



## Működő technológia optimalizálása az irányító rendszer modelljének felhasználásával

**Balaskó B., Németh S., Abonyi J.**

Pannon Egyetem, Folyamatmérnöki Tanszék, Veszprém, 8200 Egyetem u. 10.

### ÖSSZEFOGLALÁS

*A vegyipari folyamatok optimalizálása elengedhetetlen elvárás. A vegyipar egyike a legmagasabb szinten automatizált iparágaknak, ezért magába foglalja az optimalizálhatóság potenciális lehetőségét a folyamatból érkező nagy mennyiségű adat - esetlegesen a priori információkkal kiegészített - feldolgozásával és az eredményeknek - mint fel nem tárt összefüggéseknek, információknak - a termelőfolyamatban való hasznosításával. Az adatalapú (fekete- vagy szürkedoboz modell) technikákon túl tradicionális modellalapú technikák alkalmazása is szükséges, ráadásul a vegyészmérnöki ismereteket szintetizáló modellekre alapozott algoritmusokat, programokat a fejlett folyamatirányító rendszerek (DCS) tartalmazzák, amelyek felülvizsgálata, továbbfejlesztése, illetve új modellek alkalmazása szintén komoly eredménnyel járhat. Ez a cikk egy működő polimer technológia irányító rendszerének vizsgálatával foglalkozik. Az irányító rendszer modelljének felépítésével és alkalmazásával, valamint az üzemi operátorok szakmai tapasztalatának felhasználásával lehetőség nyílik a termékek paraméterei és a technológiai változók közötti érzékenységvizsgálatokra, a technológia vegyészmérnöki modelljén alapuló állapotbecslő, illetve paraméter identifikáló módszerek fejlesztésére és tesztelésére, a technológia működésének minősítésére, nyomon követésére, illetve új munkapontok, termékek kidolgozására. Cikkünk célja, hogy áttekinthesse, milyen vizsgálatok és eszközök állhatnak rendelkezésünkre egy komplex, hierarchikusan felépített irányító rendszer felülvizsgálatához, illetve az ehhez kapcsolódó optimalizációs feladatok megoldásához, s bemutassa ezek alkalmazhatóságát egy valós ipari rendszeren. (Kulcsszavak: optimalizáció, irányító rendszer modell)*

### ABSTRACT

#### **Application of First-principle Process Control Model in Optimization of a Polymerization Technology**

B. Balasko, S. Nemeth, J. Abonyi

Pannon University, Department of Process Engineering, Veszprém, H-8200 Egyetem Str. 10., Hungary.

*Nowadays the optimization of chemical processes is a basic expectation. Chemical industry is one of the most automated industries; therefore it has the potential for continuous improvements by analyzing the enormous quantity of process data with some a priori knowledge and by utilizing the results of previously unknown associations and information about the investigated technology. Beyond data based black- and grey-box modeling techniques, the traditional model-based approach is also needed to analyze and improve the engineering knowledge implemented in the distributed process control system (DCS) as equations and algorithms. This paper deals with the advanced process control system of an operating polymerization technology. Modeling the control system and applying the*

*experience of plant operators, sensibility-analysis between process values and product quality, state-estimating and parameter identification tools, control system and technology qualifying tools or new product operating points could be achieved. The purpose of this paper is to review the possibilities of supervising a complex, hierarchical control system and present its applicability on an real industrial example.*

(Keywords: optimization, process control model)

