



Autoklávos hőkezelés szimulációja élelmiszeripari vállalatok energia költségének optimalizálására

Fabulya Z.

Szegedi Tudományegyetem, Mérnöki Kar, Ökonómiai és Vidékfejlesztési Intézet, 6725 Szeged, Mars tér 7.

ÖSSZEFOGLALÁS

A konzervek, elsősorban a húskonzervek minőségét meghatározó egyik alapvető tényező a hőkezelés, mely folyamat egyúttal energiaigény szempontjából a legjelentősebb egy vállalat számára. Egy hőkezelési ciklus három fázisra bontható: felfűtés, hőntartás, lehűtés. A szükséges hőmérséklet eléréséhez jellemzően gőzt használnak, míg a hűtés vízzel történik. Termékenként eltérő előírások vonatkoznak az elérendő hőmérsékletre és a hőntartás idejére, így a teljes hőkezelés időtartama termékfüggő. Több autokláv párhuzamos működtetése esetén a folyamat egyes fázisai egybeeshetnek, így nagy ingadozással jelentkezhet a gőz- és vízigény, mely erőforrások vagy korlátozottan állnak rendelkezésre vagy többletköltség révén. Ezért célszerű összehangolni az egyes autoklávok működését a gazdaságosság érdekében. A vezetői döntés előkészítő rendszer Microsoft Excel környezetű megvalósításához és modellezéséhez szükséges adatbázist alakítottunk ki, létrehoztunk egy felhasználóbarát kezelőfelületet és a Visual Basic for Application szolgáltatással elkészítettük az ütemezést, szimulációt biztosító szoftvert. (Kulcsszavak: autokláv, hőkezelés, folyamatmodellezés, szimuláció)

ABSTRACT

Simulation of autoclaving to optimize energy costs of food industry enterprises

Z. Fabulya

University of Szeged, Faculty of Engineering, Szeged, H-6725 Mars tér 7.

One of the factors determining the quality of the cans and primarily the meat cans is the heat treatment, the process which is the most significant regarding the energy demands of an enterprise. A heat treating cycle can be divided into three phases: heating up, holding, chilling. Steam is used typically to achieve the necessary temperature and water is used for chilling. There are different regulations on temperatures and time of heat holding for each product so the duration of the heat treatment depends on the product. When operating more autoclave simultaneously certain phases of the process can overlap thus the steam and water demand can develop with big fluctuation. The availability of these resources is limited or they are accessible by extra costs. Hence it is practical to coordinate the operation of the different autoclaves in the interest of thrift. We have developed a decision support system in Microsoft Excel environment and the database needed for the model. We have also created a user friendly interface and the Visual Basic for Application software providing the timing and simulation. (Keywords: autoclave, heat treatment, modelling, simulation.)

BEVEZETÉS

Magyarországon számos, tevékenységében konzervek hőkezelését is igénylő élelmiszeripari vállalat található, melyek az Európai Unióhoz való csatlakozással a jelenleginél is erősebb piaci versenynek lesznek, lettek kitéve. E vállalatok számára döntő fontosságú a megfelelő minőségű termékek előállítására úgy, hogy mindeközben költségeiket is optimalizálják. A konzervek, elsősorban a húskonzervek minőségét meghatározó egyik alapvető tényező a hőkezelés, mely folyamat egyúttal energiaigény szempontjából a legjelentősebb egy vállalat számára, így gazdaságossági szempontból nem elhanyagolható.

Szakaszos üzemű hőkezelést megvalósító, autokláv csoportot használó vállalatoknál nagy ingadozással jelentkezhetnek energia igények, ami növeli a költséget és rontja a termék minőségét. Ezért szükséges a párhuzamosan zajló folyamatok összehangolása, ütemezése.

Célunk egy vezetői döntés előkészítő rendszer fejlesztése Microsoft Excel környezetben. Ehhez ki kell alakítani a modellezéshez szükséges adatbázist, létrehozni egy felhasználóbarát kezelőfelületet és a Visual Basic for Application szolgáltatással el kell készíteni az ütemezést, szimulációt biztosító szoftvert.

