

# Optimizacija hidroničnog distributivnog sistema u cilju energetske efikasnosti

Nikola Poznanović

IMI INTERNATIONAL DOO BEOGRAD

Milutina Milankovića 1b, 11070 Novi Beograd, Srbija

nikola.poznanovic@tahydronics.com

## Abstrakt

*Optimizacija hidronične mreže u KGH sistemima redukuje utrošak energije i unapređuje kontrolu i obezbeđivanje komfora.*

*Efikasnost kondezacionih kotlova i čilera su pod direktnim uticajem od temperature povratne vode sistema sa potencijalnim gubitkom efikasnosti i do 10-15%. Razumevanje odgovarajućeg uticaja proporcionalne u odnosu na on-off kontrolu i promenljivog u odnosu na konstantan protok ciklacionih krugova je od suštinskog značaja.*

*Važnost dobrog održavanja pritiska u sistemu se često zanemaruje kada se govori o energetske efikasnosti. Međutim, izbegavanje dopune zbog lošeg održavanja pritiska omogućava limitiranje ulaska nečistoća i kiseonika u sistem što dovodi do korozije. Oba od ovih efekata su ukratko ispitana u smislu njihovog uticaja na potrošnju energije.*

*U rashladnim sistemima, električni troškovi pumpe predstavljaju od 7% do 17% od ukupne rashladne potrošnje energije. Mi ćemo takođe diskutovati o metodologiji kombinovanog korišćenja regulatora diferencijalnog pritiska i udaljenog Dp senzora za pumpe sa promenljivom brzinom, što doprinosi redukovanju troškova cirkulacije odnosno električnih troškova pumpe do 30-40% poredeći sa situacijom bez optimizacije.*

*U grejnim sistemima, trendovi niskog temperaturnog režima zahtevaju veću preciznost podešavanja protoka na radiatorima i kontrolu. Ovo ističe značaj isporuke potrebne temperature sa visokom preciznošću radeći sa savremenim komponentama sa malim histerezisom, malim uticajem od temperature vode i diferencijalnog pritiska.*

**Ključne reči – hidronični; održavanje pritiska; kontrola; balansiranje; energetska efikasnost**

## 1. Uvod

Zaštita životne sredine, problem zakonodavstva i povećanje troškova energije su dramatično povećali potrebu za energetske efikasnošću u zgradarstvu. Postoje razni načini da se unapredi ova efikasnost, i kako se u KGH sistemima utroši do 50% energetske potrošnje objekta, ovom utrošku se posvećuje posebna pažnja.

Potrošnja energije zgrade može se smanjiti poboljšanjem infrastrukture zgrade sa novom izolacijom, prozorima itd. Ovo ima veliki efekat ali uključuje uglavnom velike investicije sa dugim vremenom povraćaja sredstava. Pored toga, nakon obavljanja takvog posla, neophodno je prepodesiti ceo KGH system.

Optimizacija hidronične distributivne mreže u KGH sistemima je najisplativije rešenje u redukovanju potrošnje energije; efekti su neposredni i značajni. Zapravo, optimizacijom hidronične distributivne mreže u postojećim sistemima može se redukovati potrošnja energije do 30% (u zavisnosti od početnog statusa postrojenja) dok pruža visok nivo komfora. Ovo ukupno smanjenje može se postići jedino kroz seriju malih, jedan po jedan, unapređenja. Mi ćemo Vam izložiti nekoliko u ovom članku.

## **2. Uticaj temperature povratne vode za Kondezacione kotlove**

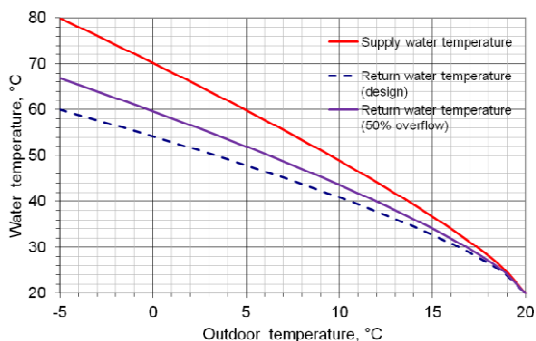
U cilju postizanja više efikasnosti, kondezacioni kotao je konstruisan sa razmenjivačem-kondenzatorom kako bi redukovao temperaturu izlaznih gasova ispod 5-15°C iznad temperature povratne vode. Ovo omogućava kondenzaciju vodene pare kao proizvoda sagorevanja, čime pruža povećanje efikasnosti od latentne toplote rekuperacije koja teoretski može dostići 11%.