## BEVEZETÉS

A modern folyamatirányító rendszerekben mára alapkövetelmény lett az elosztott irányító rendszer (DCS) megléte, mely a lokális és koordináló szintű szabályozási feladatok elvégzésén túl rendelkezik az irányított folyamatból érkező adatok tárolására alkalmas funkciókkal. A vegyipari folyamatok magas fokú automatizáltságának köszönhetően egy bonyolultabb technológia esetében ez roppant nagy mennyiségű adatot jelent, ami potenciálisan magában hordozza ezek felhasználását a technológia rossz teljesítőképessége okainak feltárásában, a termelékenység, vagy termékminőség növelésében, megfelelő adatelemzési technikák alkalmazásával. Ezzel ellentétben ezt a lehetőséget a legtöbb ipari technológiában nem aknázzák ki adekvát módon, az elemzett adatbázisok arányát 5-10%-osra becsülik (Fayyad et al., 1997). A vegyipar viszont az elmúlt évtizedekben komoly versenypiacca változott, ahol a vevői igények minél gyorsabb és pontosabb kielégítése a cél a termékminőség javulása és a fajlagos költségek csökkentése mellett (Tousain et al., 2006).

A Pannon Egyetem (névváltoztatás előtt Veszprémi Egyetem) Folyamatmérnöki Tanszéke évek óta szoros együttműködésben dolgozik együtt a legnagyobb magyarországi vegyipari cégekkel, amelynek keretein belül operátori döntéstámogató rendszert (Abonyi et al., 2003; Pach et al., 2006), állapot- és termékminőség becslő eszközt (Feil et al., 2004) is kifejlesztettek polietilén üzemre. Jelen cikk is egy ilyen hosszabb távú fejlesztési terv részeredményeit foglalja össze, amely a TVK Rt. polipropilén üzemének optimalizációs eszközökkel történő támogatását tűzte ki célul.

A technológia adatainak statisztikai elemzésére számos eszköz áll rendelkezésre, amelyek főként az adatbányászat pl. csoportosítás, osztályozás, regresszió területeit, vagy valamilyen fekete doboz modell alkalmazását jelentik. Ilyenek például a változók terének, dimenziójának csökkentése PCA módszerrel (MacGregor és Kourti, 1995), vagy asszociációs szabálybázis felállítása (Pach et al., 2005). Ezek a megközelítések azonban *nem felügyelt tanuló algoritmusok*, hiszen figyelmen kívül hagyják, hogy a technológia az irányító modell alapján működik, amelybe a vegyészmérnöki ismeretek implementálva lettek. Ezért ezeknek a beépített elemeknek (empirikus egyenletek, mérlegegyenletek, kísérletileg kimért állandók, paraméterek) a vizsgálatához analóg módon strukturált fehér doboz modell szükséges. Jelen cikk célja a technológia megismerésének folyamatában történő bemutatása, valamint az optimalizálás lehetséges eszközeinek ismertetése a TVK Rt. Polipropilén üzemének példáján.

## TECHNOLÓGIA ÉS MÓDSZER

### **A polipropilén technológia vázlatos ismertetése**

A TVK Rt. Polipropilén-IV üzemében (PP4) a Himont cég által kidolgozott Spheripol technológiát alkalmazzák, amely zagyfázisú, sorban kötött hurokreaktorokban termel homopolimert (propilén polimer), emellett lehetőség van etilén bevezetéssel random kopolimer (etilén-propilén polimer), vagy a kevert, gázfázisú reaktorban impakt kopolimer gyártására. A technológia egyszerűsített blokk-vázlatát mutatja az *1. ábra*.

