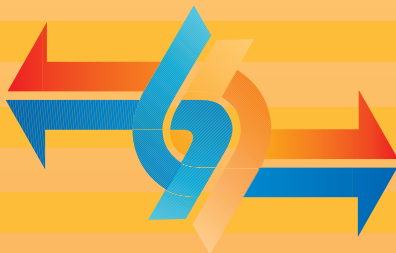


ZBORNİK RADOVA



interklina 2005

18. MEĐUNARODNI SIMPOZIJ O GRIJANJU, HLAĐENJU I KLIMATIZACIJI
7. KONFERENCIJA O TERMOGRAFIJI

18th INTERNATIONAL SYMPOSIUM OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR CONDITIONING
7th CONFERENCE ON THERMOGRAPHY

Zagreb, CROATIA, 21. i 22. travnja 2005. / April 21-22, 2005



HAMEX



HEP-TOPLINARSTVO d.o.o.
ČLAN HEP GRUPE



DHT PROJEKT d.o.o.



elektrometal d.d.
Bjelovar



Pumpen Intelligenz.

- weishaupt -

WEISHAUPT - ZAGREB d.o.o.

ISBN 953-6759-28-4



9 789536 759286



Hrvatska komora arhitekata i
inženjera u graditeljstvu
Razred inženjera strojarstva

ENERGETIKA
ARKETING
d.o.o. ZA TEHNIČKE I
POSLOVNE USLUGE

www.ege.hr

ECE

ENERGETIKA • GOSPODARSTVO • EKOLOGIJA • ETIKA





TRANE®



Vijčani zrakom/vodom hlađeni rashladnici vode
od 250 - 3 800 kW



R134a



TERMO SERVIS d.o.o.

AquaStream²



SCROLL
zrakom/vodom
hlađeni
rashladnici vode
50 - 240 kW



Krovne klima centrale (Rooftops)



Ventilo-konvektori
(fan coils)
1 - 30 kW



POSJETITE NAS NA SAJMU
INTERKLIMA 2005!
paviljon 9, štand 11



Klima komore



Zastupnik i distributer



TRANE®

DAIKIN



interklima 2005

18. MEĐUNARODNI SIMPOZIJ O GRIJANJU, HLAĐENJU I KLIMATIZACIJI

7. KONFERENCIJA O TERMOGRAFIJI

u sklopu
**IZLOŽBE GRIJANJA, HLAĐENJA, VENTILACIJE, KLIMATIZACIJE,
SANITARIJA, OBRADJE PITKIH VODA, TERMOENERGETSKIH
POSTROJENJA, KOGENERATIVNIH SUSTAVA**

**18th INTERNATIONAL SYMPOSIUM
AND EXHIBITION OF HEATING, REFRIGERATING
AND AIR CONDITIONING**

7th CONFERENCE ON THERMOGRAPHY

CROATIA - Zagreb, 21. i 22. travnja 2005.

Zagrebački Velesajam, Dvorana Brijuni

Radove u zborniku recenzirali su članovi međunarodnog znanstvenog odbora i objavljeni su u izvornom obliku. Pretisak, umnožavanje ili bilo koji drugi način reprodukcije zbornika ili njegovog dijela nije dozvoljeno bez suglasnosti nakladnika.

The papers in the proceedings are revised by members of the International Scientific Committee. All the papers are printed in their original form. Reproduction of this publication or parts thereof is permitted only under the permission of the publisher.

Nakladnik / Publisher: Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu,
Zagreb, Hrvatska

Glavni urednik / Editor-In-Chief: prof. dr. sc. Tonko ĆURKO, dipl. ing.

Recenzije / Revisions: prof. dr. sc. Antun GALOVIĆ, dipl. ing.
prof. dr. sc. Srećko ŠVAIĆ, dipl. ing.

Znanstveni odbor / Scientific Committee:

Mladen ANDRASSY, Igor BALEN, Frano BARBIR, Imre BENKÖ, Ivanka BORAS,
Vincent BUTALA, Tonko ĆURKO, Julije DOMAC, Miodrag DRAKULIĆ,
Bernard FRANKOVIĆ, Antun GALOVIĆ, Jurij KROPE, Gordana LUČIĆ, Jurij MODIC,
Peter NOVAK, Matjaž PREK, Nikola RUŽINSKI, Srećko ŠVAIĆ, Ivan VILIČIĆ

Tehnički urednik / Technical editor: Zoran PAJNIĆ, dipl.ing.

Priprema i dizajn / Layout & Design: ENERGETIKA MARKETING, Zagreb, Hrvatska

CIP - Katalogizacija u publikaciji
Nacionalna i sveučilišna knjižnica, Zagreb

ISBN 953-6759-28-4

Tisak / Print: Grafika HRAŠĆE, Hrvatska



interklina 2005

**18. MEĐUNARODNI SIMPOZIJ
O GRIJANJU, HLAĐENJU I KLIMATIZACIJI**

7. KONFERENCIJA O TERMOGRAFIJI

u sklopu
**IZLOŽBE GRIJANJA, HLAĐENJA, VENTILACIJE, KLIMATIZACIJE,
SANITARIJA, OBRADJE PITKIH VODA, TERMOENERGETSKIH
POSTROJENJA, KOGENERATIVNIH SUSTAVA**

**18th INTERNATIONAL SYMPOSIUM
AND EXHIBITION OF HEATING, REFRIGERATING
AND AIR CONDITIONING**

7th CONFERENCE ON THERMOGRAPHY

**CROATIA - Zagreb, 21. i 22. travnja 2005.
Zagrebački Velesajam, Dvorana Brijuni**

Organizatori / Organized by



Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu
Faculty for Mechanical Engineering and Naval Architecture, University of Zagreb, Croatia



Fakulteta za strojništvo Univerze v Ljubljani
Faculty for Mechanical Engineering, University of Ljubljana, Slovenia

Suorganizatori / Coorganized by



Hrvatska komora arhitekata i inženjera u graditeljstvu - Razred inženjera strojarstva
*Croatian Chamber of Architects and Engineers in Construction - Mechanical Engineers'
Department*



Interklina 2005

**18. MEĐUNARODNI SIMPOZIJ
O GRIJANJU, HLAĐENJU I KLIMATIZACIJI**

**18th INTERNATIONAL SYMPOSIUM
AND EXHIBITION OF HEATING, REFRIGERATING
AND AIR CONDITIONING**

7. KONFERENCIJA O TERMOGRAFIJI

7th CONFERENCE ON THERMOGRAPHY

u sklopu
**IZLOŽBE GRIJANJA, HLAĐENJA, VENTILACIJE, KLIMATIZACIJE,
SANITARIJA, OBRADJE PITKIH VODA, TERMOENERGETSKIH
POSTROJENJA, KOGENERATIVNIH SUSTAVA**

**CROATIA - Zagreb, 21. i 22. travnja 2005.
Zagrebački Velesajam, Dvorana Brijuni**

Pokrovitelji / Patronage

Ministarstvo znanosti, obrazovanja i sporta RH

Ministry of Science, Education and Sport of the Republic of Croatia

Ministarstvo gospodarstva, rada i poduzetništva RH

Ministry of the Economy, Labour and Entrepreneurship of the Republic of Croatia

Ministarstvo zaštite okoliša, prostornog uređenja i graditeljstva RH

*Ministry of Environmental Protection, Physical Planning and Construction of the
Republic of Croatia*

Državni zavod za mjeriteljstvo

State Office for Metrology

Fond za zaštitu okoliša i energetske učinkovitost

Environmental Protection and Energy Efficiency Fund

Energetski institut "Hrvoje Požar"

Energy Institute Hrvoje Požar

Zbornik radova tiskan je uz financijsku potporu Ministarstva znanosti, obrazovanja i sporta Republike Hrvatske.

The Proceedings was published by support of the Ministry of Science, Education and Sport of the Republic of Croatia.



Interklina 2005

**18. MEĐUNARODNI SIMPOZIJ
O GRIJANJU, HLAĐENJU I KLIMATIZACIJI**

7. KONFERENCIJA O TERMOGRAFIJI

u sklopu

**IZLOŽBE GRIJANJA, HLAĐENJA, VENTILACIJE, KLIMATIZACIJE,
SANITARIJA, OBRADJE PITKIH VODA, TERMOENERGETSKIH
POSTROJENJA, KOGENERATIVNIH SUSTAVA**

**18th INTERNATIONAL SYMPOSIUM
AND EXHIBITION OF HEATING, REFRIGERATING
AND AIR CONDITIONING**

7th CONFERENCE ON THERMOGRAPHY

CROATIA - Zagreb, 21. i 22. travnja 2005.

Zagrebački Velesajam, Dvorana Brijuni

ZNANSTVENI SAVJET (abecednim redom) Scientific Committee

Mladen ANDRASSY

Igor BALEN

Frano BARBIR

Imre BENKÖ

Ivanka BORAS

Vincent BUTALA

Tonko ĆURKO

Julije DOMAC

Miodrag DRAKULIĆ

Bernard FRANKOVIĆ

Antun GALOVIĆ,

predsjednik / *chairman*

Jurij KROPE

Gordana LUČIĆ

Jurij MODIĆ

Peter NOVAK,

dopredsjednik / *vice-chairman*

Matjaž PREK

Nikola RUŽINSKI

Srećko ŠVAIĆ

Ivan VILIČIĆ



Interklina 2005

18. MEĐUNARODNI SIMPOZIJ
O GRIJANJU, HLAĐENJU I KLIMATIZACIJI

7. KONFERENCIJA O TERMOGRAFIJI

u sklopu

IZLOŽBE GRIJANJA, HLAĐENJA, VENTILACIJE, KLIMATIZACIJE,
SANITARIJA, OBRADJE PITKIH VODA, TERMOENERGETSKIH
POSTROJENJA, KOGENERATIVNIH SUSTAVA

18th INTERNATIONAL SYMPOSIUM
AND EXHIBITION OF HEATING, REFRIGERATING
AND AIR CONDITIONING

7th CONFERENCE ON THERMOGRAPHY

CROATIA - Zagreb, 21. i 22. travnja 2005.

