

Hűtéstechnikai rendszer energetikai vizsgálata dinamikus szimulációval

Dr. Kassai Miklós PhD.¹, Simon Richárd²

Abstract

The object of this research study is to develop a dynamic simulation model that can be used to investigate energy performance of On-Off and PID controlled refrigerant systems used in cooling chambers. The model was developed to take into account also the types of compressors, feeder and control units used commonly in practice for energetic investigations. Using the measured energy consumption data obtained by experimental tests during the previous phase of this research work, the validation of the developed energy simulation model by MatLab R2016a could be also achieved with good agreement. The developed simulation model enables the investigation of the thermal behaviours and energy consumption of a designed cold store for building service engineers. Using the model the effect of the control system on the energy consumption and on the cooling rate can be also investigated which can influence also the quality of the stored goods.

1. Bevezetés

Egy korábbi kutatási munkánkban a kereskedelmi szektorban elterjedőben lévő, új fejlesztésű DC inverteres hűtőaggregát energiafogyasztásának optimalizálására került sor, amely fordulatszám szabályozású kompresszort, az elektronikus expanziós szelepet és a PID szabályozót tartalmazott [1]. A vizsgálati célok megvalósítása érdekében egy kísérleti mérőállás épült egy hazai piacvezető hűtéstechnikai rendszereket forgalmazó cég bemutatótermében. A mérőrendszer fő része egy hűtőkammera, amely belül két azonos elpárologtatót tartalmazott; az egyiket a DC inverteres hűtő aggregáttal üzemeltetik, a másik számára pedig a hazai piacon nagyon széles körben elterjedt, hagyományos hűtőberendezés biztosítja a hűtési energiát, amelyet egy hagyományos dugattyús kompresszor, a mechanikus expanziós szelep és az On-Off (kétállású) szabályozó technika működtet [1-10]. A gyártó által szolgáltatott hiányos adatok miatt a DC hűtőberendezés PID szabályozóját optimalizálni kellett a megfelelő arányos, integráló és differenciáló paraméterértékek beállításával az energiatakarékos üzemeltetés biztosítása érdekében.

A kutatás folytatása gyanánt a PID és az On-Off szabályozott hűtőrendszerek energetikai tulajdonságainak vizsgálatát végeztem, illetve a hűtőkammerában helyezett termék hatásának is vizsgáltam a kamra léghőmérsékletére, illetve a termék hűlésére vonatkozóan.

¹ egyetemi docens

² végzett MSc hallgató

BME Gépészmérnöki Kar, Épületgépészeti és Gépészeti Eljárás Technika Tanszék



A kutatási munka korábbi szakaszában végzett kísérleti tesztek során eredményül kapott mért energiafogyasztási adatok felhasználásával a kutatás folytatása során kifejlesztett szimulációs modell által kapott eredmények jól fedték egymást, így igazoltuk a modell helyességét és alkalmazhatóságát. Az eredményekről tudományos folyóirat cikk jelent meg a Magyar Épületgépészet, LXVIII. évfolyam, 2019/12. számában [11]. A kifejlesztett szimulációs modell lehetővé teszi a tervezett hűtőkammera hőtechnikai tulajdonságainak és energiafelhasználásának vizsgálatát épületgépészeti mérnökök számára. A kidolgozott szimulációs modell segítségével megvizsgálható az adott szabályozású hűtéstechnikai rendszernek az áru betárolása következtében szükséges lehűlési folyamat gyorsaságára gyakorolt transziens hatás, amely befolyásolhatja a betárolt áruk minőségét is. A kutatómunkában asszisztált *Simon Richárd* MSc hallgató, munkájából egy kiváló minőségű TDK dolgozat [12] és diplomamunka született [13].

