

# Ocenjevanje debeline ledu na hladilnih rebrih zamrzovalnih skrinj v trgovskih centrih

Dejan Gradišar, Miha Glavan, Damir Vrančič

Odsek za sisteme in vodenje, Inštitut Jožef Stefan, Ljubljana  
E-pošta: dejan.gradisar@ijs.si

## Evaluating the ice thickness on display case evaporators in supermarkets

*In this paper we analyse the possibilities to save energy in supermarket refrigeration systems. The study is focused on minimisation of defrosting of a display case evaporators. For this we would need to identify the presence of ice. As this is not directly given (measured), we have developed a model, which can identify when the defrosting is needed. Our study is based only on the data available from the archived measurements. Preliminary results show the promising potential of a presented approach.*

### 1 Uvod

Zaradi naraščajoče porabe, ekološke ozaveščenosti in rastočih cen energije postaja učinkovita raba električne energije vse pomembnejši faktor za sodobno družbo in konkurenčno delovanje energijsko potratnih podjetij.

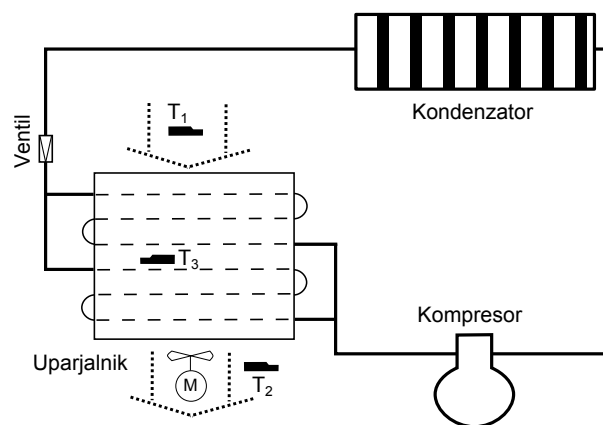
Enega izmed večjih porabnikov električne energije predstavljajo nakupovalna središča, saj le ta porabijo 2-3 % celotne svetovne proizvedene električne energije [4]. Znotraj posameznih nakupovalnih centrov so največji porabniki hladilni sistemi. Zaradi tega je optimizaciji stroškov in izboljšanju učinkovitosti delovanja hladilne tehnike v nakupovalnih središčih v zadnjem času posvečeno veliko pozornosti. Ena od energijsko potratnih funkcij v hladilni tehniki je odtaljevanje ledu, ki nastane na rešetki uparjalnika.

Glavni izziv pri odtaljevanju ledu je ugotoviti ali je odtaljevanje v določenem trenutku potrebno, saj podatka o količini ledu nimamo. V prispevku predstavimo model s katerim želimo oceniti in vnaprej napovedati debelino nabranega ledu, pri čemer uporabimo zgolj razpoložljive meritve na hladilnih elementih. Predstavljena analiza podatkov je bila izvedena na podlagi podatkov iz enega od nakupovalnih središč v Ljubljani.

### 2 Hladilni sistemi v nakupovalnih centrih

Osnovo hladilnega sistema predstavlja parno-kompresijski proces, za katerega velja, da hladilno sredstvo kroži znotraj zaključene zanke, sestavljene iz kompresorja, kondenzatorja, ekspanzijskega ventila in uparjalnika (slika 1). Uparjalnik je nameščen v hladilnih elementih in okoliškemu mediju odvzema toploto, kondenzator (nameščen

zunaj) pa toploto okoliškemu mediju oddaja. Ekspanzijski ventil in kompresor skrbita za pretok hladilnega sredstva ter za zagotavljanje potrebne tlačne razlike. Obravnavani hladilni sistem je podrobneje predstavljen v [9].

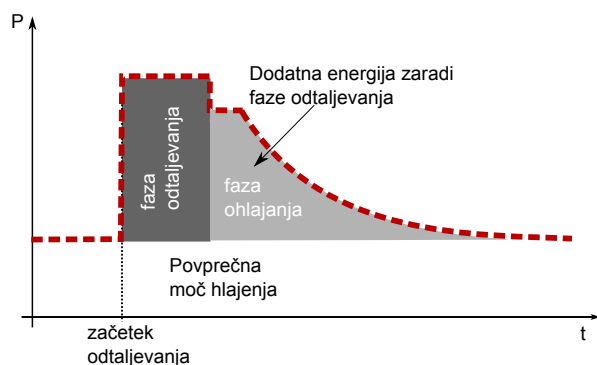


Slika 1: Shema uparjalnika hladilnega elementa.