## 1. ábra

## A polipropilén technológia blokskéája.

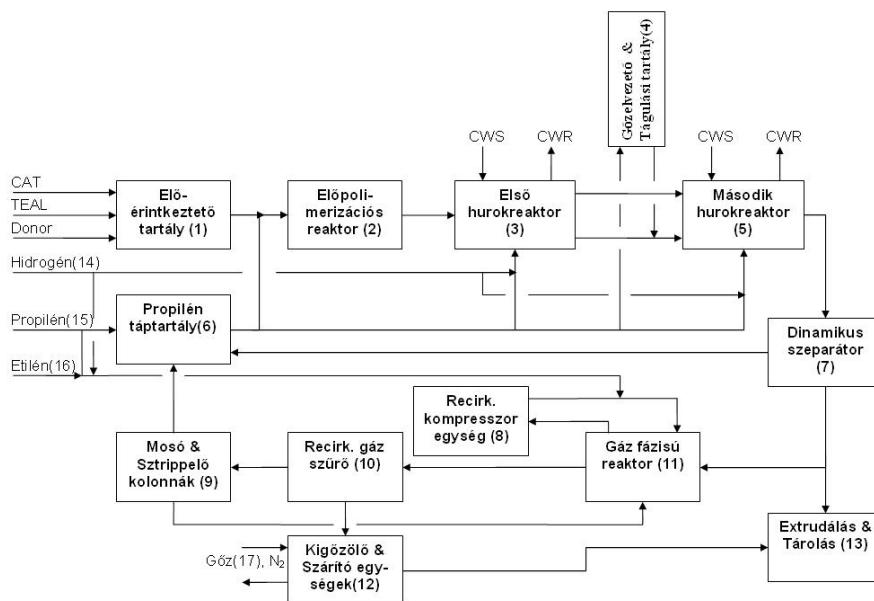


Figure 1: Block diagram of the polypropylene technology

Precontacting pot(1), Prepolymerization reactor(2), First loop reactor(3), Evaporator and expansion drum(4), Second loop reactor(5), Propylene feed tank(6), Dynamic separator(7), Recirc. compressor unit(8), Scrubber and stripper unit(9), Recirc. gas filter(10), Gas phase reactor(11), Steamer and dryer unit(12), Extrusion and storage(13), Hydrogene feed(14), Propylene feed(15), Ethylene feed(16), Steam(17).

A technológia lelke a háromkomponensű katalizátor-rendszer, mely 4. generációs Ziegler-Natta katalizátort ( $\text{TiCl}_4/\text{MgCl}_2$ ) jelent TEAL (tri-etil-alumínium) kokatalizátor és szilán alapú donor mellett. A három komponensű előérintkeztető tartályban keverik össze, melynek során az Al/Ti és Donor/Ti arányt szigorúan a megfelelő értéken kell tartani a megfelelő aktivitás elérése érdekében. A polimerizációt egy kisméretű, ún. előpolimerizációs reaktorban kezdik meg propilén monomer bevezetésével, a tömbpolimerizáció a két, sorba kötött hurokreaktorban valósul meg. A betáplált hidrogén - mint lánczáró ágens - mennyiségével szabályozzák a keletkező láncok hosszát, ezáltal a polimer belső viszkozitását, felhasználási tulajdonságait.

A termelési sebesség és a katalizátor produktivitás maximalása érdekében a tartózkodási időt, ill. az ezzel összefüggő zagysűrűséget a műszakilag lehetséges legmagasabb értéken tartják. A kilépő áramban kb. 50 m/m% a monomer-koncentráció, ezért ezt előzőelőtétel majd flash-elés révén visszanyerik. Impakt kopolimer gyártás esetén a polimert fluidágyas gázfázisú reaktorba vezetik, egyébként pedig kigőzőlés és nitrogénes szárítás után az extrudáló alegységbe szállítják, majd tárolják. Kigőzőlés után a propilén gázt folyékony propilénnel visszamosás, az etilént sztrippelő kolonnában nyerik vissza.

### Az alkalmazott módszer

Az optimalizációs feladatoknak az első lépése a korábban ismertetett technológia és az irányító rendszer alapos megismerése folyamatanalízis segítségével, melyet az irodalom „tudás feltárás”-nak nevez. A 2. ábra a folyamatanalízis elvi sémáját mutatja. Műveleti szinten a DCS biztosítja a technológia biztonságos üzemeltetését, továbbítja a technológia fontosabb változóinak mért értékét az operátorok felé, akik válaszul beavatkozhatnak a globális felhasználói állomáson (GUS) keresztül. A DCS és az operátorok munkáját fejlett modell alapú folyamatirányító rendszer (AM Process Computer) segíti, amely különböző alapjelek mért értékekből történő kiszámítása mellett több száz, a folyamatban közvetlenül nem mérhető, de a zavartalan üzemeltetés és a termék minősége szempontjából létfontosságú közvetett folyamatváltozót is kiszámít.