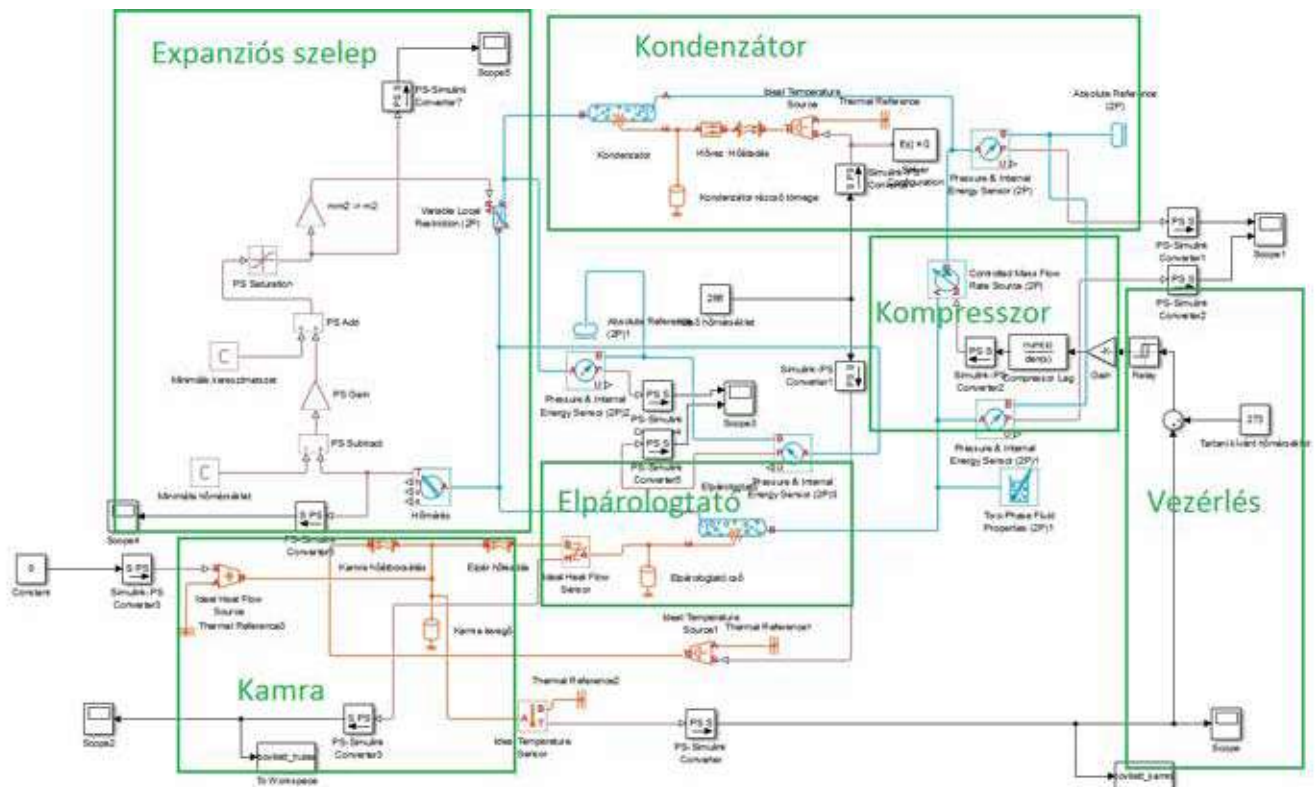
2. A szimulációs modell bővítése, a hűtési körfolyamat modellezése

A témában korábban vezetett kutatási eredményekből kiderült, hogy a szimulációs eljárás eredményei a hűtőközeg figyelembevételével tovább finomítható. Ahhoz, hogy ezt megtehesük, a teljes hűtési körfolyamatot le kell modellezni, hiszen a hűtőközeg ebben kering. A számunkra hasznos jelenség, a kamrában lévő hő elvétele ennek a hűtőkörfolyamatnak az eredménye. A Matlab Simulink modulja erre a modellezésre is lehetőséget biztosít, mivel tartalmaz eszköztárat kétfázisú anyagokhoz is. Mivel a hűtőközeg a rendszerben vagy gáz, vagy folyadék halmazállapotú, így az is egy kétfázisú anyagként kezelhető. Az így felépített modellt a következő oldalon található **1. ábrán** láthatjuk.

Az ábrán jól látható, hogy a modell a korábban kidolgozott termikus modellhez képest így jelentősen összetettebb lett. A kék színnel jelölt részek a kétfázisú anyaghoz tartozó elemeket, a piros egységek pedig a termikus elemeket (a korábbi modell javított változata) jelölik.