Nabiranje ledu na uparjalniku je v hladilni tehniki poznan in neželen pojav, do katerega pride v primeru nižje temperature uparjalnika pri relativno vlažnem zraku okolice [2], [5]. Nastali led, ki se kopiči na rebrih uparjalnika, deluje na hladilni sistem kot toplotna izolacija, saj le-ta ovira pretok hladnega zraka in s tem zmanjšuje učinkovitost hlajenja. Za preprečevanje nabiranja ledu je zato potrebno redno odtaljevanje, ki akumuliran led stali. Otekla voda se zbira v odtočni posodi pod uparjalnikom. V primeru najpreprostejšega načina odtaljevanja se dotok hladilne tekočine v uparjalnik prekine, ventilator pa vpihava toplejši okoliški zrak, ki nastali led stali. Obstajata pa tudi hitrejši metodi odtaljevanja: (i) z vročim plinom, ki ga usmerimo iz kompresorja v uparjalnik (po drugem vodu) in (ii) z električnim odtaljevanjem, kjer v rešetki uparjalnika vgradimo električni grelnik. Čeprav ima metoda z električnim gretjem najvišje stroške delovanja, je najpogosteje uporabljena zaradi najcenejše implementacije.

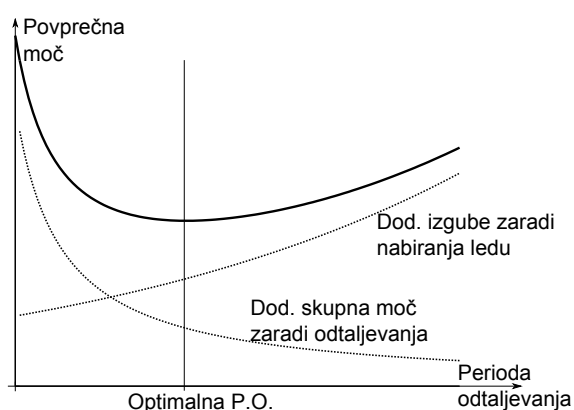
Učinkovitost delovanja hladilnega sistema je neposredno odvisna od nabranega ledu, saj se z nabiranjem ledu učinkovitost hlajenja zmanjšuje. Odtaljevanje po drugi strani povzroči tudi dodatno energijsko porabo, kot je to prikazano na sliki 2. V fazi odtaljevanja je potrebno dove-

sti določeno energijo (energijo potrebno za odtaljevanje ledu), po zaključenem odtaljevanju pa je potrebno hladilni sistem ponovno ohladiti nazaj na delovno temperaturo (faza ohlajanja).



Slika 2: Energijska bilanca odtaljevanja.

Odtaljevanje se v praksi najpogosteje izvaja po vnaprej predvidenih urnikih. Urniki so tipično definirani glede na najzahtevnejše pričakovane razmere, zato se pogosto dogaja, da se odtaljevanje vsakodnevno izvaja tudi takrat kadar količina nabranega ledu še ni dosegla kritične vrednosti. Energijske porabe zaradi periodičnega odtaljevanja bi bilo mogoče zmanjšati, če bi to izvajali le takrat, ko je to res potrebno. Prepogosto odtaljevanje povečuje energijsko porabo, preredit pa povzroča neučinkovitost hladilnega sistema. Potrebno je poiskati optimalno periodo odtaljevanja (na sliki 3 označeno z *Optimalna P.O.*), ki bo v pravi meri uravnotežila energijsko porabo zaradi nabiranja ledu in energijsko porabo faz odtaljevanja. Optimalno periodo odtaljevanja bi bilo mogoče poiskati s pomočjo modela energijske porabe glede na izmerjeno ali modelirano količino nabranega ledu ter energijskega modela faze odtaljevanja.



Slika 3: Optimalna perioda odtaljevanja.