A tudás-feltárási szinten mind az alapjeleket, mind a folyamatváltozók és beavatkozó változók értékeit egy adattárházban tároljuk, és statisztikai, adatbányászati, vagy fehér doboz modellezési módszerekkel elemezzük. Az adattárházak olyan speciális adatelemző-döntéstámogató információközpontú környezetek - szemben az adatátvitel-központú környezetekkel - melyek megbízható, adatelemzés céljára gyűjtött adatokat tartalmaznak a technológiából.

2. ábra

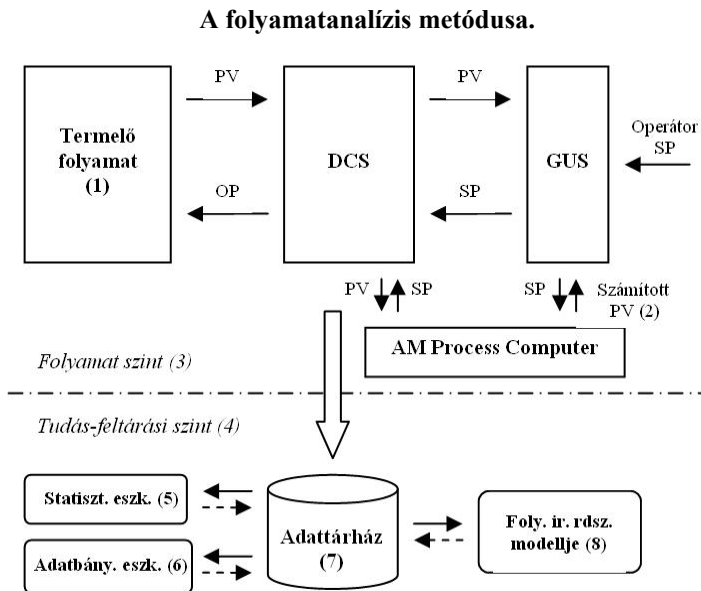


Figure 2: Proposed methodology of process analysis

Production process(1), Calculated PV(2), Process level(3), Knowledge discovery level(4), Statistical tools(5), Data mining tools(6), Data warehouse(7), Model of process control(8).

Az analízis során a technológia fejlett folyamatirányító rendszerét (APC – Advanced Process Control ) implementáltuk MATLAB® Simulink® környezetben. Az APC egy hierarchikusan felépülő, kalkulációs modulokból álló folyamatirányító rendszer, ami a Simulink grafikus környezetében analóg módon leképezhető és tesztelhető.

### Az irányító rendszer modellje

A technológia hierarchikusan felépített irányító rendszerét a Honeywell cég fejlesztette ki, melynek neve Profit<sup>®</sup> Controller. Ez egy többváltozós folyamatszabályozó és optimalizáló alkalmazás, melynek alapja egy modell alapú szabályozó rendszer (RMPCT<sup>®</sup> – Robust Multivariable Process Control Technology). A lokális szintű irányítási feladatokat PID szabályozók látják el, melyeknek alapjeleit az RMPCT-vel kooperáló APC számítja.

Az APC a mért folyamatváltozókat validálja és szűri, valamint alapjeleket számít a lokális szintű szabályozó köröknek, tehát a technológia közvetlen irányításért is felel. A számítások „gerince” a reaktorok hőmérlege alapján számított polimer termelési sebesség.