Zagrebački Velesajam, Dvorana Brijuni

ORGANIZACIJSKI ODBOR (abecednim redom) **Organizational Board**

Žaneta AVDIČEVIĆ
Maksim BOŠNJAK
Igor BREZAK
Aldo BRNČIĆ
Pero ĆURO
Petar DONJERKOVIĆ,
predsjednik / chairman
Željko DORIĆ
Branko DUVNJAK
Zvonimir DŽAPO
Damir FLEGO
Danijela JASPRICA
Marko JOSIĆ
Zdravko KURILJ
Ninoslav KURTALJ
Branko MEŠTROVIĆ
Kerim MUJKIĆ
Darko MUŽEVIĆ
Ladislav NOVAČIĆ

Mario OPAČAK
Branislav PAZMAN
Ivan PETROKOV
Vladimir PRANJIĆ
Branimir POLJAK,
dopredsjednik / vice-chairman
Marko RAJČEVIĆ
Tomo SKUHALA
Davor SLADOVIĆ
Gordan SRIĆA
Saša STRANIĆ
Marija ŠĆULAC-DOMAC
Vladimir TURINA
Tibor VARGA
Zdenko VAŠATKO
Milan VUKOVIĆ
Feđa ZEKAN
Mijo ZGLAVNIK
Davor ZIDARIĆ



Interklina 2005

**18. MEĐUNARODNI SIMPOZIJ
O GRIJANJU, HLAĐENJU I KLIMATIZACIJI**

**18th INTERNATIONAL SYMPOSIUM
AND EXHIBITION OF HEATING, REFRIGERATING
AND AIR CONDITIONING**

7. KONFERENCIJA O TERMOGRAFIJI

7th CONFERENCE ON THERMOGRAPHY

u sklopu
**IZLOŽBE GRIJANJA, HLAĐENJA, VENTILACIJE, KLIMATIZACIJE,
SANITARIJA, OBRADJE PITKIH VODA, TERMOENERGETSKIH
POSTROJENJA, KOGENERATIVNIH SUSTAVA**

CROATIA - Zagreb, 21. i 22. travnja 2005.

Zagrebački Velesajam, Dvorana Brijuni

**Posebno zahvaljujemo sljedećim tvrtkama:
The support of the following companies is gratefully acknowledged:**

A.M.H d. o. o.

DAIKIN Airconditioning Central Europe, Predstavništvo u Republici Hrvatskoj

DANFOSS d.o.o.

DHT PROJEKT d.o.o.

ELEKTROMETAL d.d.

FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, STROJARSTVA I BRODOGRADNJE Sveučilišta u Splitu

HAMEX d.o.o.

HEP TOPLINARSTVO d.o.o.

Hrvatska komora arhitekata i inženjera u graditeljstvu, RAZRED INŽENJERA STROJARSTVA

INTEL TRADE d.o.o.

ISOPLUS ZAGREB d.o.o.

ITS CONSULTING d.o.o.

KLIMAOPREMA d.d.

MERKANTILE d.d.

ROBERT BOSCH d.o.o., Područje JUNKERS

SLADOVIĆ d.o.o.

TEHNOKOM d.o.o.

TERMO SERVIS d.o.o.

TROX AUSTRIA GmbH, Poslovnica Zagreb

VAILLANT GmbH - Predstavništvo Zagreb

VISSMANN d.o.o.

WEISHAUP - ZAGREB d.o.o.

WILO HRVATSKA d.o.o.

YORK INTERNATIONAL d.o.o.

četvrtak, 10. travnja 2003.

PRIJAVA SUDIONIKA, PODJELA ZBORNIKA8:30 - 9:15

POČETAK, POZDRAVNI GOVORI, OTVARANJE9:15 - 9:30

A. GALOVIĆ, P. NOVAK, P. DONJERKOVIĆ, B. POLJAK

A PRIJENOS TOPLINE I MASE9:30 - 11:00

Voditelji: A. GALOVIĆ, I. BORAS, Z. POŠA

Radovi: K. PONWEISER, W. LINZER, M. MALINOVEC PUČEK, S. ŠVAIĆ - Usporedba efikasnosti zavojnica i spiralnih traka; V. SOLDI, T. ČURKO - Isparavanje radne tvari u kolektoru solarne dizalice topline; S. ŠVAIĆ, I. BORAS, M. SUŠA - Verifikacija jednodimenzijskog numeričkog modela provođenja topline u ljudskom tkivu uz pomoć termografije; Z. POŠA - Toplinska bilanca ljudskog tijela kod kupanja; K. OSMAN - Poboljšanje sustava upravljanja primjenom modelskih prediktivnih regulatora

Prezentacije: VIESSMANN Zagreb

TEHNOKOM Zagreb

coffee - break.....11:00 - 11:30

B OBNOVLJIVI IZVORI, ENERGETSKA I TERMOTEHNIČKA OPREMA11:30 - 13:00

Voditelji: O. FABRIS, V. ZANKI ALUJEVIĆ, T. RENGEL

Radovi: A. BUSUTTIL, I. KURILJ, I. MAJCE, R. K. RAI: Izvedba održivog energetskog sustava na otoku - slučaj Vis; M. CHALAVI, M. HOHNJEC, D. MALJKOVIĆ, M. SEVER, T. VIRKES: Izvedba održivog energetskog sustava na otoku - slučaj Šipan; M. PERIĆ, V. KOROMAN, I. ČULJAK - Vodikov energetski sustav - moguće rješenje spremanja obnovljive energije: T. RENGEL; D. ABRAMOVIĆ PRODAN; H. DECORTI - Osnove upravljanja na vodenoj strani u termotehničkim instalacijama

Prezentacije: TROX Zagreb

FESB Split

C SUSTAVI ZA GRIJANJE, VENTILACIJU, KLIMATIZACIJU, HLAĐENJE.....13:00 - 14:30

Voditelji: P. DONJERKOVIĆ, V. SOLDI, K. PEČAR

Radovi: V. SOLDI, V. ZANKI ALUJEVIĆ, M. GROZDEK, T. ČURKO - Svojstva zamjenskih radnih tvari; D. JANKOVIĆ - Analiza isplativosti uvođenja novog rashladnog sistema s kaskadnim CO₂/NH₃ uređajem umjesto postojećeg amonijačnog rashladnog sistema u tvrtki Gavrilović; D. ZADRO - Sistemi distribucije zraka u čistim prostorima s posebnim osvrtom na realizaciju projekta "Pliva-Biotehnologija"; S. GALUŠIĆ - Mogućnosti primjene zračnih zavjesa u komercijalnim i industrijskim objektima; P. DONJERKOVIĆ, S. PEKAS - Projekt termotehničkih instalacija klimatizacije muzeja suvremene umjetnosti u Zagrebu

Prezentacija: WEISHAUPT Zagreb

cocktail - WEISHAUPT Vas poziva.....14:30 - 15:30

STRUČNI POSJET: novi poslovno-proizvodni prostori tvrtke

KLIMA OPREMA Samobor

• polazak autobusom ispred Zagrebačkog velesajma.....15:30

• povratak autobusom iz KLIMA OPREME Samobor

do Zagrebačkog velesajma18:30

Program rada



petak, 11. travnja 2003.

D 7. KONFERENCIJA O TERMOGRAFIJI, ISPITIVANJA, MJERENJA.....9:00 - 11:00

Voditelji: S. ŠVAIĆ, D. DOVIĆ, M. MALINOVEC PUČEK

Radovi: S. ŠVAIĆ, I. BORAS, M. SUŠA - Infracrvena termografija i numeričke metode u zgradarstvu; Ž. HRS BORKOVIĆ, M. SUŠA - Primjena IC termografije u zgradarstvu; S. ŠVAIĆ, D. DOVIĆ, M. SUŠA - Primjena termografije kod analize strujanja vode u toplovodnim kotlovima; G. TRAXLER - Practical Experience with Square Puls Thermography for Finding Inclusions in Stainless Steel; J. STEPANIĆ, S. ŠVAIĆ, V. KRSTELJ, I. BORAS, M. MALINOVEC PUČEK - Mjeriteljski elementi u termografiji ukopanih objekata; D. SHEJBAL, P. DRVIŠ, S. ŠVAIĆ, I. BORAS, M. SUŠA, B. PEGAN, L. KALOGJERA - Procjena preživljenja kožnih režnjeva pomoću IR termografije; F. MENDEL - The Austrian Society for Thermography

Prezentacije: AMH Zagreb - VEXVE Finska

DANFOSS Zagreb

coffee break.....11:00 - 11:30

TEMATSKI OKRUGLI STOLOVI.....11:30 - 14:00

HEP TOPLINARSTVO: GRIJANJE I HLAĐENJE PAROM

HKAIG - RAZRED INŽENJERA STROJARSTVA: Aktualnosti

cocktail14:00 - 15:00



interklima 2005

PREGOVOR

Od 1969. održava se u sklopu izložbe grijanja, hlađenja i klimatizacije na Zagrebačkom Velesajmu međunarodni simpozij INTERKLIMA. Simpozij i izložba su bijenalnog karaktera. Simpozij je ponovno proširen s konferencijom o IC termografiji, a sama izložba s temama sanitarije, obrade pitkih voda, termoenergetska postrojenja i kogeneracijski sustavi. Očekuje se da i ovaj susret bude mjesto razmjene istraživačkih, radnih i drugih informacija kao i razmjena mišljenja stručnjaka iz tematskih područja simpozija.