Za zmanjšanje nepotrebnih ciklov odtaljevanja so bili razviti samodejni sistemi za odtaljevanje. Takšni sistemi zaznajo potrebo po odtaljevanju, za kar se uporabljajo različni pristopi [3]:

- optično zaznavanje nabranega ledu,

- zaznavanje temperaturnih sprememb v hladilniku,
- zaznavanje sprememb v pretoku zraka/zračnem pritisku,
- prilagajanje urnika odtaljevanja glede na relativno vlažnost zraka,
- zaznavanje sprememb v pretoku hladilne tekočine,
- primerjava temperature zraka in hladilne tekočine,
- spremljanje razpoložljivih meritev (temp. okolice, vlažnost, vhodna in izhodna temperatura uprjalnika, čas med odtaljevanji, itd).

Naša rešitev bo temeljila na zadnjem pristopu.

### 3 Napovedovanje potrebe po odtaljevanju

V tem poglavju bomo predstavili razvito metodo za samodejno sprožanje faze odtaljevanja. V nakupovalnem središču težko zagotovimo ustrezne pogoje na osnovi katerih bi lahko določili natančen model sistema. Zato smo se odločili, da razvijemo metodo na osnovi arhiviranih podatkov, ki so bili zajeti v enem od nakupovalnih središč v Ljubljani. Z analizo smo želeli ugotoviti, kako količina nabranega ledu na hladilnih rebrih vpliva na merjene veličine in ali je mogoče na podlagi razpoložljivih meritev vnaprej predvideti količino nabranega ledu in s tem potrebo po odtaljevanju hladilnega elementa.

Postopek modeliranja temelji na metodi, ki je bila razvita za potrebe celovitega vodenja proizvodnje [6], [7]. Pri tem smo uporabili v ta namen razvito orodje ProOpter [8]. V prvem koraku moramo določiti kazalnik s katerim bomo ocenjevali stanje sistema, v našem primeru debelino nabranega ledu. V nadaljevanju je potrebno ugotoviti, kateri so tisti merjeni parametri, ki na ta kazalnik najbolj vplivajo. Ko izberemo vhodne in izhodne parametre sistema, lahko določimo še model sistema, ki ga lahko uporabimo za napovedovanje.

#### 3.1 Ocenjevanje debeline nabranega ledu

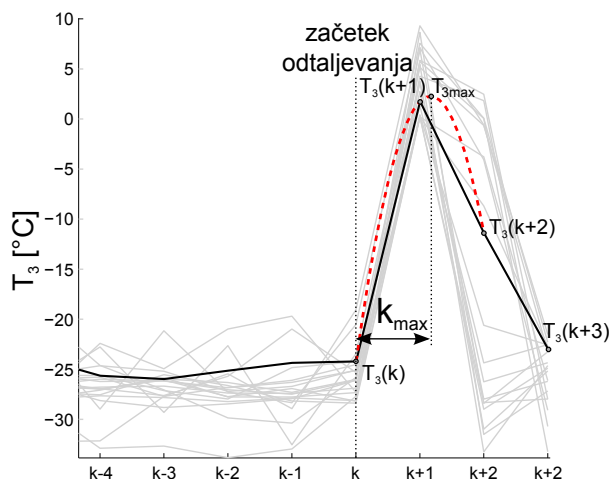
Izhodni parameter procesa odtaljevanja je debelina ledu nabranega na rešetju.

V obravnavanem trgovskem centru se trenutno uporablja odtaljevanje z vnaprej določenim urnikom. Odtaljevanje (gretje reber) se izvaja toliko časa, dokler temperatura  $T_3$  (temperatura hladilnih reber) ne preseže določene vrednosti. Takrat se predpostavlja, da je led staljen, hladilni element pa je potrebno ponovno ohladiti, da doseže referenčno temperaturo.

Ker točnega podatka o debelini nabranega ledu nimamo, je le-to potrebno oceniti iz meritev. Pomanjkljivost meritev je bila v tem, da je bilo vzorčenje relativno redko (15 minut). Tako redko vzorčenje ni omogočalo natančnejše identifikacije modela, po drugi strani pa tudi ni omogočalo natančnega določanja začetka faze odtaljevanja.