Jasno je da se dobici od latentne toplote sa kondezacionim kotlom mogu ostvariti samo ako se temperatura povratne vode održava ispod temperature tačke rose produkata sagorevanja. Ova granica je tipično 54-55°C za kondezacione kotlove koji sagorevaju prirodni gas.

U cilju maksimizovanja dela grejne sezone za čije vreme će se desiti kondenzacija, veoma je bitno da temperaturu razvodne vode održavamo u funkciji spoljnih uslova a u skladu sa grejnom krivom, kao što je prikazano na Slici 1 za izabrani projektovani temperaturski režim od 80-60°C. Na ovom grafikonu možemo videti da ćemo imati kondenzaciju (kada je temperatura povratne vode ispod 55°C) jedino kada je spoljna temperatura ispod 0°C. Imajući u vidu na primer temperature registrovane na griniču časovno za vreme zime 2010-2011, ovo nam govori da će kotao koji radi na projektovanom temperaturskom režimu 80-60°C kondenzovati u ukupnom vremenu od približno 6192 časa.

Gore navedeni brojevi su primenljivi u slučaju da sistem funkcioniše savršeno kako je projektom predviđeno. Kada protoci nisu pravilno distribuirani u sistemu, neki delovi postrojenja imaju prevelike protoke dok drugi imaju hronične probleme sa premalim protokom. Stanari u nekim delovima objekta počinju učestalije da ulažu pritužbe. Kao reakciju na to, ljudi koji rade na održavanju povećavaju brzinu pumpe vodeći ka ukupnom povećavanju protoka u odnosu na realno potrebne i/ili pomeraju grejne krive. Obe mere redukuju mogućnost kondenzacije. Zapravo, povećanje ukupnog protoka u sistemu dovodi do manje temperaturske razlike i zbog toga do više temperature povratne vode. Isprekidana linija na slici 1 pokazuje efekat kako 50% prekoračenja u protoku utiče na krivu temperature povratne vode što

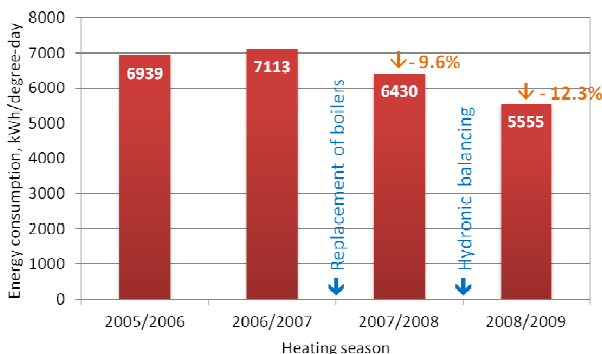
rezultira redukcijom vremena kondenzacije na 5424 časova (-12.4%) za posmatrani slučaj.



Slika 1 Grejna kriva i rezultujuća kriva temperature povratne vode za temperaturski režim 80-60°C i projektnu spoljnu temperaturu -5°C

S toga je jasno da je pažljivo i precizno podešavanje protoka u hidroničnom sistemu je suštinski korak u cilju praktičnog postizanja uštede energije koja se obećava upotrebom kondezacione tehnologije u kotlovima.

Ovo se jasno vidi na primeru renoviranja u dva koraka kompleksa 12 rezidencijalnih objekata u Tuluzu, Francuska [1]. Nakon zamene postojećih konvencijalnih kotlova na leto 2007, postignuta je ušteda energije od 9,6% na zimu 2007-2008, pogledati sliku 2. Drugi korak u renoviranju se desio na leto 2008 i sastojao se u rekonstrukciji hidroničnog Sistema i prepodešavanju projektnih protoka sistematskom balansnom metodologijom. Ovo je za posledicu imalo dodatnih 12,3% uštede energije sledeće zime.



Slika 2 Evolucija potrošnje energije na Empalot (Francuska) rezidencijalnom kompleksu [1]

### 3. Uticaj od kontrolnog moda i tipa kruga na temperaturu povratne vode u hlađenju

Efikasnost čilera se često predstavlja sa koeficijentom energetske efikasnosti (Energy Efficiency Ratio-EER). U cilju održavanja EER čilera na koliko je to moguće visokom nivou na delimičnom opterećenju, ključni element je izbeći smanjenje logaritamske temperaturske razlike između hladne vode i rashladnog fluida. Sa konstantnom temperaturom razvodne hladne vode kako to generalno imamo u hlađenju, to znači da moramo da izbegnemo pad temperature povratne hladne vode na delimičnom opterećenju.