A hőkezelési folyamat matematikai és számítógépes modellezésével kapcsolatban megjelent publikációkban (*Almonacid-Merino et al.*, 1993; *Bhowmik et al.*, 1985; *Eszes et al.*, 1998, 2003; *Ramaswamy et al.*, 1982; *Welt et al.*, 1997) egy autoklávra és nem autokláv csoportra vonatkozóan foglalkoztak elsősorban csak a fűtési fázis energia igényének csökkentésével, míg a hűtési fázis vízfelhasználásának problémája háttérbe szorult. Szimulációs technikánk autokláv csoport esetén e két hőkezelési fázis erőforrás igényét egyszerre dolgozza fel a költség és a minőség optimalizálása érdekében.

ANYAG ÉS MÓDSZER

Energetikai modellezés

A modellezéshez rendelkezniünk kell a két szembenálló oldal, az igény és a kapacitás leírásához szükséges adatokkal. Először energiaigény szempontjából vizsgáljuk meg rendszerünket.

A hőkezelés energiaigényének adatai

Egy hőkezelési ciklus három fázisra bontható: felfűtés, hűntartás, lehűtés. A szükséges hőmérséklet eléréséhez jellemzően gőzt használnak, míg a hűtés vízzel történik. Az *1. ábrán* az idő függvényében látható egy termék hőkezelése során fellépő gőz- és vízigény pillanatnyi alakulása, mely ábra egy termék típus hőkezelései során mért adatok átlaga alapján adódott értékeken alapul.

A fűtési és hűtési fázisok elején jelentkezik maximális intenzitással az erőforrások igénye, míg hűntartáskor a gőzfogyasztás mértéke gyakorlatilag nulla, hiszen ekkor csak a hőveszteségeket kell fedezni.

Termékenként eltérő előírások vonatkoznak az elérendő hőmérsékletre, a hűntartás idejére, a konzervek eltérő méretűek és geometriájúak, így a teljes hőkezelés időtartama termékfüggő. Mindezek ellenére az erőforrásigény időbeli alakulásának jellege nem csak a különböző termékek esetében egyezik meg, hanem a gőz- és vízfelhasználás terén is. A *2. ábrán* látható e jelleggörbe, mely a vállalat összes terméktípusára adódott mérési eredményekből származik. A vízszintes tengelyen az időt % mértékegységben úgy kell értelmezni, hogy ekkor egy hőkezelési fázis (fűtés vagy hűtés) teljes lefutási idejét kell 100%-nak tekinteni. Ehhez hasonlóan magyarázható a függőleges tengely mértékegysége is, a hőkezelés során maximálisan fellépő erőforrásigény a 100% megfelelője.

1. ábra

Gőz- és vízigény alakulása egy termék hőkezelése során

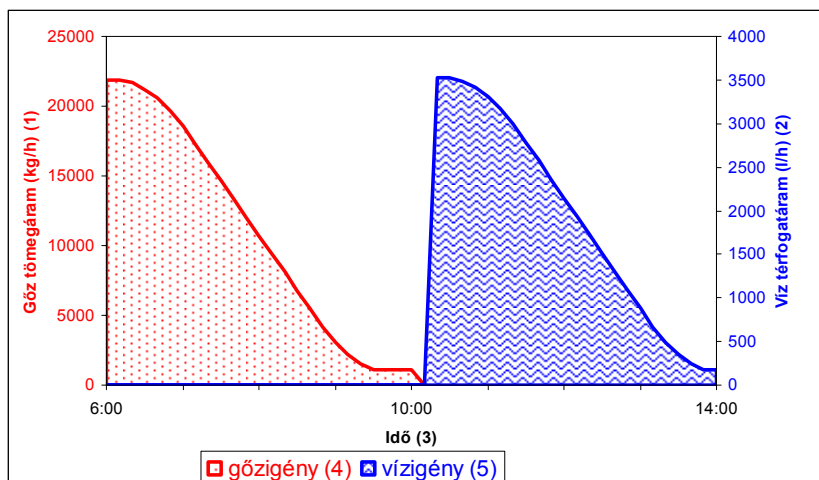


Figure 1: Development of steam and water demand during heat treatment of a product

Steam mass flow (kg/h)(1), Water volume flow (l/h)(2), Time(3), Steam demand(4), Water demand(5).