Nastavljajući s dosadašnjom praksom okupljanja stručnjaka iz ovog područja i ovaj će se puta na Simpoziju analizirati najnovije aktualnosti. Nova Komora, kao strukovna organizacija postavila je nove odnose u graditeljstvu. Ipak, ostalo je neriješenih pitanja unutar svake struke pa tako i unutar strojarskog razreda. Stoga je ovaj Simpozij pravo mjesto za analizu i razmjenu dosadašnjih spoznaja, pa i za davanje novih prijedloga i za nova rješenja.

U strojogradnji, graditeljstvu i energetici brojne su novosti, od velikog broja novih pa do velikog broja neslavno nestalih tvrtki. Stečajevi, restrukturiranje, privatizacija i dr., dobra i loša iskustva također su predmet zanimanja onih koji ovaj Simpozij posjećuju.

Novosti u struci, nova oprema i tehnologija, novi propisi i norme tradicionalno se predstavljaju upravo na ovom Simpoziju. Tako je za brojne izlagače koji na izložbenim prostorima vizuelno predstavljaju nove programe i tehnologije upravo Simpozij mjesto na kojem okupljenim stručnjacima mogu izravno predstaviti svoje novosti.

Stoga se s pravom očekuje da i ovaj put Simpozij INTERKLIMA okupi brojnu stručnu javnost iz ovih tematskih područja.

A. Galović, P. Donjerković

FOREWORD

The International Symposium INTERKLIMA has been held within the Exhibition of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning at the Zagreb Fair since 1969. Both the Symposium and the Exhibition are bi-annual events. This year, the Symposium is again extended with the Conference on IR-thermography and the Exhibition with the topics from sanitary equipment, water treatment, thermal power generation plants and co-generation systems. It is expected that this meeting will also be a place to exchange information about research and praxis as well as to exchange the professional opinions from the thematic fields of the Symposium.

Continuing with the up-to-present praxis of gathering the experts from the field, the actualities will be again discussed at the Symposium. The new Croatian Chamber of Architects and Engineers in Construction, as professional organisation, has changed the old relations in the field of building construction in Croatia. Hence, many unanswered questions still remain everywhere, so is in the Mechanical Engineers' Department. Therefore this Symposium should be the right place for analysis and exchange of gained experience as well as to present new proposals or new solutions.

There are many novelties in mechanical, civil and power engineering business in Croatia. There's a number of newly established, but also a number of vanished companies. Bankruptcy, re-structurisation, privatisation - positive and negative experience - should be also the topics of all those that gather at the Symposium.

The professional news, new equipment and technology, new technical rules, acts and standards are traditionally presented at the Event. For many exhibitors, which are presented with their programmes and technologies at the adjacent Exhibition, the Symposium is the right place to directly present themselves to the gathered numerous experts from the field.

For all those reasons, it is to expect that the INTERKLIMA Symposium will again gather the whole professional public from the particular fields of interest.

A. Galović, P. Donjerković

SADRŽAJ

Uvodni dio

TERMO SERVIS	unutarnji omot, prednji
Organizatori	5
Pokrovitelji	6
Znanstveni savjet	7
Organizacijski odbor	8
Zahvala suorganizatorima	9
Program rada	10
Predgovor	12
Sadržaj	13
MERKANTILE	16
EM literatura: Priručnik za ventilaciju i klimatizaciju, 2. izdanje	18

A PRIJENOS TOPLINE I MASE 19

A1

K. PONWEISER, W. LINZER, M. MALINOVEC PUČEK, S. ŠVAIĆ - Usporedba efikasnosti zavojnica i spiralnih traka	21
---	----

A2

V. SOLDI, T. ČURKO - Isparavanje radne tvari u kolektoru solarne dizalice topline	34
---	----

A3

S. ŠVAIĆ, I. BORAS, M. SUŠA - Verifikacija jednodimenzijskog numeričkog modela provođenja topline u ljudskom tkivu uz pomoć termografije	44
--	----

A4

Z. POŠA - Toplinska bilanca ljudskog tijela kod kupanja	54
---	----

A5

K. OSMAN - Poboľšanje sustava upravljanja primjenom modelskih prediktivnih regulatora	63
---	----

VIESSMANN	73
-----------------	----

TEHNOKOM	74
----------------	----

B OBNOVLJIVI IZVORI ENERGIJE, ENERGETSKA I TERMOTEHNIČKA OPREMA 75

EM literatura: Obnovljivi izvori energije	76
---	----

B1

A. BUSUTTIL, I. KURILJ, I. MAJCE, R. K. RAI: Izvedba održivog energetskog sustava na otoku - slučaj Vis	77
---	----



B2	M. CHALAVI, M. HOHNJEC, D. MALJKOVIĆ, M. SEVER, T. VIRKES: Izvedba održivog energetskeg sustava na otoku - slučaj Šipan	78
B3	M. PERIĆ, V. KOROMAN, I. ČULJAK - Vodikov energetski sustav - moguće rješenje spremanja obnovljive energije	79
B4	T. RENGEL; D. ABRAMOVIĆ PRODAN; H. DECORTI - Osnove upravljanja na vodenoj strani u termotehničkim instalacijama	89
	TROX AUSTRIA Gmbh, Poslovnica Zagreb	97
	FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, STROJARSTVA I BRODOGRADNJE Sveučilišta u Splitu	99
	ROBERT BOSCH d.o.o., Područje JUNKERS	101
	Kondenzacijski uređaji Junkers	102
C	SUSTAVI ZA GRIJANJE, VENTILACIJU, KLIMATIZACIJU, HLAĐENJE	105
	KLIMAOPREMA d.d. Samobor: Za čist i ugodan zrak	106
C1	V. SOLDI, V. ZANKI ALUJEVIĆ, M. GROZDEK, T. ĆURKO - Svojstva zamjenskih radnih tvari	109
C2	D. JANKOVIĆ - Analiza isplativosti uvođenja novog rashladnog sistema s kaskadnim CO ₂ /NH ₃ uređajem umjesto postojećeg amonijačnog rashladnog sistema u tvrtki Gavrilović	120
C3	D. ZADRO - Sistemi distribucije zraka u čistim prostorima s posebnim osvrtom na realizaciju projekta "Pliva-Biotehnologija"	133
C4	S. GALUŠIĆ - Mogućnosti primjene zračnih zavjesa u komercijalnim i industrijskim objektima	143
C5	P. DONJERKOVIĆ, S. PEKAS - Projekt termotehničkih instalacija klimatizacije muzeja suvremene umjetnosti u Zagrebu	153
	M. STURY - Novosti iz proizvodnog programa tvrtke Weishaupt	167
	M. KLANČIŠAR - Upotreba sistema nadzora i automatizacije u kombinaciji sa suvremenim individualnim sustavima regulacije različitih komponenata većih kotlovnica	168
	WEISHAUPT - ZAGREB	171



D	7. KONFERENCIJA O TERMOGRAFIJI, ISPITIVANJA, MJERENJA	173
D1	S. ŠVAIĆ, I. BORAS, M. SUŠA - Infracrvena termografija i numeričke metode u zgradarstvu	175
D2	Ž. HRS BORKOVIĆ, M. SUŠA - Primjena IC termografije u zgradarstvu	183
D3	S. ŠVAIĆ, D. DOVIĆ, M. SUŠA - Primjena termografije kod analize strujanja vode u toplivodnim kotlovima	193
D4	G. TRAXLER - Practical Experience with Square Puls Thermography for Finding Inclusions in Stainless Steel	203
D5	J. STEPANIĆ, S. ŠVAIĆ, V. KRSTELJ, I. BORAS, M. MALINOVEC PUČEK - Mjeriteljski elementi u termografiji ukopanih objekata	213
D5a	D. SHEJBAL, P. DRVIŠ, S. ŠVAIĆ, I. BORAS, M. SUŠA, B. PEGAN, L. KALOGJERA - Procjena preživljenja kožnih režnjeva pomoću IR termografije	218
D6	F. MENDEL - The Austrian Society for Thermography	225
VEXVE OY, Finska		227
S. STRANIĆ (DANFOSS) - Individualna stambena toplinska podstanica - regulacijske karakteristike višenamjenskog regulatora tip AVTI		228
TEMATSKI OKRUGLI STOLOVI		
HEP TOPLINARSTVO: Grijanje i hlađenje parom		231
Zakon o proizvodnji, distribuciji i opskrbi toplinskom energijom		233
ISOPLUS ZAGREB		242
HKAIG - RAZRED INŽENJERA STROJARSTVA: Okrugli stol		244
ENERGETIKA MARKETING		246
DAIKIN Airconditioning Central Europe, Predstavništvo u Republici Hrvatskoj		249
HEP TOPLINARSTVO		250
HKAIG - RAZRED INŽENJERA STROJARSTVA		250
YORK INTERNATIONAL	unutarnji omot, zadnji	
SLADOVIĆ	vanjski omot, zadnji	
ITS CONSULTING	vanjski omot, zadnji	

Merkantile

dioničko društvo
ZASTUPSTVA, INŽENJERING, PROIZVODNJA I TRGOVINA

Svačićev trg 6
HR – 10000 Zagreb CROATIA
telefon: +385 1 4897111
telefax: +385 1 4897100
www.merkantile.hr

Općenito o Merkantile d.d

Na tržištu smo prisutni od 1950. godine. Više od pola stoljeća stvaramo ugled, stječemo iskustvo i poslovne partnere. Za neke smo stari prijatelji, a za druge pouzdani suradnici. Naša poslovna filozofija je jednostavna. Njezina okosnica su sadašnji i budući klijenti, a naš zadatak je razumjeti njihove potrebe i ponuditi inovativna i suvremena tehnička rješenja i podršku koja će ih zadovoljiti.