Megnevezések:

- Vezérelhető tömegáram: ez lényegében a kompresszor, amely a vezérlésnek megfelelő tömegáramot és nyomásnövekedést biztosítja.
- Hőleadással rendelkező csővezeték: ilyen a kondenzátor és az elpárologtató. A cső geometriájának és a rajta áthaladó anyag függvényében kiszámolja a modell, hogy mekkora hő leadására képes a csőszakasz.
- Fojtás: az expanziós szelep megfelelője. Beállítható rajta a fojtás mértéke.
- Kétfázisú anyag tulajdonságai: ez az elem arra szolgál, hogy a kétfázisú anyagot definiálva, azt a modellhez tudjuk csatolni.

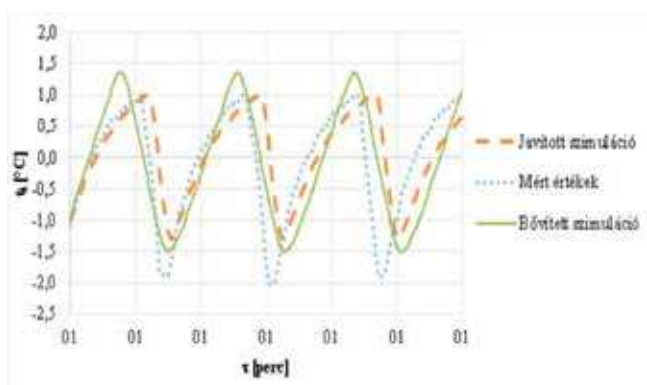


1. ábra. A hűtőkörfolyamat szimulációs modelljének elvi vázlatja

A modell nagy hátránya, hogy rengeteg olyan adat megadása szükséges, amelyeket az eddig vizsgált esetekben nem kellett megadni és ezek mindegyike a hűtési körfolyamathoz tartozik. Ezeket az adatokat az **1. táblázatban** foglaltam össze.

A kétfázisú anyaghoz szükséges adatok száma nagy. Ahhoz, hogy reálisan viselkedjen a folyadék, 0-tól 3 bar-ig történő nyomástartományon, a nyomást 60 részre kell bontani. Egy-egy ilyen részhez tartozik mennyiségként 25 érték. Ez azt jelenti, hogy egy fázishoz szükséges rendezett adatok száma: 10 500. Tehát a teljes kétfázisú anyag definiálásához 21 000 adat szükséges és a rendszer működéséhez emellé kellene még az 1. táblázatban felsorolt adatok. A további ismeretlen paramétereket becsléssel határoztam meg.

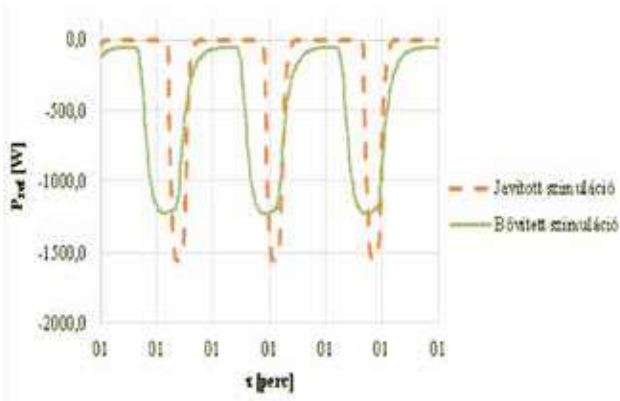
Az On/Off vezérelt esetre a kamra léghőmérsékletének és a hűtési teljesítménynek az alakulását a **2. és 3. ábra** mutatja be.