Az irányító rendszer szimulátorának elkészítését annak komplexitása mellett az is nehezíti, hogy az APC-ben implementált vegyészmérnöki modell egy összetett, több számítási kört tartalmazó algebrai és differenciál egyenletrendszer iteratív megoldását igényli. A szimulátor moduláris és hierarchikus felépítését szemlélteti a 3. ábra. Az ábra bal oldalán látható a tömbpolimerizáció szekcióra a kalkulációs blokkok összefüggő rendszere, melynek 38 folyamatoldali bemenete van, s ami még egyszerűsítve is 140 kimeneti értéket számol. Utóbbiak kisebb része alapjel, nagyobb hányada magasabb szintű alapjel-számító algoritmusok segédváltozója, a többi pedig indikatív jellegű változó. A 3. ábra jobb oldalán egy ilyen blokk belső szerkezete látható, ami jelen esetben az első hurokreaktor termelési sebességét számoló szimulátor szerkezete.

### 3. ábra

#### A szimulátor hierarchikus felépítése

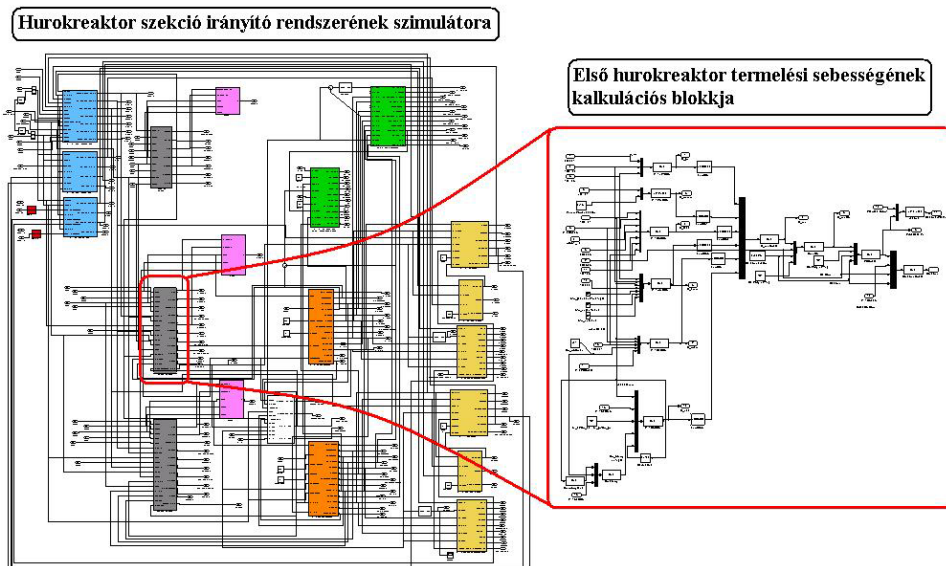


Figure 3: Hierarchical structure of the simulator: loop reactor section (left), first loop reactor production rate calculations (right)

## EREDMÉNY ÉS ÉRTÉKELÉS

A szimulátor kimeneti eredményeit ellenőrzésképpen összevetettük az eredeti folyamatirányító rendszer által számított értékekkel négy fontos technológiai változó esetében: termelési sebesség, tartózkodási idő a reaktorokban és termelési arány az első reaktorban (a második reaktor ennek reciproka). Egy napos szimulációt végeztünk, hogy az esetleges eltérések nagyságát könnyebb legyen megítélni. Emellett a vizsgált időintervallum kb. 17. órájában (1020. perc) termékváltás kezdődik meg a termékváltási napló szerint, az ezt követő szakasz alkalmas volt annak megfigyelésére, hogy dinamizmusában követi-e a szimulátor az eredeti irányító rendszert. Az eredményeket a 4., 5., és 6. ábrák szemléltetik.

Az ábrákon a valós modell által számított értékeket szaggatott vonal, a szimulátor által számítottakat folytonos vonallal jelöltük, a konkrét értékeket normáltuk. A vízszintes tengely beosztása percben értendő, mivel a rendelkezésre álló üzemi adatok is egy perces gyakoriságúak.

Jól látható, hogy a szimulátort a még pontosabb eredmény érdekében „finomhangolni” kell a későbbiekben. Ez a beépített elsőrendű szűrők szűrőállandóinak és az APC-beli PID-ek erősítési tényezőjének, integrálási időállandójának beállítását jelenti. Mindazonáltal kijelenthető, hogy a szimulátor az eredeti modellt nagyon jó közelítéssel és dinamizmussal követi, figyelembe véve a számítások összetettségét és az eredeti modell pontosságát.

