdt	40	20	0.015	13	
12	Y	Levbe	Lev	L4	air	566.66667 m ³ /h		50	C	1540	360		40	20	0.015	13	
13	Y	Levbe	Lev	L5	air	562.5 m ³ /h		50	C	1900	1200		60	20	0.015	13	
14	Y	Levbe	Lev	L6	air	583.33333 m ³ /h		50	C	3100	2600		100	20	0.015	13	
15	Y	Levbe	Lev	L7	air	375 m ³ /h		50	C	5700	320		100	20	0.015	13	
16	Y	Oldbe	Reteg	P1	fluid	1600 g		27	C	900	640	150	0	20			
17	Y	Oldbe	Reteg	P2	fluid	900 g		27	C	1540	360	150	40	20			
18	Y	Oldbe	Reteg	P3	fluid	3000 g		27	C	1900	1200	150	40	20			
19	Y	Oldbe	Reteg	P4	fluid	6500 g		27	C	3100	2600	150	60	20			
20	Y	Oldbe	Reteg	P5	fluid	800 g		27	C	5700	320	150	80	20			

Figure 6: Scheduling of the granulation process

From unit(1), To unit(2), Flow ID(3), Flow type(4), Rate or amount(5), Dimension(6), Parameter(7), Dimension(8), Start[s](9), Duration[s](10), Spraying rate[g/min](11), Dust removing shock – On[s](12), Dust removing shock – Off[s](13), Elutriation, A(14), Elutriation, B(15)

A 6. ábrán példaként bemutatott technológia esetében hét levegő befűvási és öt porlasztási szakaszt különböztettünk meg. Természetesen a lehetőség adott az ettől eltérő számú szakaszok megadására is a modellben. Az egyes levegő-befűvási szakaszokra vonatkozóan a gyártási lap alapján megadhatjuk az átlagos légsebességet (F9-F15 cellák), a bemenő levegő hőmérsékletét (H9-H15 cellák), a szakasz időtartamát (K9-K15 cellák), porzsák-lerázatásos készülék esetén a lerázatás ciklusait (M9-N15 cellák), valamint egy – jelen pillanatban csak becsült – porkihordást (O9-P15 cellák).

A porlasztási szakaszokra vonatkozóan a beporlasztott oldat mennyiségét (F16-F20 cellák) és hőmérsékletét (H16-H20 cellák) adhatjuk meg. A szakasz időtartama (K16-K20 cellák) és a ciklikus lerázatási idők (M16-N20 cellák) automatikusan átvételre kerülnek a levegő-befűvási szakaszokból.

Munkánk előzményeként a fluidizációs-porlasztásos granulálási technológiák adatainak elemzése során meghatároztunk egy számolási algoritmust (Perry, 1997; Bézy, 2007), mely alapján a generikus szimulátor az előzőekben megadott inputokból végzi a számolást, az eredményeket pedig ugyanennek a munkafüzetnek a hatodik munkalapján jeleníti meg.

A gyártástervezést és méretnövelést segítő módszer kialakítása során az előzőekben bemutatott generikus szimulátorral visszacsatolt kapcsolatban lévő genetikusan algoritmust alkalmaztuk.

A szimulátor az adott technológia szakaszonként szabadon változtatható paramétereit, az ún. lehetőségeterit biztosítja a genetikusan algoritmus számára, melyek a következők:

- a szakaszok időtartama,
- a levegő térfogatárama,
- a levegő hőmérséklete,
- és a porlasztási sebesség.

A genetikusan algoritmus ezekből a diszkrét vagy folytonos paramétereiből változatos variánsokat képez, melyeket számolásra ad át a szimulátornak. A lefutott egyedek értékelését a genetikusan algoritmus végzi, a megadott értékelési szempont szerint.

Esetünkben értékelési szempontként egy, az adatelemzés során a gyártásközi ellenőrzés segítségével anyag típusonként meghatározott, „jó” rétegállapot diagram követését határoztuk meg.

A genetikus algoritmus által a lehetőségtérből kombinált egyed tehát akkor megfelelő, ha a szimulátor által annak paramétereiből számolt rétegállapot diagram pontjainak eltérése minimális az értékelési szempontként megadott függvény pontjaitól (7. ábra).