Na sliki 4 je prikazana dinamika temperatur hladilnih reber uprjalnika ( $T_3$ ) pred in med fazo odtaljevanja. Ker je debelina ledu v neposredni korelaciji s časom

odtaljevanja, jo poskušamo oceniti s časom, ki je potreben, da dosežemo maksimalno temperaturo ( $k_{max}$ ). Pri tem predpostavljamo, da bomo maksimalno temperaturo dosegli prej, če bo nabranega ledu manj, saj se bo faza odtaljevanja hitreje zaključila. V primeru večje količine nabranega ledu pa bo faza odtaljevanja daljša, s tem pa tudi čas, ki je potreben, da dosežemo maksimalno temperaturo. Kot je že omenjeno, pa je bilo vzorčenje relativno redko in bi lahko naredili veliko relativno napako pri oceni časa, ko dosežemo maksimalno temperaturo. Tako smo se odločili, da maksimalno temperaturo ( $T_{3max}$ ) in čas, ko le-ta nastopi ( $k_{max}$ ) ocenimo s pomočjo interpolacije kvadratne funkcije med točkami  $T_3(k)$ ,  $T_3(k+1)$  in  $T_3(k+2)$ , kot je to prikazano na sliki 4. S temnejšo polno črto je predstavljena ena izmed meritev parametra  $T_3$ , s črtkano črto pa je prikazana interpolirana funkcija drugega reda. Če je le-ta predstavljena s  $T_3(k) = a * k^2 + b * k + c$ , je čas do maksimalne temperature določen s  $k_{max} = -b/(2a)$ .

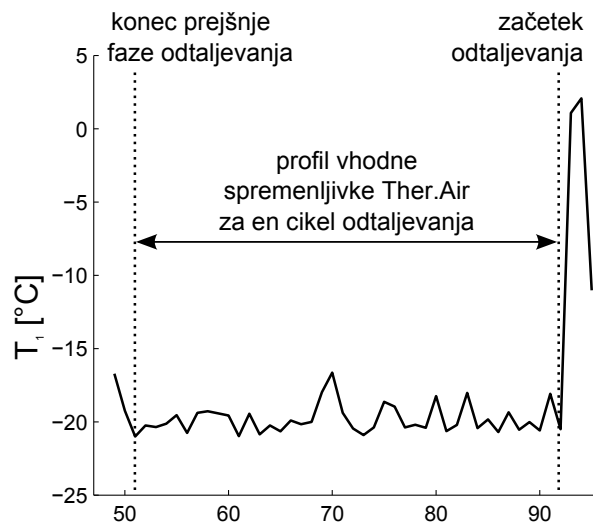


Slika 4: Meritve temperatur na hladilnih rebrih (polne črte) in ocena maksimalne temperature (črtkana črta).

### 3.2 Izbira vplivnih značilk

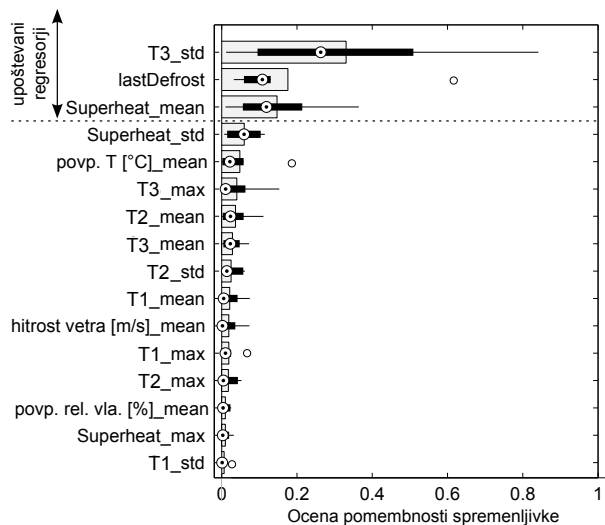
Za napovedovanje debeline ledu imamo na voljo meritve različnih parametrov hladilnega sistema: temperatura zraka na vходу uparjalnika ( $T_1$ ), temperatura zraka na izhodu uparjalnika ( $T_2$ ), temperatura na rebrih uparjalnika ( $T_3$ ), temperaturna razlika hladilne tekočine na uparjalniku (*Superheat*) in čas do predhodnega odtaljevanja (*lastDefrost*). Izmerjenim parametrom sistema smo dodali še podatke iz avtomatske vremenske postaje (ARSO, [1]): zunanja temperatura (*povp. T [°C]*), zunanja povprečna vlažnost (*povp. rel. vla. [%]*) in zunanja hitrost vetra (*hitrost vetra [m/s]*). Časovni profili spremenljivk med posameznimi fazami odtaljevanj (glej sliko 5) so bili agregirani z uporabo osnovnih karakterističnih značilk (srednja vrednost, maksimalna vrednost, standardna deviacija).