### 4. ábra

A termelési sebesség alakulása az APC modell (szaggatott vonal) és a szimulátor (folytonos vonal) esetén

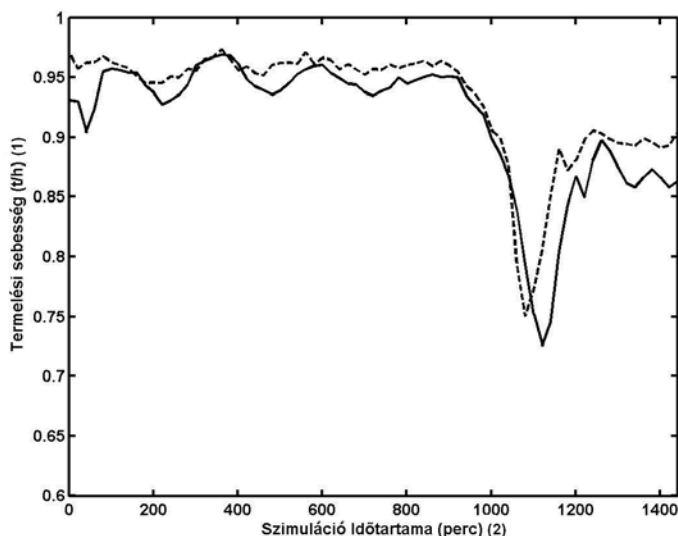


Figure 4: Production rates calculated by the APC model (dashed line) and by the simulator (continuous line)

Normalized production rate(1), Simulation time(min)(2).

5. ábra

Az átlagos tartózkodási idők alakulása az első és második hurokreaktorban

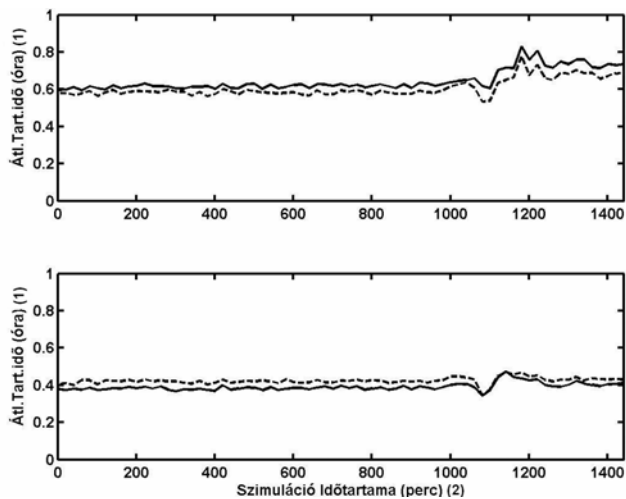


Figure 5: Average residence times in the first and second loop reactor

Normalized average residence time(hour)(1), Simulation time(min)(2).

6. ábra

A termelési arány alakulása az első hurokreaktorban ()

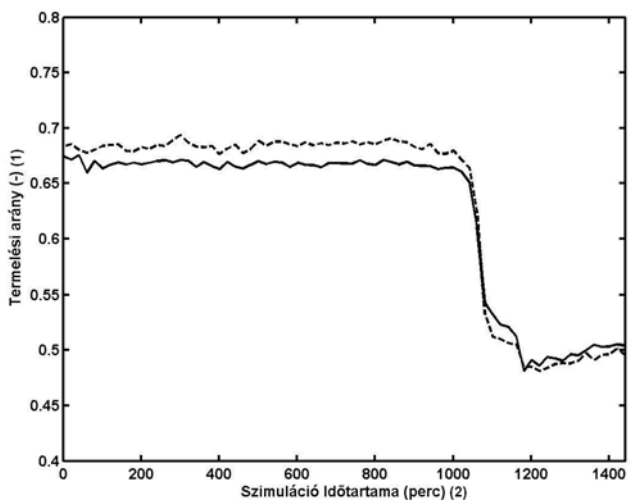


Figure 6: Split ratio of Production rate in the first loop reactor

Normalized Production Split(1), Simulation Time(min)(2).