Naše komparativne prednosti nalaze se u:

- mladom, perspektivnom i motiviranom timu stručnjaka,
- jasno definiranoj strategiji i odnosu sa svjetskim tvrtkama koje zastupamo na hrvatskom tržištu,
- dugogodišnjem iskustvu u inženjeringu nadzorno-upravljačkih sustava, automatizacije i elektronike,
- stalnom timskom usavršavanju, edukaciji i praćenju najnovijih tehnoloških dostignuća,
- snažnoj logistici s proizvodnim pogonima, distributivnim centrima i skladištima,
- razvijenoj distribucijskoj mreži u Hrvatskoj, Sloveniji, Bosni i Hercegovini i Makedoniji te vlastitim tvrtkama u BiH (Sarajevo) i u Sloveniji (Novo Mesto),
- stalnoj podršci i orijentaciji prema korisniku.

Svaki od klijenata nama je izazov i prilika da pred njim pokažemo svoje znanje, stručnost te da ga vodimo u korak s novim tehnologijama.

Proizvodni program i zastupstva

Profitni centar Zastupstva, proizvodnja i trgovina

Sia Abrasives Industries AG, AKZO NOBEL, Soja Austria, PURAC, SKF, Mariani Clima

Profitni centar Inženjering u industriji

Honeywell

Profitni centar Inženjering u zgradarstvu

Honeywell, MSA Auer, Parker-Lucifer, WIKA, MNG, Baukmann, Pelco

Profitni centar Proizvodnja plinske opreme

Samostalna proizvodnja

Profitni centar Inženjering za plin

Plinski inženjering

Profitni centar Elektromaterijal i rasvjeta

GEWISS, SCHUPA

PROFITNI CENTAR INŽENJERING U ZGRADARSTVU

Tel: 4897 141, Fax: 4897 140

Zastupstva: **Honeywell, MSA Auer, Parker-Lucifer, WIKA, MNG, Braukmann, PELCO.**

Profitni centar Inženjering u zgradarstvu osigurava našim klijentima optimalna rješenja za nadzor i upravljanje svim bitnim sustavima u objektu, počev od sustava klimatizacije, grijanja i hlađenja, elektroenergetskih sustava i rasvjete, sustava dojava požara i protupožarne zaštite, sustava tehničke zaštite, i dr.

Asortiman našeg prodajnog programa i širina usluga koje pružamo, garantira našim klijentima optimalna rješenja za sve njihove potrebe, od najmanjih sustava do najsloženijih sustava.

Prodajni program profitnog centra Inženjering u zgradarstvu.



- Otvoreni nadzorno-upravljački sustavi (BMS)
- Oprema za regulaciju sustava klimatizacije, grijanja i hlađenja te elektroenergetskih sustava i rasvjete
- Oprema za inteligentnu sobnu regulaciju
- Sustavi dojava požara i protupožarne zaštite
- Sustavi tehničke zaštite



- Uređaji i armature za obradu pitnih voda
- Ventili za regulaciju tlaka vode
- Filteri za vodu
- Zaštitinici povratnog tlaka



- Magnetski ventili u običnoj i protueksplozijskoj izvedbi
- Blok ventili za pneumatske strojeve



- Vodeći proizvođač na području mjerno-regulacijske tehnike, procesne instrumenacije i senzorske tehnologije



- Fiskni sustavi za detekciju eksplozivnih, zapaljivih i otrovnih plinova
- Prijenosni uređaji za detekciju eksplozivnih, zapaljivih i otrovnih plinova

Radovi i usluge koje pružamo:

- izrada tehničkih rješenja i podrška projektantima prilikom izrade projektne dokumentacije,
- tehničko praćenje realizacije projekta u svim fazama,
- izrada svih aplikacijskih programa i njihovo funkcionalno ispitivanje,
- puštanje sustava u funkciju i validacija sustava,
- obuka osoblja korisnika i izrada korisničkih uputa za rukovanje sustavima,
- probni rad sustava,
- izrada dokumentacije izvedenog stanja,
- održavanje tijekom jamstvenog i van jamstvenog roka.

Najvažnije reference u Hrvatskoj i BiH:

- Zračna luka Zagreb
- Sheraton Hotel Zagreb
- Hotel Westin Zagreb
- Komercijalni kompleks Centar Kaptol
- Poslovni centar UNITIC Sarajevo
- Klinički centar Sarajevo
- Sportski centar Zetra Sarajevo



PRIRUČNIK ZA VENTILACIJU I KLIMATIZACIJU, 2. izdanje



izdanje 2003.
528 stranica
format A5

Kako bi stručnoj javnosti olakšali složen posao projektiranja sustava ventilacije i klimatizacije ENERGETIKA MARKETING je okupila skupinu autora koji su pregledom u više nego brojnu danas važeću i trenutno aktualnu stručnu literaturu i propise kod nas i u svijetu u brojnim poglavljima ovog Priručnika obuhvatili najveći dio onog što je danas u ovoj djelatnosti važno.



A

PRIJENOS TOPLINE I MASE

A1

K. PONWEISER, W. LINZER, M. MALINOVEC PUČEK,
S. ŠVAIĆ - Usporedba efikasnosti zavojnica i spiralnih traka 21

A2

V. SOLDI, T. ČURKO - Isparavanje radne tvari u kolektoru
solarne dizalice topline 34

A3

S. ŠVAIĆ, I. BORAS, M. SUŠA - Verifikacija jednodimenzijskog
numeričkog modela provođenja topline u ljudskom tkivu uz
pomoć termografije 44

A4

Z. POŠA - Toplinska bilanca ljudskog tijela kod kupanja 54

A5

K. OSMAN - Poboljšanje sustava upravljanja primjenom
modelskih prediktivnih regulatora 63



Usporedba efikasnosti zavojnica i spiralnih traka

Karl PONWEISER, Wladimir LINZER, Marina MALINOVEC
PUČEK*, Srećko ŠVAIĆ*

Institute of Thermal Engineering, Vienna University of Technology
Getreidemarkt 9/302, Vienna, Austria
e-mail: Karl.Ponweiser@tuwien.ac.at, Wladimir.Linzer@tuwien.ac.at
* Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture
Ivana Lučića 5, Zagreb, Croatia
* e-mail: marina.malinovec@fsb.hr, srecko.svaic@fsb.hr

SAŽETAK

U radu su dani eksperimentalni rezultati ispitivanja jednofaznog strujanja zraka u glatkoj cijevi, te u cijevima s umetnutim zavojnicama i spiralnim trakama. Karakteristični ispitni parametri cijevi umetnute s turbulatorom su: duljina ispitnog turbulatora L (300, 600 i 1200 mm) i pozicija ispitnog turbulatora u cijevi x (od 321 do 2186 mm) mjerena sa stražnje strane ispitne cijevi. Ukupna duljina glatke cijevi je približno 3000 mm. Područje Reynolds-ovog broja se kreće od 7700 do 19000. Uočeni su značajno veći koeficijent prijelaza topline i koeficijent trenja nego kod glatke cijevi u istim uvjetima. Određena je efikasnost ispitivanih zavojnica i spiralnih traka pomoću tri različita kriterija koji se temelje na ciljevima povećanja prijelaza topline, smanjenja veličine izmjenjivačke površine kao i smanjenja utrošene energije.

KLJUČNE RIJEČI

zavojnica, spiralna traka, glatka cijev, prijelaz topline, pad tlaka, određivanje efikasnosti

UVOD

Potreba za uštedom energije, materijala i ostalih nezaobilaznih troškova stimulirala je istraživanje raznovrsnih metoda povećanja prijelaza topline. Metode povećanja prijelaza topline općenito su podijeljene u dvije glavne grupe: pasivne i aktivne metode. Webb [1] je naveo slijedeće pasivne metode: obrađene površine, hrapave površine (integralna hrapavost, umetnute zavojnice), proširene površine, naizmjenično raspoređeni ugradbeni elementi, elementi za vrtloženje toka (spiralne trake), cijevi s umetnutom zavojnicom, elementi za površinsku napetost i dodaci za kapljevine i plinove.

U ovoj podjeli umetci za cijevi u obliku zavojnice se promatraju kao "hrapavost uz stijenku cijevi", dok umetci za cijevi u obliku spiralnih traka pripadaju elementima za vrtloženje toka. To znači da zavojnice i spiralne trake, kao dva najčešća korištena umetka za cijevi, posjeduju različite mehanizme povećanja prijelaza topline. Zavojnice, kao primjer neintegralne hrapavosti, periodično narušavaju granični sloj i unapređuju miješanje unutar graničnog sloja, bez značajnijeg utjecaja na glavni tok, dok spiralne trake miješaju glavni tok i prisiljavaju tok na spiralno strujanje uzduž cijevi. Spiralne trake ne djeluju kao "hrapavost uz stijenku cijevi" budući da toplinski kontakt spiralne trake i stijenke cijevi nije idealan, ali povećavaju prijelaz topline uslijed povećane komponente tangencijalne brzine i smanjenog poprečnog presjeka strujanja.

Unutarnje orebrenje i integralna hrapavost, kao dva nedavno razvijena pristupa povećanja konvektivnog prijelaza topline unutar cijevi, postaju danas bez sumnje sve važniji i sve učinkovitiji. Ipak, turbulatori (umetci za cijevi), kao najraniji pristup povećanju prijelaza topline u cijevima, su još uvijek prikladni i također predstavljaju jeftiniji način povećanja učina postojećeg izmjenjivača u usporedbi s ugradnjom novih elemenata.