2. ábra

Erőforrás igény időbeli alakulásának jellege egy terméknel

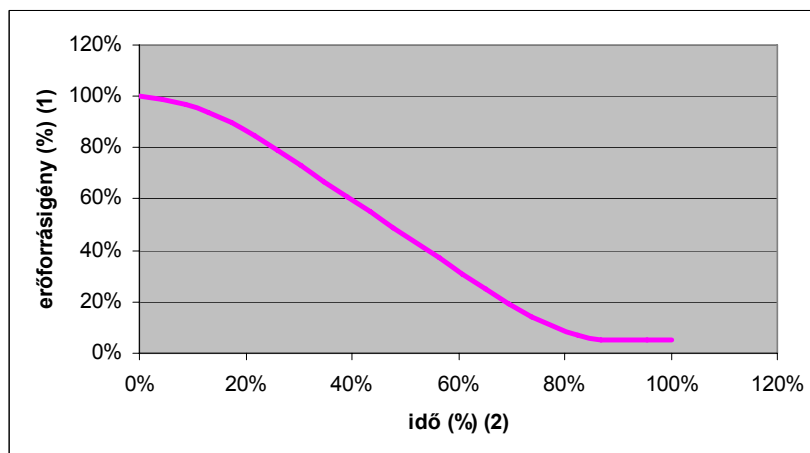


Figure 2: Nature of resource demand in function of time in case of a product

Resource demand (%) (1), Time (%) (2)

E jelleggörbe biztosítja az autokláv csoporttal megvalósított hőkezelés esetén a számítógépes energetikai modellezés alapját. Amennyiben minden termék esetén ismerjük a fűtési, hűntartási és hűtési fázisok időtartamát, valamint a fázisok kezdeti, azaz maximális erőforrásigényét, akkor a jelleggörbe transzponálásával rendelkezünk a termékek hőkezelési modellezéséhez szükséges igény oldali adatokkal.

Fűtőgőz és hűtővíz kapacitásának adatai

A vállalat hőkezelő üzemrésze számára biztosítható kapacitás adatokat mérésekkel szerezhetjük be. Univerzális, minden vállalat számára alkalmas jelleggörbe nem adható meg. Viszont ezek az adatok nem tekinthetők időben állandónak több okból sem. Egyrészt évszaktól függő eltérések is lehetnek egy vállalat esetén, másrészt egy napon belül is jelentkezhetnek periodikusan fellépő kapacitásingadozások. Ezért lehet célszerű több napon át tartó adatgyűjtést végezni különböző évszakokban, majd kiértékelve az adatokat felismerni a törvényszerűségeket a modellezés érdekében. Így például a 3. ábrán láthatóhoz hasonló görbéket kapunk a hőkezelő üzemrésze számára nyújtható kapacitásadatokról. Az ábra adatai egy év négy évszakának egy-egy heti mért eredményeinek átlagaként adódtak.

3. ábra

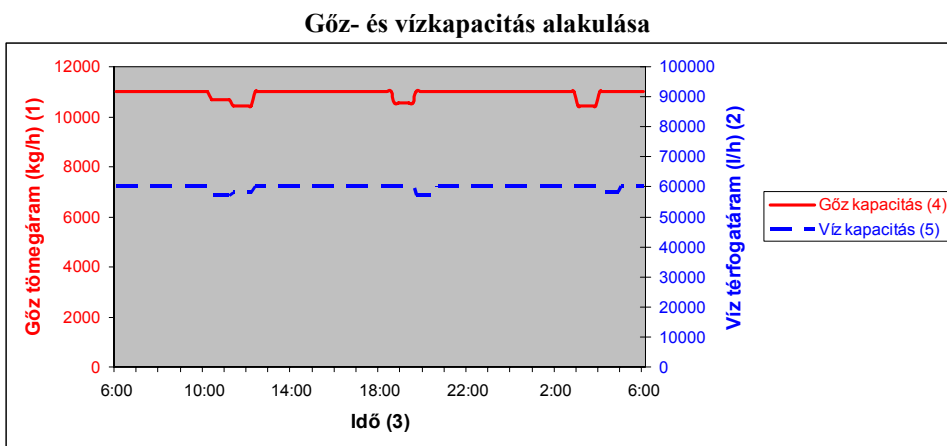


Figure 3: Development of steam and water capacity

Steam mass flow (kg/h)(1), Water volume flow (l/h)(2), Time (3), steam capacity(4), Water capacity(5).