Na razpolago imamo 16 različnih vhodnih značilk. Da bi ugotovili, kateri so tisti, ki nam o nabiranju ledu povedo največ, izvedemo analizo za izbiro najinformativnejših regresorjev. Pri tem uporabimo pristop, kjer



Slika 5: Definicija vh. spremenljivk.

združujemo rezultate različnih metod za izbiro regresorjev. Validacija metod in postopek združevanja rezultatov metod je podrobneje predstavljen v [6]. Rezultati izbire najvplivnejših regresorjev so predstavljeni na sliki 6, kjer so prikazane srednje vrednosti ocen (siv kvadrček) in porazdelitev ocen po posameznih metodah (pika prikazuje mediano in črni kvadrček deviacijo rezultatov).



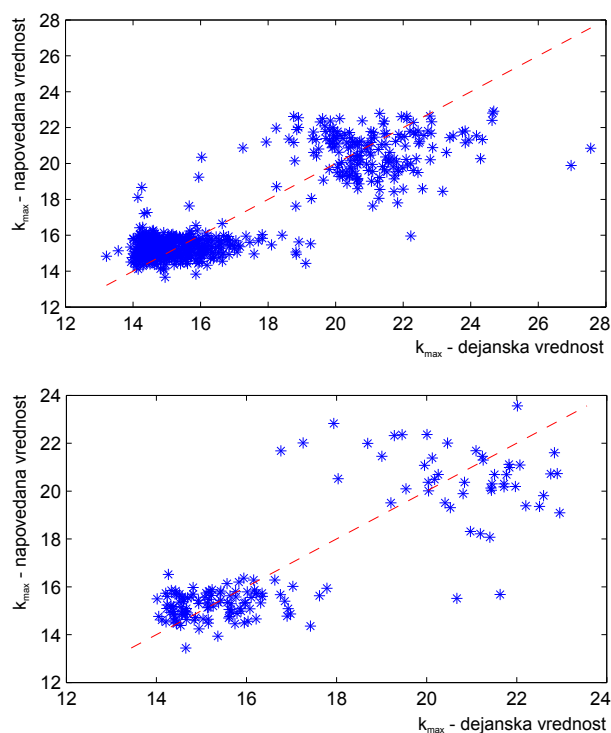
Slika 6: Izbira značilk.

Rezultati analize kažejo na to, da lahko debelino ledu ocenjujemo z opazovanjem treh značilk: povprečna temperatura na rebrih uparjalnika ( $T_3$ ), čas med dvema odtaljevanjema (*lastDefrost*) in temperaturne razlike hladilne tekočine (*Superheat*). Izkaže se, da zunanje vremenske razmere nimajo bistvenega vpliva na napovedovanje debeline ledu, kar je tudi pričakovano, saj sta temperatura in vlaga v trgovskem centru regulirani prek sistema HVAC.

### 3.3 Modeliranje

Reprezentativne podatke smo razdelili na učno in testno množico podatkov. Pri identifikaciji modela smo uporabili linearno regresijo na učnih podatkih, ki so zajeli 80% vseh razpoložljivih podatkov.

Identificirani model smo validirali na učnih in testnih podatkih. Kot vidimo iz grafa raztrosa na sliki 7, se model odziva zadovoljivo tako na vhodne podatke, ki smo jih uporabili za učenje (zgoraj), kot tudi na podatke, ki pri učenju niso bili uporabljeni (spodaj). Opazimo sicer sorazmerno veliko razpršenost rezultatov, za kar ocenjujemo, da je predvsem posledica preredkega vzorčenja meritev in nezadostnega nabora vplivnih parametrov.