Kao indicacija važnosti ove činjenice, rezultati simulacije koji su urađeni na simulatoru jednog od proizvođača čilera za čiler od 703 kW sa temperaturom u kondenzatoru od 29.5-35°C i temperaturom razvodne hladne vode od 7°C pokazuju pad od 15% koeficijenta EER kada temperature hladne povratne vode padne od 12.5°C na 10.5°C.

U cilju određivanja evolucije povratne hladne vode na delimičnom opterećenju, moramo videti šta se dešava na strani terminalne jedinice.

Razmotrimo prvo slučaj proporcionalne kontrole na krugu sa promenljivim protokom sa fan-coil jedinicom opremljenom dvokrakim prolaznim ventilom uz uslov da je krug pravilno balansiran (slika 3a). S obzirom da se protok progresivno smanjuje na delimičnom opterećenju, temperaturska razlika kroz jedinicu (samim tim i kroz krug) normalno raste kao što je to prikazano crvenom linijom na slici 4 za temperaturski režim 7-12°C. Dakle, stabilna i precizna proporcionalna kontrola rashladnog kapaciteta terminalne jedinice sa krugom sa promenljivim protokom povoljno utiče na koeficijent EER čilera.

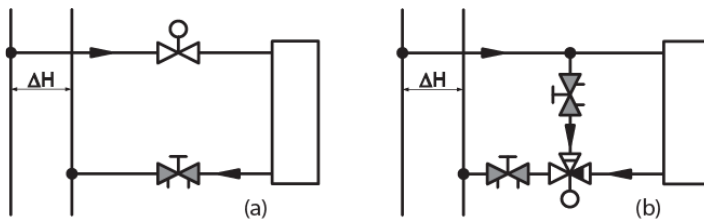


Fig. 3 (a) Two-way variable flow circuit; (b) Three-way diverting circuit

Hajde sada da obratimo pažnju na 3-kraki razdeoni krug sa takođe proporcionalnom kontrolom (slika 3b). Takav krug se često koristi u sistemima sa promenljivim protokom na kraju grane kako bi se obezbedio minimalni protok pumpe ali takođe i da bi se izbeglo zagrevanje razvodne vode zbog toplotnih dobitaka u cevovodu. Sa takvim krugom, evolucija temperaturske razlike kroz terminalnu jedinicu na delimičnom opterećenju je ista kao za dvokraki krug. Međutim kada tro-kraki ventil postepeno zatvara , imamo porast protoka koji prolazi kroz bypass i koji hladi ukupan povrat

kroz krug kao što je ilustrovano sa plavom krivom na slici 4. S toga je jasno da primenu ovog kruga treba svesti na najmanju moguću meru kako bi se obezbedio minimalni protok jer sistematski pogoršava povratnu temperature vode.

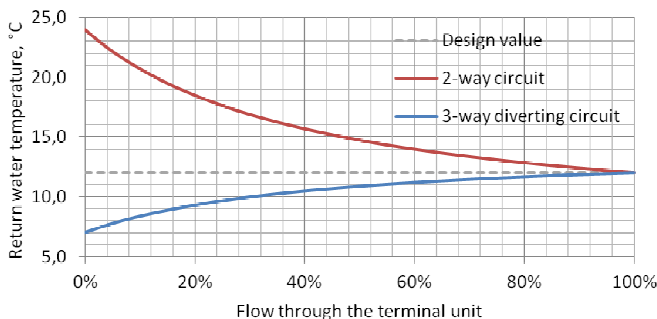


Fig. 4 Evolucija temperature povratne vode na delimičnom opterećenju sa proporcionalnom kontrolom za projektni temperaturski režim 7-12°C i setovanu temperaturu prostorije od 24°C