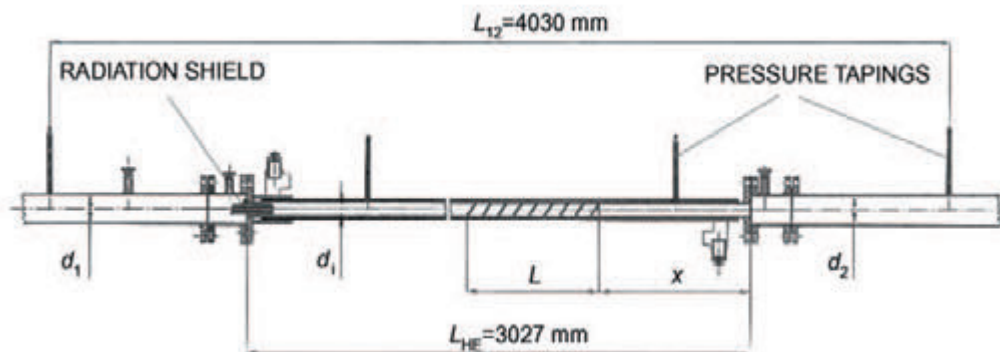
U radu je dan izvještaj o eksperimentalnom istraživanju da bi se razjasnilo koja geometrija turbulatora je učinkovitija, te da li i kako duljina L i pozicija x ispitanog turbulatora u obliku zavojnice odnosno spiralne trake utječe na prijelaz topline i koeficijent trenja. Geometrija turbulatora koja daje željeno povećanje prijelaza topline s najmanjim padom tlaka ima prednost.

ISPITNA LINIJA

Ispitna linija je istovjetna liniji korištenoj u ranijem istraživanju Ponweiser-a et al. [2]. Zrak je korišten kao ispitni medij. Glavne komponente na strani zraka su: turbo-puhalo, oštra prigušnica za mjerenje

masenoga protoka zraka prema DIN 1952, grijač zraka za zagrijavanje zraka na željenu temperature i izmjenjivač cijev u cijevi. Izmjenjivač cijev u cijevi, duljine oko 3 m ($L_{HE}=3027$ mm) (il. 1), sastoji se od dviju cijevi, koncentrično postavljenih jedna u drugu: unutarnja cijev IT ($\text{Ø}38 \times 3,6$, unutarnji promjer cijevi $d_i=30,8$ mm, vanjski promjer cijevi $d_o=38$ mm) i vanjska cijev OT ($\text{Ø}51 \times 3,6$ mm). Obje cijevi izmjenjivača cijev u cijevi izrađene su od čelika St 35-8.

U unutarnjoj cijevi izmjenjivača struji ispitni medij zrak, koji preko stijenke unutarnje cijevi prenosi toplinu vodi, korištenoj kao rashladni medij, koja struji u prostoru između cijevi. Ulazna i izlazna sekcija za smirivanje imaju unutarnji promjer cijevi $d_1=d_2=68,8$ mm. Na strani vode, cirkulacijska pumpa daje konstantan volumni protok vode od $V_w = 4000$ l/h, mjereno pomoću rotametra.

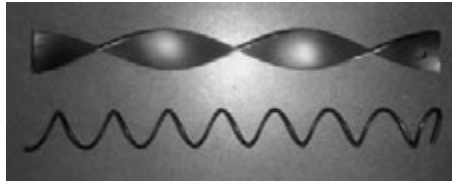


Ilustracija 1. Izmjenjivač cijev u cijevi

Temperatura zraka T_1 iza oštrog prigušnice, te ulazna T_{w1} i izlazna T_{w2} temperatura vode mjerene su otporničkim termometrom Pt100. Ulazna T_{a1} i izlazna T_{a2} temperatura zraka mjerene su pomoću termoparova željezo/konstantan tip J. Na samom ulazu u unutarnju cijev izmjenjivača umetnuta je zaštita od zračenja, da bi se spriječilo zračenje termopara, koji mjeri temperaturu zraka na ulazu T_{a1} , na okolne stijenke znatno niže temperature.

Pored toplinskih mjerenja, na strani zraka mjereno je i pad tlaka između ulazne i izlazne sekcije za smirivanje zraka Δp_{12} ($L_{12}=4030$ mm), koji se koristi za izračunavanje koeficijenta trenja različitih ispitivanih turbulatora. Apsolutni tlak prije oštrog prigušnice p_1 i pad tlaka na oštrog prigušnici Δp_0 mjereno su da bi se odredio maseni protok zraka m_a prema DIN 1952.

U ovom eksperimentalnom radu ispitivani su: glatka cijev s umetnutih 13 zavojnica i 13 spiralnih traka različitih geometrija, te sama glatka cijev. Glatka cijev je korištena za baždarenje mjerne linije i također za usporedbu povećanja prijelaza topline i koeficijenta trenja. Uspoređeni su turbulatori u obliku zavojnice i turbulatori u obliku spiralne trake tri različite duljine L (300, 600 i 1200 mm). Ilustracija 2 prikazuje različite tipove ispitivanih turbulatora duljine $L=300$ mm.



Ilustracija 2. Ispitivani turbulatori duljine $L= 300$ mm

Pozicija turbulatora x (od 321 do 2186 mm, mjerena sa stražnje strane izmjenjivača) i maseni protok zraka m_a (od 0,0058 do 0,0143 kg/s) su također varirani. Temperatura zraka na ulazu T_{a1} (600°C) i volumni protok rashladne vode V_w (4000 l/h) održavani su konstantnim u toku izvođenja svih mjerenja. Sve zavojnice, ispitivane u ovom radu, imaju promjer žice d_w 3 mm i korak s 39 mm i izrađene su od čelika za opruge prema DIN-u 17223 dio 1. Debljina trake t spiralnih traka iznosi 2 mm, a korak spiralnih traka s je 200 mm. Dimenzija koraka s za turbulatore u obliku spiralnih traka je aksijalna udaljenost za okretaj od 360°.

Daljnji detalji u svezi s ispitnom linijom, eksperimentalnim postupcima i analizom mjerne nesigurnosti u ovom radu mogu se naći u Malinovec i Ponweiser [3].

PRISTUP PROBLEMU

Prijelaz topline

Toplinski tok \dot{Q} , srednji koeficijent prijelaza topline u cijevi α i Nusselt-ov broj Nu na strani zraka izračunati su prema slijedećim jednadžbama kako slijedi:

$$\dot{Q} = \dot{m}_a c_{pa} (T_{a1} - T_{a2}) \quad (1)$$

$$\alpha = \frac{1}{\frac{A_i \Delta T_{\ln}}{\dot{Q}} - \frac{d_i}{2\lambda_{st}} \ln \frac{d_o}{d_i} - \frac{d_i}{d_o \alpha_w}} \quad (2)$$

$$Nu = \frac{\alpha \cdot d_i}{\lambda_a} \quad (3)$$

gdje su: α_w koeficijent prijelaza topline potpuno razvijenog turbulentnog strujanja vode u prostoru između dviju koncentrično postavljene cijevi, izračunat prema formuli Petukhov-a i Roizen-a [4], λ_{st} koeficijent toplinske vodljivosti čelika, A_i površina unutarnje stijenke unutarnje cijevi, i ΔT_{\ln} srednja logaritamska razlika temperatura koja se odnosi na razlike temperatura zraka i vode na početku i kraju izmjenjivača.

Da bi se ocijenila učinkovitost prijelaza topline, rezultati prijelaza topline prikazani su u obliku omjera Nusselt-ovih brojeva, Nu/Nu_s , gdje je Nu_s Nusselt-ov broj u glatkoj cijevi, također izračunat iz mjerenih vrijednosti.

Pad tlaka

Pad tlaka u cijevi s umetnutom zavojnicom odnosno s umetnutom spiralnom trakom dobiva se prema

$$\Delta p = \Delta p_{12} - \Delta p_1 - \Delta p_2 \quad (4)$$

gdje su: Δp_{12} mjereni pad tlaka između priključaka na ulaznoj i izlaznoj sekciji za smirivanje zraka, Δp_1 pad tlaka na ulazu u unutarnju cijev i Δp_2 pad tlaka na izlazu iz unutarnje cijevi izmjenjivača.

Zbog prilično složene geometrije zaštite od zračenja, smještene na samom početku unutarnje cijevi izmjenjivača, pad tlaka na ulazu u izmjenjivač Δp_1 ne može biti određen pomoću standardnih formula. Zbog toga je bio mjereno za različite protoke zraka i ulazne temperature zraka (400, 500 i 600°C). Mjerenja su provedena samo za glatku cijev. Na osnovu mjerenog tlaka Δp_1 računa se koeficijent otpora na ulazu u izmjenjivač ζ_1 prema jednadžbi

$$\zeta_1 = \frac{2\Delta p_1 - w_{a1}^2 + w_{ai}^2}{\rho_{a1} w_{a1}^2} \quad (5)$$

gdje su w_{a1} brzina strujanja zraka na ulazu u unutarnju cijev ($d_i=30,8$ mm) i w_{ai} brzina strujanja zraka u ulaznoj sekciji za smirivanje zraka ($d_i=68,8$ mm). Regresijskom analizom određena je jednadžba pravca, koja je korištena za procjenu mjerenja kod turbulatora u obliku zavojnice kao i kod turbulatora u obliku spiralnih traka.