Az Excel és a Visual Basic for Application

Az Excel táblázatkezelő kiválóan testre szabható lehetőséget biztosít a modell adatainak strukturált tárolására munkafüzet lapokon. Felhasználóbarát adatkezelő felület alakítható ki egyéni menü kialakításával, űrlapok alkalmazásával az adatkezeléshez. Elrejthetők a felhasználó elől a számítási részeredményeket tartalmazó lapok, a modell paramétereinek űrlapokon elhelyezett vezérlőkkel változtatásának hatása szemléletes grafikonon jeleníthető meg. Magunk készíthetünk függvényeket és eljárásokat, melyek használatát menüből, eszköztárról, űrlapról vezérelhetjük.

EREDMÉNY ÉS ÉRTÉKELÉS

Ütemezés megvalósítása

A hőkezelés energetikai modellezésére és az ütemezés megvalósítására kialakítottunk egy munkafüzetet, mely tartalmazza:

- az energiaigény jelleggörbe adatait,
- a termékek adatait az ütemezéshez: termékazonosító, név, fűtési idő, hőtartási idő, hűtési idő, maximális gőz tömegáram igény, maximális víz térfogatáram igény, maximális várakozási idő,
- az aktuális napon (holnap) hőkezelendő termékek adatait: sorszám, termékazonosító, legkorábbi hőkezelés kezdési időpont, a hőkezelés kezdésének várakoztatási ideje, még ütemezhető (igen/nem),
- számológépet az aktuális napon hőkezelendő termékek összegzett gőz- és vízigényének napi alakulásának meghatározására, illetve ezek kapacitás túllépésének összegzésére,
- Visual Basic eljárásokat az ütemezéshez,
- diagramot a gőzfelhasználásról (4. ábra) és a vízfelhasználásról,
- egyedi menüt az eljárások végrehajtásának vezérlésére,
- űrlapokat az adatok karbantartására (5. ábra), a kézi (6. ábra) és gépi ütemezés megvalósítására.

A munkafüzet megnyitásakor az Excel megszokott menüje helyett az ütemezési feladatok elvégzését támogató menü jelenik meg, valamint az előző napi használat során a munkafüzetben tárolt ütemezési adatok szerinti gőz- és vízfelhasználási diagram (4. ábra). A Visual Basic for Application eseményvezérelt programozási technikája biztosítja, hogy egy esemény (munkafüzet megnyitása, klikkelés egy menüponton vagy egy parancsgombon) bekövetkezésekor hajtódjon végre valamely programrészletünk, eljárásunk.

4. ábra

A gőzfelhasználás napi alakulása

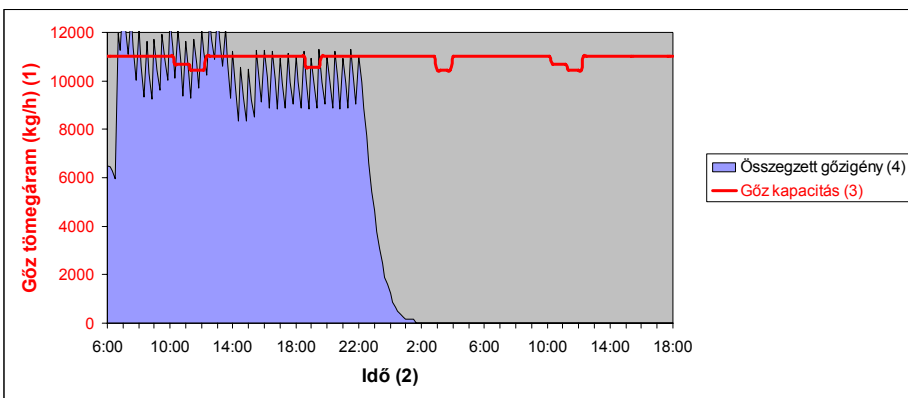


Figure 4: Development of daily steam consumption

Steam mass flow (kg/h)(1), Time(2), Steam capacity(3), Sum of steam demand(4)