2. ábra. A kamrahőmérséklet időbeli változása a mért, a javított és bővített szimuláció számításai alapján On-Off szabályozott hűtőtechnikai rendszer esetén

1. táblázat. A hűtőkörfolyamat modellezése során figyelembe vett paraméterek

Rész	Szükséges adat
Kondenzátor és elpárologtató	Csőhossza
	Átmérője
	Keresztmetszete
	Sűrűsége
	Anyagának fajhője
	Anyagának sűrűsége
	Ellenállása
	Az áthaladó közeg gáz részaránya
Expanziós szelep	Az áthaladó közeg kezdeti nyomása
	Minimális keresztmetszet
Kömresszor	Maximális keresztmetsze
	Minimális hőmérséklet
Kétfázisú anyag	Maximális hőmérséklet
	A szállított tömegáram
	Nyomásvektor
	Minimális fajlagos belső energia
	Maximális fajlagos belső energia
	Folyadékra: normalizált belsőenergia vektor, és annak függvényében
	fajlagos térfogat és entrópia, hőmérséklet, kinematikai viszkozitás, hővezetés, Prandtl-szám, a telített folyadék belső energia vektora
	Ugyanezek gáz halmazállapotra



3. ábra. A hűtési teljesítmény időbeli változása a javított és a bővített szimuláció esetén

Észrevehetjük, hogy a 3. ábrán ábrázolt hűtési teljesítmény a kompresszor állási időszakában se éri el a 0 W-ot. Ez hideg hűtőközezből eredő hűtési teljesítmény, amely folyamatosan melegedik, míg áll a kompresszor, ezzel hőt vonva el a kamrából.

Az On-Off szabályozású hűtőkörfolyamat vizsgálatára kifejlesztett szimulációs modell alkalmazásával a rendszer bármely pontján mérhető a rendszerben uralkodó nyomás, hőmérséklet, belső energia, gőz tartalom vagy akár a fajlagos térfogat.

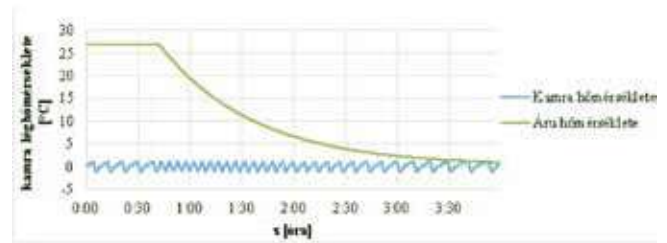
3. Instacioner vizsgálatok szimulációs eljárással

A kutatás során szimulációs eljárással megvizsgáltam a kamrába betárolt friss árunak a kamra léghőmérsékletére, a hűtési teljesítményre és az energiafelhasználásra gyakorolt hatását is. A vizsgálatokhoz, ha 5 kg, a víz fajhőjét megközelítő, kezdetben 27 °C-os terméket helyeztünk a kamrába.

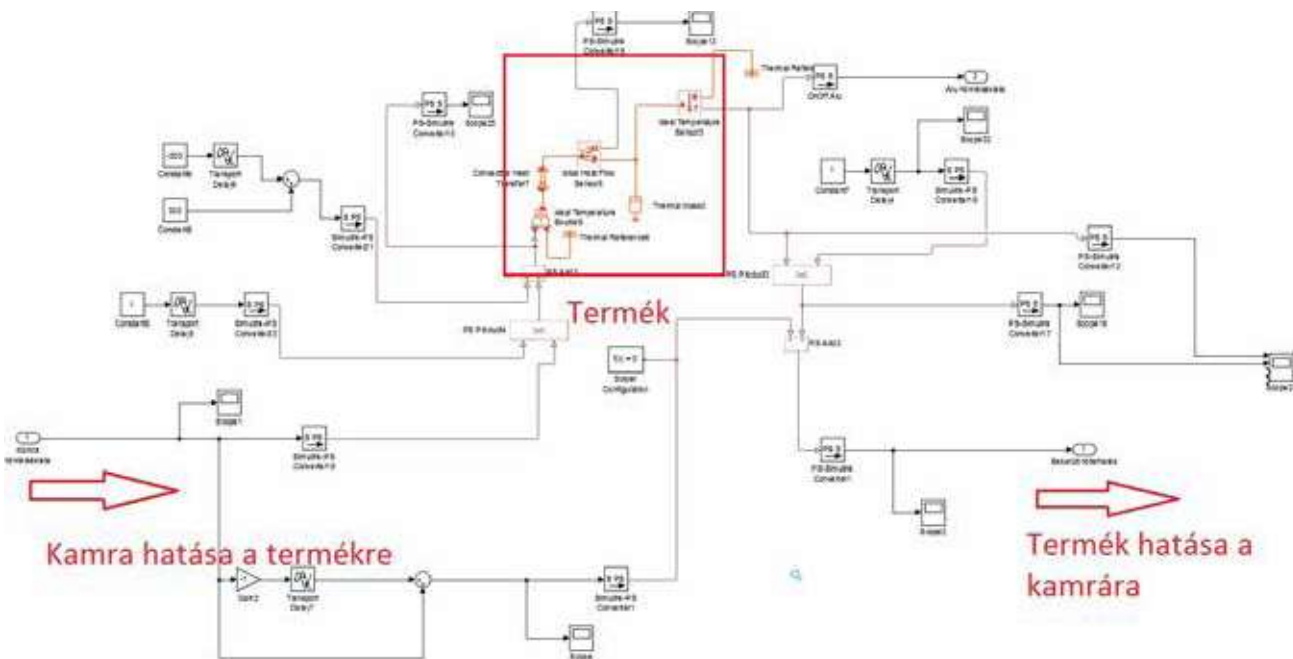
Először azt kellett meghatározni, hogy milyen hőátadási tényező legyen a termék és a kamra levegője között. Ezt az elpárolgotatott üzemelő ventilátor konvekciós működéséből adódóan 15 W/m²K-nek veszem fel. A vizsgálat állandósult állapotban történik, a 40. percben pedig megjelenik a termék a kamrában. Ennek matematika Simulink-ben történő megvalósítását a 4. ábrán láthatjuk majd. A modell hiányossága, hogy az áru bepakolása egy pillanat alatt megtörténik, így az ajtó nyitása még nincs modellezve, ami cél a kutatási munka folytatása gyanánt.