Koeficijent otpora na izlazu iz izmjenjivača ζ_2 , potreban za određivanje pada tlaka na izlazu iz izmjenjivača Δp_2 , je konstantan i računa se prema

$$\zeta_2 = \left[1 - \left(\frac{d_i}{d_2} \right)^2 \right]^2 = 0,639 \quad (6)$$

Koeficijent trenja cijevi s umetnutom zavojnicom odnosno spiralnom trakom računa se prema

$$\xi = \left[\Delta p - \left(\frac{4m_a}{d_i^2 \cdot \pi} \right)^2 \left(\frac{1}{\rho_{a2}} - \frac{1}{\rho_{a1}} \right) \right] \cdot \frac{2d_i}{L_{HE} \cdot \rho_a \cdot w_a^2} \quad (7)$$

gdje je Δp korigiran za izmjenu količine gibanja.

ρ_{a1} i ρ_{a2} su gustoće zraka za temperature zraka na ulazu T_{a1} i izlazu T_{a2} iz izmjenjivača.

Rezultati pada tlaka prikazani su u obliku omjera koeficijenata trenja ξ/ξ_S , gdje je ξ_S koeficijent trenja u slučaju turbulentnog strujanja unutar glatke cijevi, izračunat prema formuli

$$\xi_S = (1,8 \log Re - 1,5)^{-2} \quad (8)$$

Sve fizikalne veličine zraka, kao što su specifični toplinski kapacitet c_{pa} , koeficijent toplinske vodljivosti λ_a , gustoća ρ_a , kinematička viskoznost ν_a izračunate su za srednju aritmetičku temperaturu zraka u izmjenjivaču ($T_a = (T_{a1} + T_{a2})/2$).

REZULTATI I DISKUSIJA

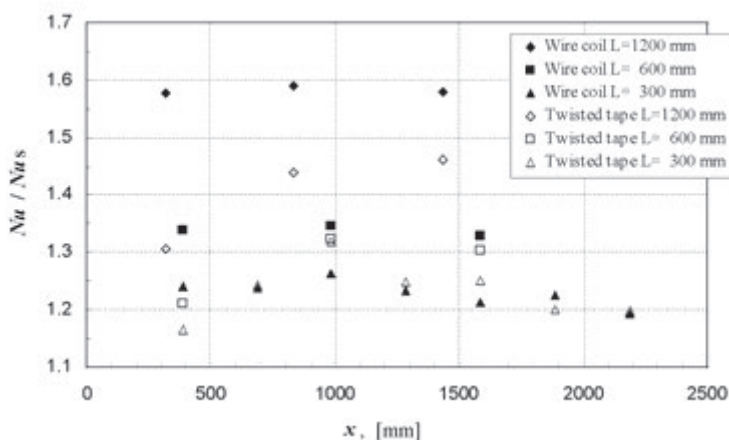
Prijelaz topline i pad tlaka– eksperimentalni rezultati

Tablica 1 pokazuje, da su maksimalne vrijednosti $Nu/Nu_S = 1,61$ kod $Re = 10^4$ i $Nu/Nu_S = 1,59$ kod $Re = 1,5 \cdot 10^4$ dobivene za turbulator u obliku zavojnice duljine $L = 1200$ mm na poziciji $x = 836$ mm. U tom slučaju vrijednosti ξ/ξ_S su 2,88 i 3,06. Maksimalne vrijednosti ξ/ξ_S su dobivene također za turbulator u obliku zavojnice duljine $L = 1200$ mm, ali koji je smješten na poziciji $x = 1436$ mm. Za turbulatore u obliku spiralne trake maksimalne vrijednosti $Nu/Nu_S = 1,47$ kod $Re = 10^4$ i $Nu/Nu_S = 1,46$ kod $Re = 1,5 \cdot 10^4$ su dobivene za duljinu spiralne trake $L = 1200$ mm na poziciji $x = 1436$ mm. U tom slučaju vrijednosti ξ/ξ_S su 2,01 i 2,07, koje su ujedno i najveće za ispitivane spiralne trake.

Tablica 1. Ovisnost Nu/Nu_S i ξ/ξ_S o Re , vrsti, duljini L i poziciji x turbulatora

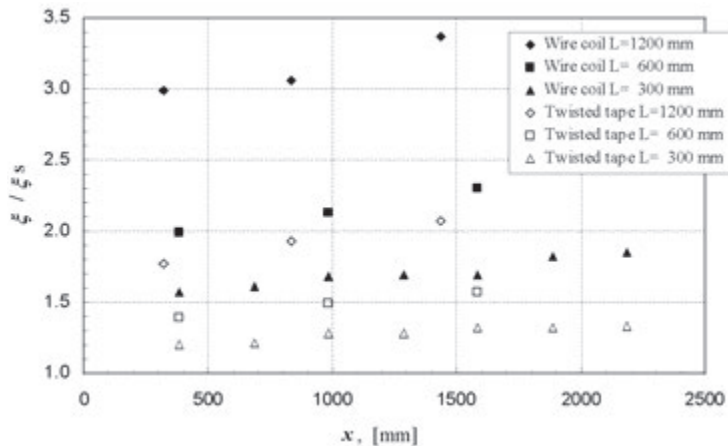
L , [mm]	x , [mm]	$Re=10^4$				$Re=1,5 \cdot 10^4$			
		Zavojnica		Spiralna traka		Zavojnica		Spiralna traka	
		Nu/Nu_S	ξ/ξ_S	Nu/Nu_S	ξ/ξ_S	Nu/Nu_S	ξ/ξ_S	Nu/Nu_S	ξ/ξ_S
1200	321	1,60	2,75	1,35	1,72	1,58	2,99	1,31	1,77
	836	1,61	2,88	1,45	1,89	1,59	3,06	1,44	1,93
	1436	1,58	3,16	1,47	2,01	1,58	3,37	1,46	2,07
600	386	1,34	1,87	1,24	1,36	1,34	1,99	1,21	1,39
	986	1,36	1,99	1,32	1,44	1,35	2,13	1,32	1,49
	1586	1,32	2,14	1,32	1,51	1,33	2,30	1,30	1,57
300	386	1,23	1,46	1,20	1,17	1,24	1,57	1,17	1,20
	686	1,23	1,52	1,24	1,17	1,24	1,61	1,24	1,21
	986	1,24	1,54	1,30	1,24	1,26	1,68	1,32	1,28
	1286	1,22	1,56	1,22	1,21	1,23	1,69	1,25	1,28
	1586	1,19	1,59	1,25	1,28	1,21	1,69	1,25	1,32
	1886	1,20	1,70	1,18	1,26	1,22	1,82	1,20	1,32
	2186	1,18	1,72	1,18	1,31	1,19	1,85	1,20	1,33

Za ispitivane turbulatore duljina $L=1200$ i 600 mm vrijednosti Nu/Nu_S su uvijek veće kod zavojnica nego kod spiralnih traka, ali su također uvijek veće i vrijednosti ξ/ξ_S . Za ispitivane turbulatore duljine $L=300$ mm na pozicijama $x=686, 986, 1286$ i 1586 turbulatori u obliku spiralne trake osiguravaju veći omjer povećanja prijelaza topline Nu/Nu_S nego turbulatori u obliku zavojnice iste duljine, smješteni na istoj poziciji (vidi ilustraciju 3).



Ilustracija 3. Nu/Nu_S versus x kod $Re=1,5 \cdot 10^4$, $Pr=0,7$

Kao što je i očekivano, za sve ispitivane turbulatore vrijednosti ξ/ξ_S rastu s povećanjem pozicije x (vidi ilustraciju 4). Pozicija turbulatora u cijevi značajno utječe na pad tlaka u cijevi s umetnutim turbulatorom. U slučaju djelomičnog ispunjenja cijevi turbulatorom preporuča se postavljanje turbulatora na kraj cijevi.



Ilustracija 4. ξ/ξ_S versus x kod $Re=1,5 \cdot 10^4$, $Pr=0,7$

Potrebno je naglasiti da je najučinkovitiji odnos između povećanja prijelaza topline i koeficijenta trenja $Nu/Nu_S > \xi/\xi_S$ dobiven samo kod turbulatora u obliku spiralne trake duljine $L=300$ mm kod $Re=10^4$ na pozicijama $x=386, 686, 986$ i 1286 mm i kod $Re=1,5 \cdot 10^4$ na pozicijama $x=686$ i 986 mm. Kod turbulatora u obliku zavojnice uvijek je $Nu/Nu_S < \xi/\xi_S$.

Određivanje efikasnosti

Povećanje prijelaza topline umetanjem turbulatora u obliku zavojnica ili spiralnih traka postignuto je na račun povećanja pada tlaka. Stoga je u praktičnoj upotrebi nužno odrediti ekonomsku korist povećanja prijelaza topline umetanjem turbulatora.

Da bi se ustanovilo koji je od 13 turbulatora u obliku zavojnice i 13 turbulatora u obliku spiralne trake najučinkovitiji, korišteni su kriteriji za određivanje efikasnosti (engl. performance evaluation criteria PEC) cijevi s umetnutim turbulatorom u odnosu na glatku cijev kod jednofaznog strujanja, koji se temelje na ciljevima

(a) povećanja prijelaza topline uz istu utrošenu energiju i izmjenjivačku površinu, (b) smanjenja veličine izmjenjivačke površine uz istu utrošenu energiju i izmijenjenu toplinu i (c) smanjenja utrošene energije uz istu izmijenjenu toplinu i izmjenjivačku površinu.