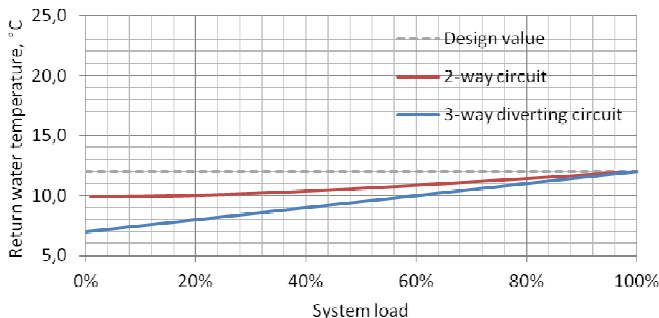
U navedenim slučajevima se predpostavlja stabilna i precizna kontrola. Zbog smanjenja troškova, često se dešava da se prednost daje on-off kontroli. Takođe se redovno dešava da se proporcionalna kontrola pogoršava zbog pogrešnog dimenzionisanja ventila dovodeći do nekontrolisanog on-off ponašanja. Hajde da vidimo šta se dešava sa naša dva kruga sa slike 3 sa on-off kontrolom.

Uslovi delimičnog opterećenja u postrojenju uniformno opremljenom sa on-off kontrolnim krugovima mogu se pratiti sa brojem termalnih jedinica koje su uključene (on) u jednom momentu. Na 50% opterećenja, imamo u proseku 50% uključenih (on) jedinica i 50% isključenih (off) jedinica.

Ako su svi krugovi 2-kraki on-off krugovi, kada su neki krugovi zatvoreni (off), imamo manji ukupni protok i pad pritiska u cevovodu pada sa kvadratom pada protoka. Zbog toga imamo veći raspoloživi diferencijalni pritisak u svim tačkama sistema, što rezultuje većim protokom od projektnog u svim krugovima koji su uključeni (on). Zbog nelinearne karakteristike odavanja toplote na terminalnoj jedinici, odavanje toplote jedinice se povećava neznatno sa povećanjem protoka preko projektnog protoka [2]. S toga, sa većim protokom od projektnog protoka i sa odavanjem toplote koje je neznatno poraslo, temperaturska razlika kroz jedinicu opada na delimičnom opterećenju sa on-off kontrolisanom sistemom primenjenom na dvo-krakim krugovima. Slika 5 pokazuje ovaj efekat za predočeni slučaj. Može se videti da je za ovaj slučaj pad temperature povratne vode od približno 2°C što utiče na pad koeficijenta EER čilera kao što je prethodno objašnjeno.

Ako su svi krugovi 3-kraki on-off krugovi, kada su neki krugovi isključeni (off), protok ide kroz bypass u tim krugovima tako da se ukupni

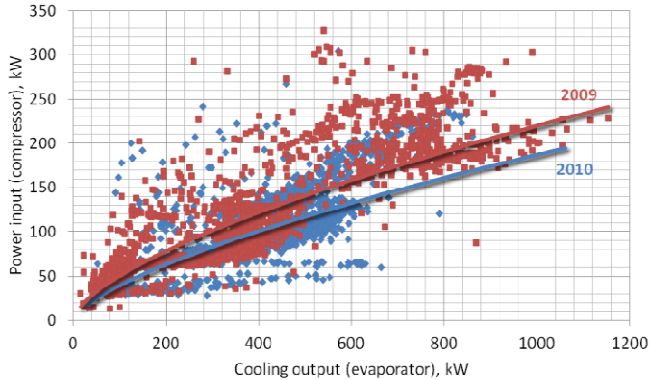
protok u sistemu ne menja. Takođe, pošto je protok koji prolazi kroz bypass u proporcionalnom odnosu sa brojem jedinica koje su isključene (off), temperature povratne vode opada linearno sa opterećenjem u sistemu (pogledati plavu krivu na slici 5).



Slika 5 Evoluacija temperature povratne vode na delimičnom opterećenju sa on-off kontrolom za projektni temperaturski režim 7-12°C i podešenu sobnu temperaturu od 24°C. (Slučaj sa 100 identičnih jedinica, naporom pumpe 150 kPa i 20 kPa na terminalnim jedinicama)

Zbog toga je jasno da od svih predstavljenih različitih krugova, 2-kraki krug sa promenljivim protokom sa proporcionalnom kontrolom treba da bude poželjan krug koji daje stabilnu i preciznu kontrolu uz pravilan izbor i dimenzionisanje kontrolnih ventila.