5. ábra

Termékek adatkarbantartásának űrlapja

Label	Value
termékszám (1):	4
név (2):	Burg. corned beef
fűtési idő (óra:perc) (3):	0:40:00
max gőz tömegáram (kg/h) (4):	4000
hűtési idő (óra:perc) (5):	0:30:00
max víz térfogatáram (l/h) (6):	21000
max várakozási idő (óra:perc) (7):	0:00:00
hőntartási idő (óra:perc) (8):	0:00:00

4 / 7

- Új (9)
- Töröl (10)
- Előző állapot (11)
- Előző (12)
- Következő (13)
- Szűrő (14)
- Bezárás (15)

Figure 5: Form of data servicing

Product ID(1), Name(2), Duration of heating (hour:minute)(3), Max. steam mass flow (kg/h)(4), Duration of chilling (hour:minute)(5), Max. water volume flow (l/h)(6), Max wait time (hour:minute)(7), Duration of heat holdong (hour:minute)(8), New(9), Delete(10), Previous state(11), Previous(12), Next(13), Filter(14), Close(15).

A program menüszerkezete

- Fájl: Új ütemezés, Megnyitás, Mentés, Mentés másként, Nyomtatási kép, Nyomtatás, Kilépés
- Adatok: Termékek általános adatai, Hőkezelendő termékek listája
- Ütemezés: Kézi, Gépi
- Súgó: A program használata, Névjegyzék

Az „Új ütemezés” parancs kiadásakor a program törli a tárolt terméklistát, és az előző ütemezés alapján kalkulált, a következő napra átnyúló erőforrásigényeket áttemeli, hogy az új napi adatok alapját adják. Tehát a program nem csak egy nap 6:00-6:00-ig terjedő időszakában számítja és tárolja 10 perces bontásban az adatokat, hanem 6:00-18:00-ig. Így további 12 óra adataival biztosítja az esetleg három műszakos üzemelést, ahogy ez a 4. ábrán is látható.

Nyomtatáskor az ütemezésnek megfelelő sorrendben kapjuk meg a terméklistát.

Kézi ütemezés során (6. ábra) a hőkezelendő terméklista egy termékének várakoztatási idejét lehet léptető nyíllal léptetni 10 perces lépésközzel egy űrlapon, miközben a gőz és víz felhasználásának alakulása diagramokon követhető grafikusán. Az űrlapon rekordléptető biztosítja a terméklistában közlekedést, valamint megjelennek

a léptetés hatására frissített értékű, az ütemezések összehasonlítását szolgáló víz- és gőzfogyasztási mutatószámok.

6. ábra

Kézi ütemezés űrlapja

Kézi ütemezés (1)

sorszám: (2) 17 Termék név: (3) 12 lbs Alisca2 sonka

Legkorábbi kezdési idő: (4) 11:30

Még ütemezhető: (5)

várakoztatási idő: (6) 40

Számított értékek (7)

Gőz kapacitás túllépés: (8) 180

Víz kapacitás túllépés: (9) 0

Előző termék (10) Következő termék (11) OK

Figure 6: Form of manual scheduling

Manual scheduling(1), Number(2), Product name(3), Earliest time to begin(4), Yet can be scheduled(5), Wait time(6), Calculated values(7), Steam capacity overrun(8), Water capacity overrun(9), Previous product(10), Next product(11).

A gépi ütemezés alapja

Az energetikai adatok modellezése során egy teljes nap (általában a holnapi nap) során megjelenő összegzett pillanatnyi erőforrásigényekkel rendelkezünk 10 perces bontásban. Ennél nagyobb felbontást nem érdemes alkalmaznunk, hiszen legalább ekkora pontatlansággal kalkulálható egy nappal előre az elkészülő konzervek megérkezési időpontja a hőkezelő üzemszabályozásba. A termékekre vonatkozó, élelmiszerbiztonságból eredő korlátja az ütemezésnek a maximális várakozási idő a konzerv hőkezelésének megkezdéséig. A maximális várakozási időket meg nem haladó minden olyan ütemezés a feltételeknek megfelelő, melynek erőforrásigénye a nap folyamán egyszer sem lépi túl a gőz- illetve vízkapacitásból eredő korlátot, ha egyáltalán létezik ilyen ütemezés. Minden ütemezés esetén kiszámítható két mutatószám, melyekkel az egyes ütemezések összehasonlíthatók. Ezek a gőz- illetve a vízkapacitás túllépéseiből határozhatók meg egyszerű összegzéssel. Így válhat összehasonlíthatóvá két ütemezés. Kérdéses viszont egy újabb ütemezés összehasonlítása a korábbival, amikor a két mutatószám közül az egyik értéke csökkent, míg a másiké nőtt. Ahhoz, hogy ilyen esetekben is választ tudjunk adni, a két különböző mértékegységű mutatószám alapján egyetlen adatot kellene