A következő oldalon bemutatott 5. ábrán látható, hogy az előbb ismertetett időzített rendszer egy alrendszerben helyezkedik el az eredeti modellhez képest.

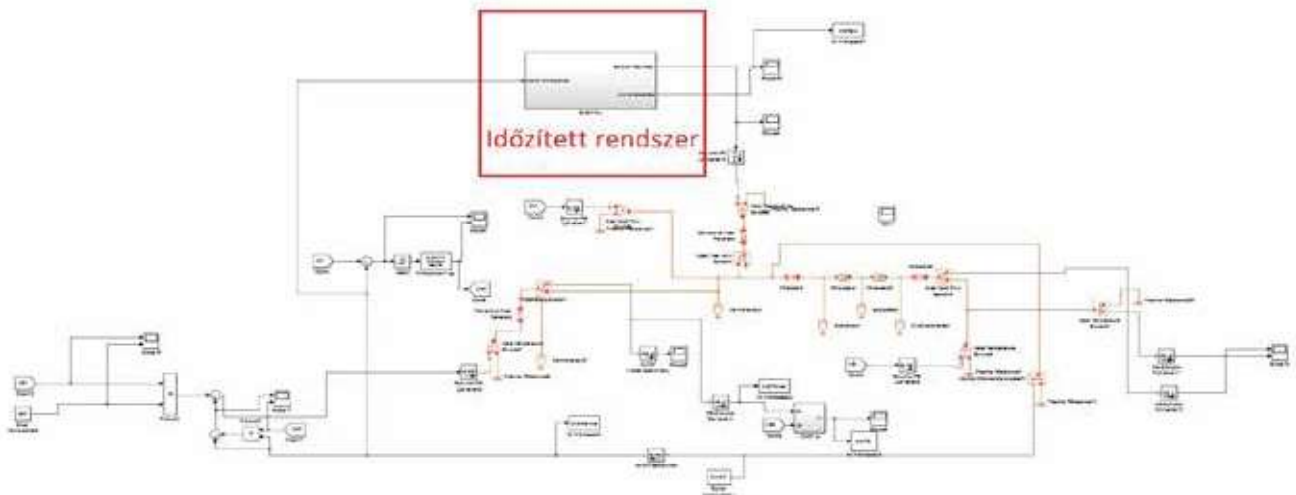
Az eredményeket 6. - 10. ábrák foglalják össze. A 6. ábrán láthatjuk az On/Off vezérelt kamra léghőmérsékletének és az áru hőmérsékletének időbeli változását, a szintén a következő oldalon bemutatott 7. ábrán ugyanezt PID esetben (a jobb átláthatóság értelmében az x tengely felső határát korlátoztuk).