Slijedeća jednadžba, predložena i razvijena od strane Webb-a [1],

$$\frac{(\alpha A)/(\alpha_s A_s)}{(P/P_s)^{1/3} (A/A_s)^{2/3}} = \frac{j/j_s}{(\xi/\xi_s)^{1/3}} = \frac{(St Pr^{2/3})/(St_s Pr_s^{2/3})}{(\xi/\xi_s)^{1/3}} \quad (9)$$

sadrži na lijevoj strani parametre $(\alpha A)/(\alpha_s A_s)$, P/P_s i A/A_s , definirane u odnosu na j/j_s i ξ/ξ_s . Dva od ta tri parametra se postavljaju na vrijednost 1,0, a preostali parametar se izražava u odnosu na omjer Stanton-Prandtl-koeficijent trenja.

Uz tablice 2 je vidljivo, da je između 26 ispitanih turbulatora najučinkovitiji turbulator u obliku spiralne trake duljine $L=300$ mm na poziciji $x=986$ mm. Kod Reynolds-ovog broja $Re=1,5 \cdot 10^4$ ta spiralna traka osigurava najveću učinkovitost između svih ispitanih turbulatora i

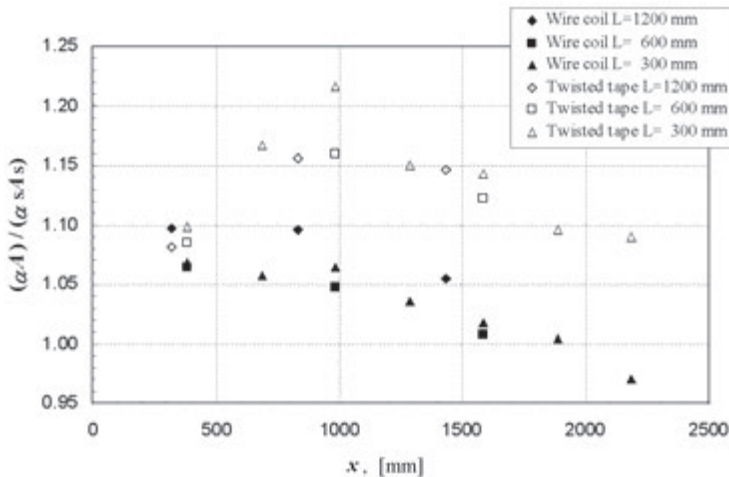
- a) povećava prijelaz topline αA za 21,61% (vidi ilustraciju 5),
- b) smanjuje izmjenjivačku površinu A za 25,43%, i
- c) smanjuje utrošenu energiju P za 44,40%.

Tablica 2. Usporedba 26 različitih turbulatora kod $T_{a1}=600^\circ\text{C}$, $Re=10^4$ i $Re=1,5 \cdot 10^4$

- A – povećanje prijelaza topline, $[(\alpha A)/(\alpha_s A_s)-1] \cdot 100$
- B – smanjenje izmjenjivačke površine, $(1-A/A_s) \cdot 100$
- C – smanjenje utrošene energije, $(1-P/P_s) \cdot 100$

L, [mm]	x, [mm]	$Re=10^4$					
		Zavojnica			Spiralna traka		
		A [%]	B [%]	C [%]	A [%]	B [%]	C [%]
1200	321	14,41	18,28	33,22	12,55	16,26	29,87
	836	13,62	17,43	31,82	17,43	21,41	38,24
	1436	7,83	10,69	20,25	16,57	20,54	36,86
600	386	9,08	12,23	22,96	11,54	15,11	27,94
	986	8,02	10,93	20,66	17,30	21,29	38,05
	1586	2,70	3,92	7,68	14,79	18,69	33,89
300	386	8,42	11,42	21,54	13,60	17,41	31,78
	686	7,14	9,82	18,68	17,18	21,17	37,86
	986	7,48	10,26	19,46	20,82	24,70	43,29
	1286	5,15	7,25	13,98	14,60	18,49	33,56
	1586	2,07	3,03	5,97	15,49	19,43	35,08
	1886	0,22	0,33	0,66	9,33	12,52	23,48
	2186	-1,75	-2,68	-5,43	7,87	10,74	20,33

L, [mm]	x, [mm]	$Re=1,5 \cdot 10^4$					
		Zavojnica			Spiralna traka		
		A [%]	B [%]	C [%]	A [%]	B [%]	C [%]
1200	321	9,68	12,94	24,21	8,10	11,03	20,84
	836	9,62	12,87	24,08	15,62	19,56	35,29
	1436	5,43	7,63	14,68	14,68	18,57	33,69
600	386	6,48	8,99	17,17	8,48	11,50	21,67
	986	4,71	6,67	12,89	15,95	19,91	35,86
	1586	0,73	1,08	2,14	12,23	15,89	29,26
300	386	6,79	9,38	17,88	9,81	13,10	24,48
	686	5,75	8,05	15,45	16,65	20,63	37,00
	986	6,41	8,90	17,01	21,61	25,43	44,40
	1286	3,58	5,14	10,02	15,05	18,97	34,34
	1586	1,70	2,49	4,93	14,28	18,14	33,00
	1886	0,44	0,66	1,32	9,55	12,79	23,95
	2186	-2,90	-4,51	-9,23	8,98	12,10	22,74



Ilustracija 5. $(\alpha_A)/(\alpha_S A_S)$ versus x kod $Re=1,5 \cdot 10^4$, $Pr = 0,7$

Najučinkovitija zavojnica od svih ispitanih zavojnica je ona duljine $L=1200$ mm na poziciji $x=321$ mm kod $Re=10^4$. Ta zavojnica je također učinkovitija od spiralne trake iste duljine na istoj poziciji. Spiralna traka duljine $L=1200$ mm je učinkovitija od zavojnice na poziciji $x=836$ mm. Vidljivo je da kod ispitanih zavojnica učinkovitost opada s povećanjem pozicije x , ali to nije tako i kod spiralskih traka. Spiralske trake ispitane u ovom radu postižu najveću učinkovitost na pozicijama $x=836$ i 986 mm.

Zavojnice duljine $L=300$ mm umetnute na početak cijevi $x=2186$ mm pokazuju najmanju učinkovitost.

ZAKLJUČAK

Usporedba efikasnosti turbulatora u obliku zavojnice i spiralnih traka provedena je na osnovu eksperimentalnih rezultata. Zaključci se mogu sažeti kako slijedi:

- Sve zavojnice imaju veći omjer koeficijenata trenja ξ/ξ_s od spiralnih traka istih duljina.
- Zavojnice duljina $L=1200$ i 600 mm osiguravaju veći omjer povećanja prijelaza topline Nu/Nu_s od spiralnih traka istih duljina. Samo na određenoj poziciji spiralne trake duljine $L=300$ mm osiguravaju veći omjer povećanja prijelaza topline Nu/Nu_s od zavojnica iste duljine.
- Za zavojnice uvijek vrijedi da je $Nu/Nu_s < \xi/\xi_s$. Najučinkovitiji odnos između povećanja prijelaza topline i koeficijenta trenja $Nu/Nu_s > \xi/\xi_s$ dobiven je samo kod spiralne trake duljine $L=300$ mm kod $Re=10^4$ na pozicijama $x=386, 686, 986$ i 1286 mm i kod $Re=1,5 \cdot 10^4$ na pozicijama $x=686$ i 986 mm.
- Najučinkovitiji turbulator, između 26 ispitanih turbulatora, je spiralna traka duljine $L=300$ mm na poziciji $x=986$ mm.
- Da bi se postigla najveća učinkovitost, preporuča se umetnuti zavojnicu na kraj cijevi, a spiralnu traku na poziciju $x=836+986$ mm

NAZIVLJE

A	površina prijelaza topline, [m^2]
c_p	specifični toplinski kapacitet pri konstantom tlaku, [J/kgK]
d	promjer, [m]
d_w	promjer žice zavojnice, [m]
j	Colburn-ov faktor ($j=St Pr^{2/3}$), [-]
L	duljina turbulatora, [m]
m	maseni protok, [kg/s]
Nu	Nusselt-ov broj ($Nu=\alpha d/\lambda$), [-]
p_1	apsolutni tlak neposredno prije oštre prigušnice, [Pa]
Δp	pad tlaka, [Pa]
P	utrošena energija, [W]
Pr	Prandtl-ov broj ($Pr=\mu c_p/\lambda$), [-]
\dot{Q}	toplinski tok, [W]

Re	Reynolds-ov broj ($Re=w d/v$), [-]
s	korak turbulatora, [m]
St	Stanton-ov broj ($St=Nu/Re Pr$), [-]
t	debljina spiralne trake, [m]
T	temperatura, [°C]
T_1	temperatura zraka iza oštne prigušnice, [°C]
ΔT	razlika temperatura, [°C]
V_w	volumni protok vode, [l/h]
w	brzina, [m/s]
x	pozicija turbulatora u cijevi mjerena od stražnje strane, [mm]
α	koeficijent prijelaza topline, [W/m ² K]
λ	koeficijent toplinske vodljivosti, [W/mK]
μ	dinamički viskozitet, [Pa s]
ν	kinematički viskozitet, [m ² /s]
ρ	gustoća, [kg/m ³]
ξ	koeficijent trenja, [-]
ζ	lokalni koeficijent otpora, [-]

Indeksi

a	zrak
HE	izmjenjivač
i	unutarnji
ln	logaritamska srednja vrijednost
o	vanjski
O	mjerna prigušnica
S	glatka cijev
st	čelik
w	voda
1	ulaz
12	od ulaza do izlaza
2	izlaz

BIBLIOGRAFIJA

1. Webb, R. L., *Principles of enhanced heat transfer*, John Willey&Sons, 1994.
2. Ponweiser, K., Malinovec, M. and Linzer, W., Heat transfer and pressure drop in tubes equipped with coiled wire turbulence promoters, *In Proceedings of the 12th International Heat Transfer Conference*, Grenoble, France, Elsevier Verlag, pp. 129-134, 2002.
3. Malinovec, M. and Ponweiser, K., Wärmeübergang und Druckverlust in Glattrohren und Rohren mit Drahtwendel-Turbulatoren, *Fortschritt - Bericht VDI*, Reihe 19, Nummer 135, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2002.
4. *VDI-Wärmeatlas*, Berechnungsblätter für den Wärmeübergang, 8. Überarbeitete und erweiterte Auflage, S.Gb 3, Springer Verlag, 1997.