Az 5. ábrán látható az eltérés a két szimulációs eredmény között, hogy a szimulátor az első hurokreaktorban pár perccel nagyobb, a másodikban pár perccel alacsonyabb átlagos tartózkodási időt számol. Tehát a termelés aránya nő a második reaktor javára – ahogy az a 6. ábrán is látszik. A 4. és 5. ábra emellett jól mutatja az a trendet, hogy az operátorok termékváltáskor a termelési sebességet csökkentik (kisebb tartózkodási idők), valamint az új terméknek megfelelő termelési arányt állítják be (6. ábra). Cél, hogy minél kevesebb melléktermék keletkezzen.

## KÖVETKEZTETÉSEK

A MATLAB® Simulink® környezetben létrehozott folyamatirányító rendszer szimulátora képes jó eredménnyel a valós rendszer eredményeit reprodukálni, ezáltal a későbbiekben strukturális átalakítások szimulációja is elvégezhető az irányító rendszeren. Az APC szimulátort a későbbi vizsgálatokhoz szükséges egy technológiai rendszer modellhez kapcsolni, mely adekvát reaktor modellt is tartalmaz, hogy a szükséges érzékenységvizsgálatok a teljes rendszerre elvégezhetőek legyenek.

## KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A szerzők köszönetüket fejezik ki a Vegyészmérnöki Intézet Koordinációs Kutatási Központnak a VIKKK-2004-III/1. témában nyújtott anyagi támogatásért, az OTKA T 049534 támogatásáért, valamint a TVK Rt. PP-4 üzem munkatársainak, Kiss Attilának, Kissné Lovas Kingának és Nagy Tibornak a segítségért.

## IRODALOM

- Abonyi, J., Arva, P., Nemeth, S., Vincze, Cs., Bodolai, B., Dobosné, H. Zs., Nagy, G., Németh, M. (2003). Operator Support System for Multi Product Processes - Application to Polyethylene Production, European Symposium on Computer Aided Process Engineering 13. 347-352.
- Fayyad, U.M., Simoudis, E. (1997). Data mining and knowledge discovery. Tutorial Notes at PADD '97 – 1<sup>st</sup> Int. Conf. Prac. App. KDD & Data Mining, London.
- Feil, B., Abonyi, J., Pach, F.P., Nemeth, S., Arva, P., Nemeth, M., Nagy, G. (2004). Semi-mechanistic Models for State Estimation, Soft Sensor for Polymer Melt Index Prediction, Lecture Notes in Computer Science, 3070. 1111-1117.
- MacGregor, J.F., Kourti, T. (1995). Statistical process control of multivariate processes, Control Eng. Practice, 3. 3. 403-414.
- Pach, F.P., Gyenesei, A., Arva, P., Abonyi, J. (2005). Fuzzy Association Rule Mining for Model Structure Identification, 10<sup>th</sup> Online World Conference on Soft Computing in Industrial Applications.
- Pach, F.P., Feil, B., Nemeth, S., Arva, P., Abonyi J. (2006). Process Data Warehousing based Operator Support System for Complex Production Technologies, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans.



Levelezési cím (*Corresponding author*):

**Balaskó Balázs**

Pannon Egyetem, Folyamatmérnöki Tanszék

8200, Veszprém, Egyetem u. 10.

*Pannon University, Department of Process Engineering*

*H-8200, Veszprém, Egyetem u. 10.*

Tel.: 36-88-624-770, Fax: 36-88-624-171

e-mail: [balaskob@fmt.uni-pannon.hu](mailto:balaskob@fmt.uni-pannon.hu)