kialakítanunk. Erre úgy lenne lehetőségünk, ha az egyes erőforrások kapacitások feletti többlet igényét pénzben tudnánk kifejezni. Ehhez rendelkezniünk kellene az erőforrások túllépéséből származó többletköltségek egységnyi erőforrásra vetített értékével, s e konstansokkal súlyozott összegeként a gőz- és vízkapacitások mennyiségi túllépéséből egyetlen érték, a többletköltség lenne megkapható. Sajnos e súlyként funkcionáló értékek közül csak a gőzfelhasználásból származó egységköltség állhat rendelkezésünkre, de csak akkor, ha a vállalat külső gőzszolgáltatótól is pótolhatja hiányát, vízfelhasználáskor viszont ez nem járható út. Kapacitások feletti vízigény megjelenésekor nem biztosítható a megfelelő sebességű hűtés, így ebben a fázisban további hőterhelésnek tesszük ki a terméket, mely a termék minőségét rontja. Tehát a termék minőségének kritériumaként az egyenletes, illetve a kapacitást meg nem haladó vízfelhasználás jelenik meg.

Az eddigiek alapján megállapítható, hogy a gőz- illetve a vízkapacitás túllépésének mennyiségét jelző két mutatószám súlyozott összegeként adódó érték minimumára kell törekednünk. A súlyként funkcionáló egységköltség adatok hiányában is alkalmaznunk kell ilyen súlyértékeket, de ekkor e két súlyérték egymáshoz viszonyított relatív nagyságának, arányának van jelentős szerepe az ütemezés során. Akkor tekinthető semlegesnek a gőzre illetve vízre vonatkozó súlyértékek aránya, amikor a relatív túllépéseket egyforma súllyal vesszük figyelembe. Ekkor a kapacitás értékek aránya megegyezik a súlyok arányával. Ha a semlegestől eltérően a vízre vonatkozó súlyt megnöveljük, akkor az ütemezés során adódó optimumnál a vízkapacitás túllépéseket csökkenthetjük a gőzkapacitások túllépésének rovására. Mindez persze fordítva is igaz.

Célunk az egyenletes vízfelhasználást biztosító ütemezések közül kiválasztanunk a gőzigényből származó legkisebb költségűt, így garantálható a legjobb elérhető termékminőség, minimális költséggel. Ehhez tehát a semleges súlyaránytól eltérő, a vízkapacitás túllépést erősebben „büntető” súlyokat kell alkalmaznunk. Az ütemezést végrehajtó program futtatási tapasztalatai alapján a semlegeshez viszonyított háromszoros értékű vízre vonatkozó súlyérték alkalmazása célszerű.

A gépi ütemezés algoritmus

Az ütemezés során arra kell választ kapnunk, hogy egy nap során az egyes termékek hőkezelését milyen időpontban kell elkezdenünk az adott időkorlátok között (10 perces bontásban) úgy, hogy a gőz- illetve vízkapacitások túllépéséből származó súlyozott összeg, mint célérték minimális legyen. Az állapottér (20-30 termékre vonatkozó kezdési időpontok összes variációja) teljes bejárása indokolatlanul nagy futási időt eredményezne, ezért a következő algoritmus is elegendőnek bizonyult:

1. A célérték kezdőértékének meghatározása a termékek hőkezelésének legkorábbi elkezdésekor.
2. Ha a célérték nulla, vége az eljárásnak. Az optimális kezdési időpontja a termékek hőkezelésének a legkorábbi.
3. Egyenként, minden egyes terméken (amely még ütemezhető) egyszer végighaladva beállítjuk az adott termékre vonatkozó korlátok közötti kezdési időpontok közül azt, amikor a legkisebb célérték adódik.
4. A 3. lépést addig ismételjük, míg a célérték nulla nem lesz, vagy nem csökken tovább. Különben az eljárás befejeződik, a termékek hőkezelésének optimális kezdési időpontja az utoljára beállított érték.