Slika 7: Validacija modela.

V času zajemanja podatkov, se je spremenil tudi urnik odtaljevanja, kar se na sliki 7 odraža tako, da so vrednosti ocenjene debeline ledu združene v dveh rojih. Spodaj levo so vrednosti za prvi urnik, kjer je bilo odtaljevanje bolj pogosto (krajši  $k_{max}$ ) in se je na rebrih nabrala manjša količina ledu. Vrednosti po optimizaciji urnika odtaljevanja pa se nahajajo zgoraj desno, ko so bili tudi časi  $k_{max}$  nekoliko daljši. Na podlagi tega lahko sklepamo, da je cenilka  $k_{max}$  primerna za oceno debeline nabralega ledu.

Ugotavljamo tudi, da lahko kljub temu, da nimamo kakovostnih podatkov, s pomočjo identificiranega modela napovemo ali bo odtaljevanje upravičeno ali ne. Za boljše rezultate pa bi seveda potrebovali bolj kakovostne podatke, kar je tudi cilj našega nadaljnjega dela.

### 4 Zaključek

Prispevek predstavlja postopek določanja modela, na osnovi katerega bi lahko ugotavljali, ali je odtaljevanje hla-

dilnih reber v nekem trenutku res potrebno. Na ta način lahko zmanjšamo porabo energije pri delovanju hladilnega sistema.

Da bi lahko določili bolj natančen model, bi potrebovali podatke s krajšo frekvenco vzorčenja. Zaželeno pa bi bilo imeti na voljo tudi meritve še dodatnih parametrov, kot je vlažnost zraka v prostoru ipd.

Ocenjevanje smiselnosti odtaljevanja omogoča tudi dodatne možnosti za prihranke, še posebej, če izvajamo faze odtaljevanja v obdobjih cenejše električne energije. Upravljanje s porabo energije (ang. *Demand Shifting*) za odtaljevanje in ostalimi porabniki v hladilnem sistemu je tudi cilj nadaljnjega dela.

### 5 Zahvala

Raziskavo je sofinancirala Agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije v okviru projekta L2-5476 - Optimizacija stroškov porabe energije.

### Literatura

- [1] Agencija Republike Slovenije za okolje. <http://www.arso.gov.si>.
- [2] C. Bullard, R. Chandrasekharan: Analysis of Design Tradeoffs for Display Case Evaporators, Oak Ridge, 2004.
- [3] B.A. Fricke, V. Sharma: *Demand Defrost Strategies in Supermarket Refrigeration Systems*, Interim Report. 5. October 2011, TN, ZDA.
- [4] T.G. Hovgaard, L.F.S. Larsen, M.J. Skovrup, J.B. Jorgensen: Analyzing control challenges for thermal energy storage in foodstuffs. *IEEE Conf. on Control Applications*, 2012
- [5] S.A. Tassou, D. Datta: Influence of Supermarket Environmental Parameters on the Frosting and Defrosting of Vertical Multideck Display Cabinets. *ASHRAE Transaction 105*, Str. 491-496, 1999.
- [6] M. Glavan, D. Gradišar, M. Atanasijević-Kunc, S. Strmčnik, G. Mušič: Input variable selection for model-based production control and optimisation. *The international journal of advanced manufacturing technology*, 68:9/12, Str. 2743-2759, 2013.
- [7] M. Glavan, D. Gradišar, S. Strmčnik, G. Mušič: Production modelling for holistic production control. *Simulation modelling practice and theory*, 30, Str. 1-20, 2013.
- [8] G. Mušič, M. Glavan, D. Gradišar, S. Strmčnik: ProOpter, production dynamics analysis and optimization tool. *European Modelling and Simulation Symposium*, 2014.
- [9] Š. Vidrih, M. Umberger, I. Humar: Analiza zajetih vhodnih in izhodnih parametrov hladilne tehnike za potrebe optimizacije stroškov in porabe hladilne tehnike nakupovalnih centrov. *Zbornik ERK 2013*, 2013, Slovenija.