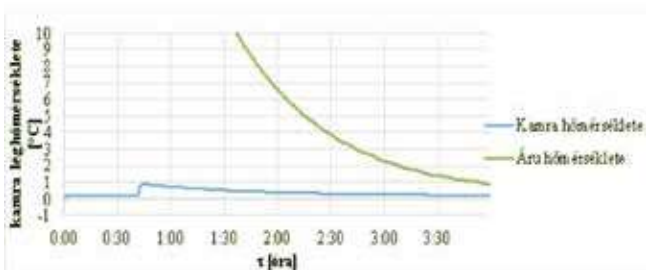
6. ábra. Az On/Off vezérelt kamra léghőmérsékletének és az abba helyezett áru hőmérsékletének időbeli változása



4. ábra. Az időzített termékbehelyezés modellezése Simulinkben

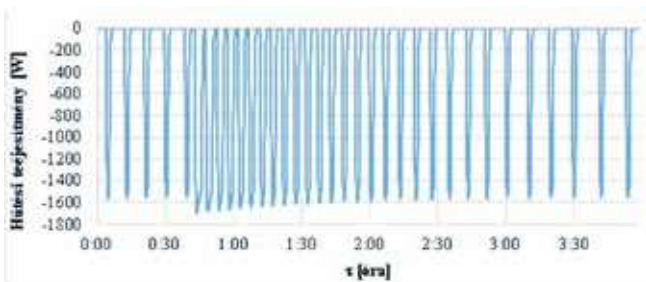


5. ábra. Az időzített rendszermodell csatlakozása a meglévő szimulációs modellhez



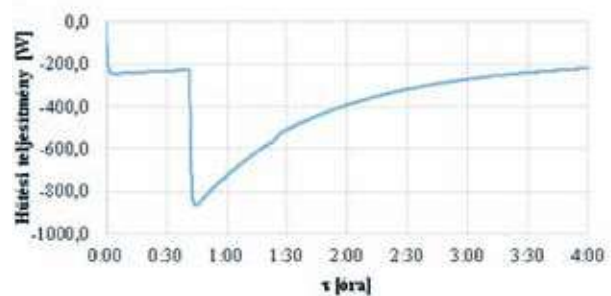
7. ábra. A PID vezérelt kamra lég hőmérsékletének és az abba helyezett áru hőmérsékletének időbeli változása

A 8. és 9. ábrán az On/Off illetve PID vezérelt rendszer hűtési teljesítményének időbeli változását láthatjuk, a 10. ábrán pedig a két különböző vezérléssel üzemelő hűtéstechikai rendszer energiafelhasználásának időbeli változását áru betárolását követően.

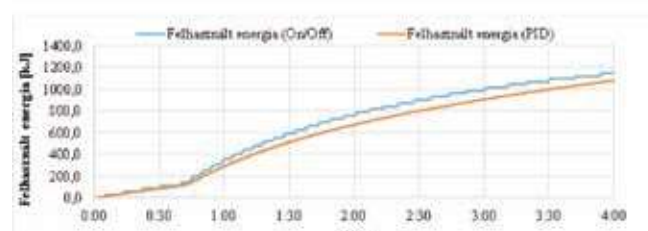


8. ábra. A PID vezérelt kamra hűtési teljesítményének időbeli változása az áru betárolását követően

A 6-10. ábrákon látható a különböző szabályozási mód-szer esetében a kamrába betárolt terméknek a hűtéstechikai rendszer energiafogyasztására, illetve a kamra lég hőmérsékletére és az áru lehűlésének gyorsaságára gyakorolt hatása. Az On-Off esetben az áru bekerüléssel a termék és a kamra levegője közti nagy hőmérsékletkülönbségnek köszönhetően a termék gyorsan tudja melegíteni levegőt. Mivel a hűtőberendezés a kamra levegőjének hőmérséklete alapján szabályoz, ezért -1 °C lég hőmérsékletnél ugyanúgy kikapcsol, ezt pedig szintén azonosan tudja lehűteni, mint előtte.