Zanimljivo, ovo pitanje je bilo uključeno u renoviranje rashladnog sistema dve zgrade Politehničkog Univerziteta u Hong Kongu [3]. Specifično, dodati su regulatori diferencijalnog pritiska na ulazu grana on-off kontrolisanih fan-coil jedinica i preko kontrolnih ventila klima komora kako bi se sprečilo povećanje protoka na delimičnom opterećenju u fan-coil jedinicama i garantovala stabilna kontrola na klima komorama. Grafikon prezentovan na slici 6 pokazuje merenja izvršena pre i posle izvršenog renoviranja i koji je na kraju doveo do ušteda od 16,5% u godišnjoj potrošnji čilera.



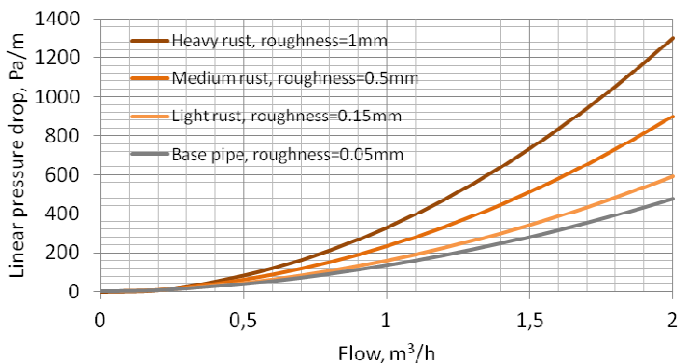
Slika 6 Merenja pre i posle ugradnje regulatora diferencijalnog pritiska na granama on-off kontrolisanih fan-coil jedinica i preko kontrolnih ventila klima komora [3]

#### 4. Najvažnije o pravilnom održavanju pritiska

Kada govorimo o energetskej efikasnosti, održavanje pritiska zaista traži posebnu pažnju. Često zaboravljamo da pravilno održavanje pritiska zbog lošeg dimenzionisanja ili lošeg kvaliteta ekspanzionih sistema dovodi do učestalog dopunjavanja sistema kako bi se kompenzovali gubici statičkog pritiska.

Sveža voda sadrži kalcijum bikarbonate koji su sadržani u tvrdim naslagama na najtoplijim tačkama kotlova što dovodi do dodatne potrošnje energije jer tvrde naslage deluju kao izolatori pri prenošenju toplote. Obim ovog efekta nikad nije dovoljno obrađen u literature pa su često citirani rezultati Univerziteta u Ilinoisu i US Bureau Standardima koji navode da je gubitak u efikasnosti od 9% za 1mm tvrdog depozita.

Sveža voda takođe sadrži gasove (uglavnom azot i kiseonik) u vidu mikro mehurića kao i rasvorene u vodi. Redovna dopuna vode je zbog toga kanal za ulazak kiseonika u sistem što dovodi do potencijalno značajne korozije. Korozija unutrašnjih površina cevi deluje na linearni pad pritiska na dvostruki način. Prvo, rđa formira čvrste naslage i smanjuje efektivni unutrašnji prečnik korodiranih cevovoda, što rezultira većim brzinama za isti protok. Kao drugo, rđa povećava hrapavost cevi što takođe utiče na pad pritiska. Povećanje linearnog pada pritiska između 15 i 70% već korišćenih starih cevovoda je dato u [4]. Iako ovo izgleda vrlo jednostavno za proračun izvršen za cev dimenzije DN 25 od čelika DIN 2440, serije ISO 65 pokazuje zaista povećanje linearnog pada pritiska između 15 i 80% za malu i srednju koroziju.



Slika 7 Linearni pad pritiska na cevi DN 25 od čelika DIN 2440, serije ISO 65

Ovo naglašava značaj efikasnog, ispravno dimenzionisanog i održavanog Sistema za održavanje pritiska kako bi se izbegao ulazak kiseonika u hidroničnu mrežu.

## 5. Unapređenje uštede energije pumpe kroz kontrolu diferencijalnog pritiska

Pumpe su glavni potrošači energije u distributivnim sistemima. Koristeći formule za procenu izdate u [2] sa nedavnim vrednostima efikasnosti i troškova energije, energetske troškovi pumpe predstavljaju 7 do 17% ukupnih troškova energije u vodenim rashladnim sistemima dok u grejnim sistemima predstavljaju 0,5 do 1,5%. Ovo je potvrđeno u [5] za grejne sisteme u komercijalnim objektima.