7. ábra

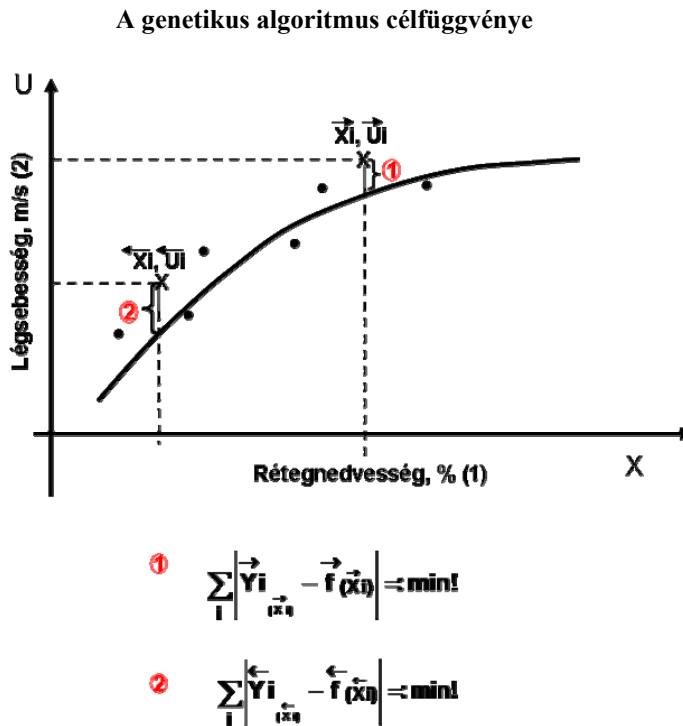


Figure 7: Goal function of the evaluation

Humidity of the bed(1), Linear air flow rate(2)

EREDMÉNYEK

A 8. ábrán egy szűrőgyertyás készülékben gyártott tétel szimulátor által számolt, illetve gyártás során mért rétegállapot diagramját hasonlítottuk össze. A kétféle világosabb, kissé szórt pontok a mért értékeket, a sötétebb vonalak pedig a modell eredményeit jelölik. Megjegyezzük, hogy a munka ezen stádiumában a ciklikus porlerázások figyelembevételét még nem építettük be a modellbe.

A 9. ábra baloldali részén egy gyártás sarzsából visszaszámolt nedvesedési görbét láthatjuk, a világosabb pontok a néhány mintavételből származó nedvességtartalom mérést jelzik. Az ábra jobboldali részén a szimulátor által számolt nedvesedési görbét tüntettük fel, a pontok itt is a mért értékeket jelzik. Az ábra kettős egyezést mutat, a visszaszámolt és szimulált, illetve a mért pontok is jó egyezést mutatnak.

8. ábra

A mért és a modellezett rétegállapot diagram összehasonlítása

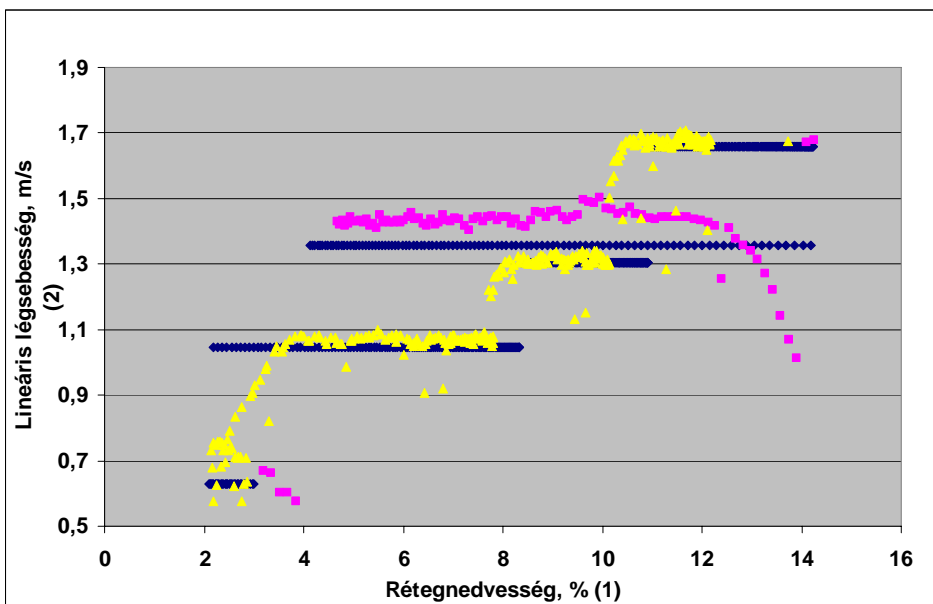


Figure 8: Comparison of measured and calculated bed-state diagram

Humidity of the bed(1), Linear air flow rate(2)