A program azt a lehetőséget is biztosítja, hogy az aktuális napra vonatkozó, de még el nem kezdett hőkezeléseket újra tudjuk ütemezni, ha erre valamilyen előre nem

tervezhető okból szükség lenne. Ekkor lesz jelentősége a „még ütemezhető” adatnak, melynek alapértelmezett értéke „igen”, de a már megkezdett hőkezelések esetén ezt „nem”-re kell állítani.

KÖVETKEZTETÉSEK

Autokláv csoport működésének szimulációjával számszerű és grafikus eredményeket kaptunk a gőz- és vízigények kapacitásokhoz viszonyított alakulásáról. Az ütemezés pozitív hatása így egyértelműen igazolódott.

Energetikai modellünk kapcsán a teljesség érdekében meg kell jegyeznünk, hogy ez az egyik legegyszerűbb kezelhető modell, s mint ilyen, több tényezőt nem vesz figyelembe. Modellünk nem számol azokkal a hatásokkal, melyek akkor jelentkeznek, amikor a legjobb ütemezés ellenére is fellépő kapacitás feletti igények nem fedezhetők. Ekkor a hőkezelés egyes fázisainak időtartama megnövekszik, mely hatást egyszerű modellünk elhanyagolja.

Továbbfejlesztési lehetőségként megemlítem a folyamatmodellek közvetlen számítógépi leképezésére kifejlesztett generikus kétrétegű háló modellen alapuló szoftvertechnológia alkalmazását, mely alkalmas lehet a gazdasági folyamat dinamikus szimuláción alapuló tervezésére (*Bánkuti et al.*, 2005), illetve az ütemezés megvalósítására.

IRODALOM

- Almonacid-Merino, S.F., Simpson, R., Torres, J.A. (1993). Time-variable retort temperature profiles for cylindrical cans: batch process time, energy consumption, and quality retention model. *Journal-of-Food-Process-Engineering*, 16. 4. 271-287.
- Bánkuti, G., Csukás, B. (2005). Generic bi-Layered Net Model: Generic Methodology for Process Simulation. In: Artificial intelligence applications and innovations: IFIP TC12 WG12.5–Second IFIP Conference on Artificial Intelligence Applications and Innovations (AIAI2005), Beijing, China, Li. D., Wang, B. (eds.) Springer : New York, 691-700.
- Bhowmik, S.R., Vichnevetsky, R., Hayakawa, K.I. (1985). Mathematical model to estimate steam consumption in vertical still retort for thermal processing of canned foods. *Lebensmittelwissen-schaft und Technologie* 18. 1. 15-23.
- Eszes, F., Huszka, T. (1998). Megfontolások a húsipari főzési és pasztöröző hőkezelések modellezéséhez. I. rész: A pasztöröző hőkezelés kezdeti és peremfeltételeinek vizsgálata. *A Hús* 1. 11-17.
- Eszes, F., Rajkó, R., Szabó, G. (2003). Energia és vízfelhasználás csökkentés lehetőségeinek feltárása a húsiparban. *Proceedings of 10 Symposium on Analytical and Environmental Problems, MTA Szegedi Akadémiai Bizottság Kémiai Szakbizottság Környezetvédelmi és Analitikai Munkabizottsága, Szegedi Tudományegyetem : Szeged*, 169-174. p.
- Ramaswamy, H.S., Lo, K.V., Tung, M.A. (1982). Simplified Equations for transient Temperatures in Conductive Foods with Convective Heat Transfer at the Surface. *General of Food Science*, 47. 6. 2042-2047., 2065.
- Welt, B.A., Teixeira, A.A., Chau, K.V., Balaban, M.O., Hintenlang, D.E. (1997). Explicit finite difference methods for heat transfer simulation and thermal process design. *Journal of Food Science*. 62. 2. 230-236.

Levelezési cím (*Corresponding author*):

Fabulya Zoltán

Szegedi Tudományegyetem, Mérnöki Kar, Ökonómiai és Vidékfejlesztési Intézet
6725 Szeged, Mars tér 7.

University of Szeged, Faculty of Engineering

H-6725 Szeged, Mars tér 7.

Tel.: 36-62-546-000, Fax: 36-62-546-027

e-mail: fabulya@mk.u-szeged.hu