Kada je sistem opremljen sa pumpama sa promenljivom brzinom (variable speed pump-VSP), postavlja se pitanje da li su kontroleri diferencijalnog pritiska zaista potrebni kada izgleda da oba uređaja rade na istom osnovnom principu: regulacija diferencijalnog pritiska u jednoj tački u sistemu. Pumpa sa promenljivom brzinom je namenjena kako bi se maksimizovale uštede energije cirkulacije na različitim opterećenjima u sistemu sa promenljivim protokom. One deluju na mestu gde su instalirane, kroz njih prolazi ukupan protok, koji se bazira na izmerenom diferencijalnom pritisku na jednom mestu sa njihovim  $D_p$  senzorima. Čak i ako se koristi više senzora, u jednom momentu vremena, VSP može adaptirati svoju brzinu signalom jednog od senzora.

Zbog toga VSP ne može garantovati stabilnu i preciznu kontrolu za sve krugove raspoređene duž celog sistema. Ovo važi za bilo koji kontrolni mod pumpe i izabranu lokaciju  $D_p$  senzora. Regulatori diferencijalnog pritiska su dužni da štite lokalne kontrolne ventile od velike varijacije diferencijalnog

pritiska koju imamo sa varijacijom opterećenja u sistemima sa promenljivim protokom.

Kada se regulatori diferencijalnog pritiska koriste stalno u sistemima sa promenljivim protokom, može se dobiti poboljšana ušteda energije pumpe sa daljinskim Dp senzorom za pumpe sa promenljivom brzinom (VSP). Ovo je omogućeno zato što su regulatori diferencijalnog pritiska ventili bez pomoćne energije-samopogonjeni, koji prilagođavaju otvorenost u skladu sa promenama u sistemu. Bez regulatora diferencijalnog pritiska, korišćenje daljinskog Dp senzora na sredini ili na kraju sistema uvek vodi ka tome da pojedini krugovi nisu sposobni da isporuče njihovu projektnu grejnu/rashladnu energije prilikom uslova delimičnog opterećenja.

Proces dostizanja optimalne uštede energije pumpe zajedno sa dobrom kontrolabilnošću svih krugova se ovija u tri koraka:

1. Obavite dinamičko balansiranje sa samostalnim regulatorima diferencijalnog pritiska na svakoj grani/zoni ili na svakoj jedinici koristeći pritisno nezavisne kontrolne ventile.

2. Instalirajte VSP Dp senzor na indeksiranoj , Dp kontrolisanoj, grani ili krugu.

3. Podesiti radnu tačku VSP na najveći zahtevani diferencijalni pritisak od svih pritisno kontrolisanih grana/krugova.

Ovaj zadnji korak osigurava da će sve stabilizovane oblasti dobiti dovoljno primarnog diferencijalnog pritiska na delimičnom opterećenju. U cilju implementacije ovog procesa, posebno se preporučuje da se uradi kompletan proračun diferencijalnog pritiska u sistemu.

Rezultati postignutog nakon rekonstrukcije sa regulatorima diferencijalnog pritiska za Politehnički Univerzitet u Hong-Kongu [3] pokazuju godišnju uštedu od 32% energije pumpi.

## **6. Zahtevi preciznosti termostatskih radijatorskih ventila**

Poslednjih godina, projektne temperature za grejne sisteme se postepeno smanjuju. Dok je temperaturski režim od 90-70°C preovladavao u Evropi do sredine devedesetih, 80-60°C temperaturski režim je primenjen posle 2000 godine, dok je u današnje vreme on redukovan na temperaturski režim 70-50°C i niže.

Iako je to korisno za temperaturu povratne vode i samim tim za postizanje visoke efikasnosti kondezacionih kotlova, to izaziva veću osetljivost sobne temperature od kontrolisanog protoka vode u radijatorima. Tabela 1 prikazuje dozvoljenu devijaciju protoka za različite temperaturske režime u cilju zadržavanja sobne temperature u granicama  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$  oko podešene vrednosti. Raste potreba za preciznosti u sistemima sa savremenim temperaturskim režimima.