9. ábra

A visszszámolt és mért, illetve a szimulált és mért pontok egyezősége

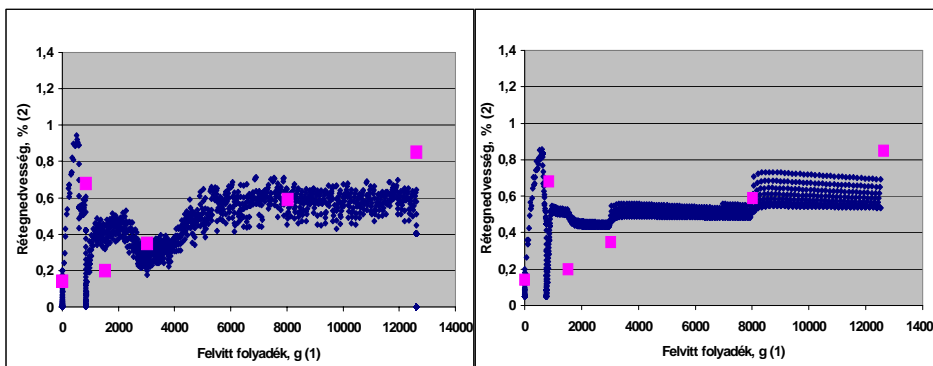


Figure 9: Comparison of calculated (from data acquisition system), measured and simulated data.

Amount of solution(1), Humidity of the bed(2)

A 10. ábra az előbb bemutatott gyártási tétel szimulált rétegállapot diagramját mutatja. A munka ezen fázisában a modellben már a ciklikus lerázásokat is figyelembe vettük.

10. ábra

A modellezett rétegállapot

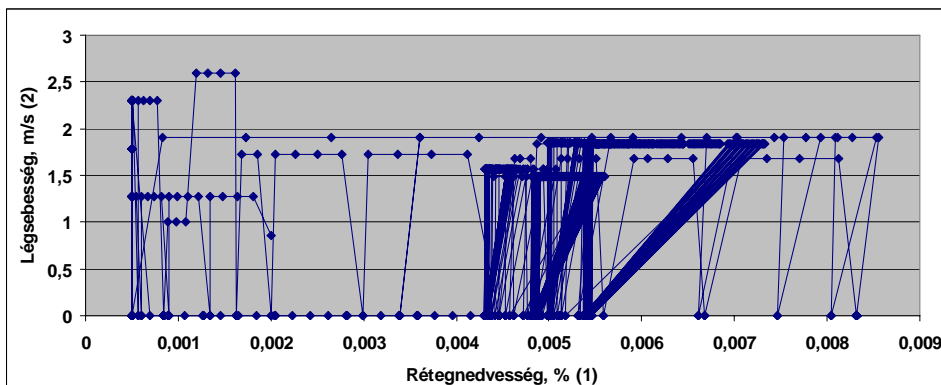


Figure 10: Simulated bed-state diagram

Humidity of the bed(1), Linear air flow rate(2)

KÖVETKEZTETÉSEK

Összefoglalásként elmondhatjuk, hogy kialakítottuk a fluidizációs-porlasztásos granulálás egy újlevű, közepesen bonyolult generikus modelljét, amely kiterjed:

- a szerkezeti anyag hőkapacitását is figyelembe vevő hőmérleg,
- egy kinetikus párolgási modellen alapuló oldószermérleg,
- a munkaszakszonként változó paraméterek, valamint
- a ciklikusan változó szállópor kihordás és lerázás alkalmazás-centrikus leírására.

Ezen túlmenően kialakítottunk egy, a változó agglomerizációs hajlammal összhangban levő mozgásállapotot leíró belső funkcionalitás (rétegállapot diagram) állandóságán alapuló generikus/genetikus tervezést segítő módszert.

Az ismeretlen modell paramétereket egyes anyagokra eredményesen identifikáltuk és validáltuk.

Az elmúlt időszakban megkezdtük a módszer gyakorlati alkalmazását is.

IRODALOM

- R.H. Perry, D.W. (1997). Green: Perry's Chemical Engineers' Handbook, 7th Edition. McGraw-Hill Publishing Co.
- Bézi Z., Virágh M., Nagy T., Mészéna Zs., Varga M., Balogh S., Csukás B. (2007): Fluidizációs-porlasztásos granulálási kísérletek és technológiák kiértékelése és elemzése. Acta Agraria Kaposváriensis. 11. 2. 187-195.

Levelezési cím (*Corresponding author*):

Varga Mónika

Kaposvári Egyetem

7400 Kaposvár, Guba S. u. 40.

University of Kaposvar

H-7400 Kaposvar, Guba S. u. 40.

Tel.: 36-70-320-6556

e-mail: varga@matinf.gtk.u-kaposvar.hu