9. ábra. A PID vezérelt kamra hűtési teljesítményének időbeli változása az áru betárolását követően



10. ábra. A PID és On-Off vezérelt hűtéstechikai rendszer energiafelhasználásának időbeli változása áru betárolását követően

Ez a kapcsolási szám növelésével jár, ami károsíthatja a kompresszort, így rövidülhet annak élettartama, valamint többször jelentkezik az indítási áram hatása is, aminek következtében különbség jelentkezik a PID szabályozású hűtőgép energiafelhasználásához képest, amit a 10. ábrán is láthatunk.

Ebből belátható, hogy a két vezérlés között annál jelentősebb a különbség, minél gyakrabban pakolunk árut a kamrába. A PID vezérelt esetben azt a következtetést szűrhetjük le, hogy a rendszer rugalmasan képes követni a behelyezett termék hűtési igényét és a szabályozás megfelelő pontosságú beállításával hatékonyan biztosítani a szükséges hűtési teljesítményt. Miután a terméket megfelelően lehűtötte, már csak a transzmissziós hőveszteséget kell a gépnek fedeznie, vagyis a hőntartást kell csak biztosítani.

Ebben a kutatási munkában a PID és az On-Off szabályozott hűtőrendszerek energetikai tulajdonságainak vizsgálatát végeztem, illetve a hűtőkamrában helyezett termék hatását is vizsgáltam a kamra léghőmérsékletére, illetve a termék hűlésére vonatkozóan. A kutatási munka korábbi szakaszában végzett kísérleti tesztek során eredményül kapott mért energiafogyasztási adatok felhasználásával a kutatás folytatása során kifejlesztett szimulációs modell segítségével kapott eredmények jól fedték egymást, így igazoltam a modell helyességét és alkalmazhatóságát.

A kamrába behelyezett 5 kg áru tranziens vizsgálatának eredménye azt mutatta, hogy a lehülési idő 4 órát vesz igénybe a betárolt árunak a 27 °C kezdeti hőmérsékletől körülbelül 1 °C-ig történő hűtése során. Az energiafogyasztás 17 996 kWh volt a PID szabályozással és 19 068 kWh volt az On-Off szabályozott hűtőrendszerrel. A lehülés során a két rendszeren végzett tranziens vizsgálatok eredménye alapján megállapítható, hogy az 5 kg tömegű áru hűtése 4 óra alatt 1,072 kWh (5,62%) energia megtakarítást és 28,16 Ft költség megtakarítást eredményezett, figyelembe véve a hazai ipari fogyasztói energiaárat (26 Ft / kWh), a PID szabályozott rendszerrel az On-Off vezérelt rendszerhez képest. A kutatási munka folytatása során céloim, a lehülési folyamatok esetében a szimulációs eljárás mellett kísérletekkel is véghezvigyem energetikai és gazdasági vizsgálataimat.

A kifejlesztett szimulációs modell lehetővé teszi a tervezett hűtőkamra hőtechnikai tulajdonságainak és energiafelhasználásának vizsgálatát épületgépész mérnökök számára. A kidolgozott szimulációs modell segítségével megvizsgálható az adott szabályozású hűtéstechikái rendszernek az áru betárolása következtében szükséges lehülési folyamat gyorsaságára gyakorolt tranziens hatása, ami befolyásolhatja a betárolt áruk minőségét is.

Támogatók

Ez a kutatási munka a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal támogatásával az NKFI Alapból [azonosítószám: NKFIH PD_18 127907] valósult meg, valamint a Magyar Tudományos Akadémia Bolyai János Kutatási Ösztöndíja támogatásával készült, Budapest, Magyarország.