Tabela 1. Dozvoljena devijacija protoka za održavanje sobne temperature na  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$  oko podešene vrednosti

$T_{\text{spoljna}}$ , $^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{razvodna}}$ , $^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{povratna}}$ , $^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{sobna}}$ , $^{\circ}\text{C}$	Dozvoljena devijacija protoka
-10	90	70	20	$\pm 13\%$
-10	80	60	20	$\pm 11\%$
-10	70	50	20	$\pm 9\%$
-10	60	40	20	$\pm 7\%$

Kontrola sobne temperature izvedena sa termostatskim radijatorskim ventilima zavisi uglavnom od sledećih karakteristika termostatskih glava i ventila koji bi trebalo da imaju mali histerezis (oko 0.3-0.4K), mali uticaj od temperature vode (od 0.3 do 0.7K), mali uticaj od diferencijalnog pritiska (oko 0.3K) i korektno vreme odziva ( $\leq 25$  minuta) u skladu sa specifikacijom testa datom u EN 215.

Skorija studija sprovedena na Tehničkom Univerzitetu u Drezdenu [6] demonstrira koristi od ugradnje termostatskih glava visokog kvaliteta. Studija pokazuje da zamena termostatskih glava starijih od 1988 (CEN markirano) sa nekom od novih rezultira preciznijem postizanju željene temperature, malim pregrevanjem i boljem postizanju ciljanih vrednosti. Ovo unapređenje u kontroli sobne temperature omogućuje uštedu energije od 7% u postojećim 90-70 $^{\circ}\text{C}$  postrojenjima i 5% uštede u 70-55 $^{\circ}\text{C}$  postrojenjima.

## 7. Zaključak

U cilju postizanja radne efikasnosti kondenzacionih kotlova i čilera na najvišem mogućem nivou, mora se sprečiti degradacija povratne temperature vode. Generalno, protoci se moraju ispravno podesiti kako bi se sprečilo ukupno prekoračenje protoka koje dovodi do male temperaturske razlike što znači da bi trebalo koristiti dvo-krake krugove sa promenljivim protokom I proporcionalnom kontrolom. U grejanju posebno, kontrola razvodne temperature vode mora da bude takva da snizi temperaturu povratne vode za najveći deo grejne sezone.

Kvalitet, dimenzionisanje i puštanje u rad i održavanje Sistema za održavanje pritiska je takođe vrlo važan element. Čvrsti deposit može uticati na efikasnost kotla u iznosu oko 10% dok nepoželjno starenje cevi može dovesti do povećanja linearnog pada pritiska u iznosu 15 do 80%.

Optimizacija pumpnih troškova je proces koji lako može dovesti do operativnih poteškoća. Ključni element je redukovati troškove pumpe na nivo na kome projektni protok može biti isporučen na bilo koje mesto u bilo koje vreme sa stabilnom diferencijalnom kontrolom na svim mestima u cilju dobijanja kvalitetne proporcionalne kontrole. Ovo može biti dostignuto sa kombinacijom regulatora diferencijalnog pritiska bez pomoćne energije sa daljinskim Dp senzorom pumpi sa promenljivom brzinom kroz metodologiju u tri koraka.

Sa evolucijom projektnih temperaturskih režima, raste potreba za preciznošću kontrole termostatskih glava i ventila. Jednostavna zamena stare opreme sa novom generacijom termostatskih glava daje nam interesantne rezultate u uštedi energije.

Zapravo, optimizacija distributivne hidronične mreže postojećih sistema sa tehničkim metodama o kojima smo prethodno diskutovali može u proseku redukovati potrošnju energije samih Sistema i do 30% zadržavajući uslove komfora na visokom nivou.

## **8. Zahvalnost**

Autor ovim putem želi da zahvali G-dinu Jean-Christophe Carette-u na nesebičnom zalaganju na unapređenju znanja iz oblasti optimizacije hidroničnih sistema u proteklih 8 godina.

## **9. Reference**

- [1] J. Pambrun. Un équilibre hydraulique. CFP J. 731 (2010) 96–100.
- [2] R. Petitjean. *Total Hydronic Balancing*. Tour & Andersson, Sweden, 1997.
- [3] Water balancing report, phases 3B, 5 and 6. Hong-Kong Polytechnic University, Dept. of Building Services Engineering, December 2011.
- [4] The Effects of Pipe Aging on Head Loss. Technical report. Utah Water Research Laboratory, Utah State University, March 2011.
- [5] C. Markusson. *Efficiency of building related pump and fan operation*. PhD thesis, Chalmers University of Technology, May 2009.
- [6] A. Perschke, A. Meinenbach, M. Rösler, J. Haupt. Analysis of the energy saving potentials through replacing old thermostatic radiator valves. Technical report. Technische Universität Dresden, Institut für Energietechnik, August 2011.