Felhasznált irodalom

- [1] Miklos Kassai, Laszlo Kajtar, Jozsef Nyers: Experimental optimization of energy consumption for DC refrigerator by PID controller tuning and comparison with On-Off refrigerator. Thermal Science. DOI: 10.2298_TSCI170504188K. (2017) (Közlésre elfogadott!)
- [2] Ekren, O., et al., Comparison of different controllers for variable speed compressor and electronic expansion valve, International Journal of Refrigeration, 33 (2010), pp. 1161-1168.
- [3] Matysko, R., Theoretical model of the operation parameters regulated by the MIMO and SISO system in a cooling chamber, International Journal of Refrigeration, 58 (2015) pp. 53-57.
- [4] Ekren, O., et al., Performance evaluation of a variable speed DC compressor, International Journal of Refrigeration 36 (2013), pp. 745-757.
- [5] Buzelin, L.O.S, et al., Experimental development of an intelligent refrigeration system, International Journal of Refrigeration, 28, (2005), pp. 165-175.
- [6] Hamid, N.H.A., et al., Application of PID Controller in Controlling Refrigerator Temperature. The 5th International

Colloquium on Signal Processing & Its Applications (CSPA), Kuala Lumpur, Malaysia, 2009.

- [7] Aström, K.J.; Hägglund T., PID Controllers: Theory, Design, and Tuning, second ed. Instrument Society of America, Research Triangle Park, USA, N.C., 1995
- [8] Ziegler, J.G., Nichols, N.B., Optimum Settings for Automatic Controllers. Trans. ASME, 64 (1942), pp. 759-768.
- [9] Nyers J., et al., Modern and traditional regulation of the evaporation process in the heat pump, 24rd International Conference "Vyukurovanie 2016", Stara Lubovnja, Slovakia. 2016, pp. 265-270.
- [10] Anantachaisilp, P., Lin, Z., An experimental study on PID tuning methods for active magnetic bearing systems, International Journal of Advanced Mechatronic Systems, 5 (2013), pp. 146-154.
- [11] Kassai Miklós, Simon Richárd, PID és ON-OFF szabályozású hűtéstechikái rendszer termikus szimulációs modellezése, Magyar Épületgépészet, LXVIII. évfolyam, 2019/12. szám, HU ISSN 1215-9913, pp. 11-14. (2019)
- [12] Simon Richárd, Hűtőkamra energiafelhasználásának vizsgálata újonnan kifejlesztett DC inverteres vezérlő segítségével. TDK szekció: BME Gépészmérnöki Kar, Gépészeti Eljárás-technika szekció, 2016
- [13] Simon Richárd, Hűtőkamra energiafogyasztásának vizsgálata DC inverter vezérlővel, MSc diplomamunka, 2017

MMK sajtóközlemény

Az MMK támogatja a klímatudatos fűtés-hűtés további terjedését

„A Magyar Mérnöki Kamara támogatja az új, környezettudatos, rendkívül energiatakarékos hőszivattyú elvére alapuló technológiák bevezetését és segíti a Kamara tagjait, hogy a legmagasabb szintű tudást szerezzék meg.” – mondta Nagy Gyula, a Magyar Mérnöki Kamara elnöke a Magyar Hőszivattyú Szövetség konferenciáján

A jövő év elejétől már csak közel nulla energiaigényű épületet lehet építeni Magyarországon. Ehhez olyan épületgépészeti rendszert kell telepíteni, amely biztosítja, hogy a fűtés, a hűtés, a háztartási melegvíz előállítása és a szellőztetés energiaigénye, villamos fogyasztók igénye kielégítése minimum negyedrészt megújuló forrásból származzon. Ez adta az apropóját annak a konferenciának, amit a Magyar Hőszivattyú Szövetség rendezett 2020. február 12-én „A hőszivattyú technológia a klímaválság árnyékában” címmel.

„A Magyar Mérnöki Kamara képzésekkel, az új megoldások megismertetésével segíti a korszerű „klímatudatos” épületgépészeti megoldások elterjedését” – mondta Nagy Gyula, a Magyar Mérnöki Kamara elnöke a konferencia kerekasztal beszélgetésében. Hozzátette, hogy a legmegfelelőbb hűtő, fűtő, szellőztető eszközöket már a tervezés során nagy mérnöki gondossággal kell kiválasztani, hogy az energiahatékonyság valóban javuljon. „A kamarai képzésekbe is bevonjuk a kereskedő, forgalmazó cégeket, így naprakész információhoz juthatnak a tervezők.” – mondta Nagy Gyula.

További információ:

Müller Mihály – MMK kommunikáció
(muller.mihaly@mmk.hu)