ISPARAVANJE RADNE TVARI U KOLEKTORU SOLARNE DIZALICE TOPLINE

Vladimir SOLDO
Tonko ČURKO

Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilišta u Zagrebu, Ivana Lučića 5, Zagreb
e-mail: vladimir.soldo@fsb.hr, tonko.curko@fsb.hr

SAŽETAK

U radu je dan proračun prijelaza topline u cijevi solarnog kolektora (isparivača) u kojem isparava radna tvar R134a. Ispitni sustav sastoji se od kompresora, pločastog kompaktnog kondenzatora freon-voda, elektronskog ekspanzijskog ventila i dva paralelno spojena neostakljena kolektora. Solarna dizalica topline s izravnim isparavanjem radne tvari u solarnom kolektoru koristi Sunčevu energiju i okolišnji zrak kao izvor topline isparivača.

Prijelaz topline pri dvofaznom strujanju radne tvari u horizontalnoj cijevi provodi se prema izrazima preuzetim iz VDI Wärmeatlas. Prati se utjecaj gustoće masenog protoka G ($\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$), gustoće toplinskog toka svedenog na unutarnju površinu cijevi q (W/m^2), te sadržaja pare x na koeficijent prijelaza topline u solarnom kolektoru dizalice topline.

Rezultati proračuna su pokazali da je u prvom dijelu isparivača-kolektora dominantno mješurasto isparavanje, dok u drugom dijelu isparivača, s porastom sadržaja pare, prevladava konvekcijsko isparavanje.

Ključne riječi: isparavanje, neostakljeni kolektor, solarna dizalica topline

1. UVOD

Energija Sunca može se koristiti kao izravni izvor topline za dizalice topline, ili u kombinaciji s drugim izvorima topline. Zrak, površinske vode i tlo kao izvor topline posredno koriste energiju Sunca. Osnovna prednost izravnog korištenja energije Sunca kao izvora energije za dizalice topline očituje se u višoj temperaturi isparavanja, te je time veći učinak isparivača nego kod drugih izvora topline, odnosno veći toplinski množitelj. U usporedbi s klasičnim kolektorskim sustavom, kod sustava koji uključuje dizalicu topline su učinkovitost kolektora i kapacitet uređaja veći, zahvaljujući nižoj temperaturi medija u solarnom kolektoru (do 30 °C).

Istraživanja i razvoj dizalica topline sa solarnim kolektorima idu u dva smjera: prema izravnim i posrednim sustavima. Kod izravnih sustava [1-4] radna tvar struji i isparava neposredno u solarnom kolektoru, koji služi kao isparivač. Sustav se obično sastoji od neostakljenih, pločastih solarnih kolektora s direktnom ekspanzijom radne tvari (R134a, R22, R12), kompresora te spremnika tople vode koji ima ulogu kondenzatora. Radna tvar u neostakljenom solarnom kolektoru osim što apsorbira sunčevu energiju izmjenjuje toplinu i s okolišnjim zrakom. Kod posrednih sustava kao prijenosnici energije u solarnom kolektoru služe voda ili zrak [5].

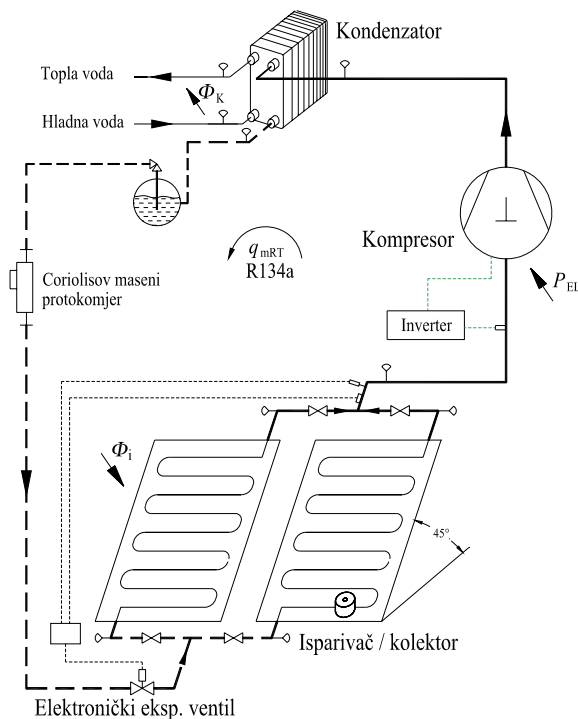
Analizu prijelaza topline u solarnom kolektoru kojim struji dvofazni medij (smjesa R134a i R123) dali su Aziz, Chaturvedi i Kheireddine [6]. Razvijeni simulacijski model dao je rezultate o koeficijentu prijelaza topline radne tvari u kolektoru u ovisnosti o sadržaju pare u kolektoru, za različite protoke radne tvari.

Korištenje neostakljenih kolektora omogućava rad dizalice topline i onda kada nema sunčana ozračenja ili kada je ono vrlo nisko, odnosno noću i za oblačna vremena, pri čemu temperatura i brzina zraka utječu na temperaturu isparavanja, odnosno na učinkovitost dizalice topline. Male vrijednosti toplinskog množitelja ($\varepsilon_g < 2$) pri niskim temperaturama isparavanja ($\vartheta_i < 0^\circ\text{C}$) mogu ugroziti ekonomsku opravdanost takvog načina proizvodnje toplinske energije.

Više o rezultatima rada solarne dizalice topline može se naći u prethodnim radovima autora ovog članka [7-8], tako da u ovom radu neće biti govora o parametrima rada dizalice topline sa solarnim kolektorima. U ovom radu dan je proračun prijelaza topline u isparivaču-kolektoru solarne dizalice topline u kojem direktno isparava rada tvar R134a.

2. ISPITNI SUSTAV

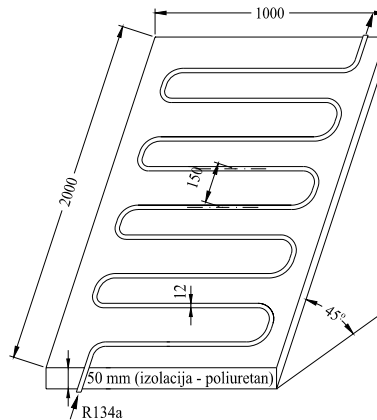
Ispitni sustav sa solarnom dizalicom topline s izravnim isparavanjem radne tvari u solarnom kolektoru izveden je u laboratoriju Fakulteta strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu (*ilustracija 1*). Osnovni elementi uređaja su poluhermetički stepni kompresor, kompaktni pločasti kondenzator freon-voda, elektronički ekspanzijski ventil i dva paralelno spojena neostakljena kolektora koji se koriste kao isparivač. Uređaj je opremljen instrumentima i osjetnicima za mjerenje svih relevantnih veličina (temperature, tlaka, protoka, ozračenja, električne snage), te je spojen na sustav za njihovo pohranjivanje i obradu.



Ilustracija 1. Shematski prikaz ispitnog sustava

3. MATEMATIČKI MODEL

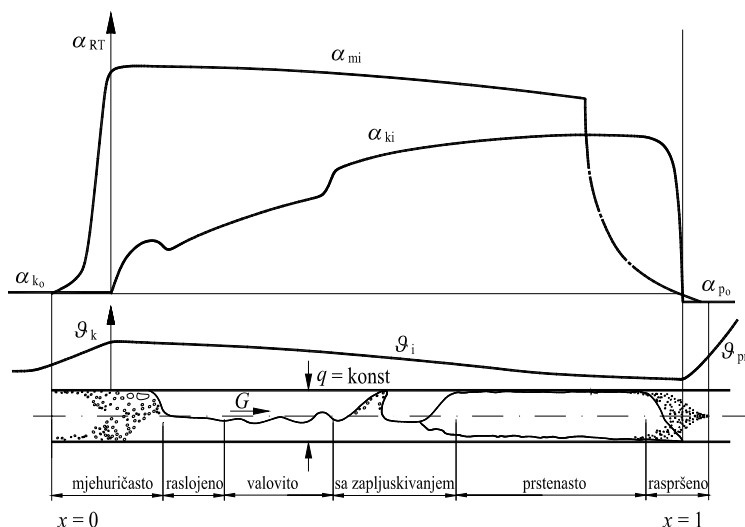
Prijelaz topline pri dvofaznom strujanju u cijevima predstavlja predmet brojnih istraživanja koja su prikazana u preglednim radovima kao što su [9-11], gdje su dane korelacije dobivene na temelju mjerenja. Vrlo detaljan pregled literature i opis postupka za proračun koeficijenta prijelaza topline dan je u VDI Wärmeatlasu [12]. Korelacije iz [12] su uzete za proračun koeficijenta prijelaza topline za slučaj isparavanja radne tvari u horizontalnoj cijevi.



Ilustracija 2. Shematski prikaz kolektora (isparivača)

Ukupni koeficijent prijelaza topline u horizontalnoj glatkoj cijevi pri dvofaznom toku je superpozicija koeficijenta prijelaza topline za konvekcijsko (α_{ki}) i mjehuričasto isparavanje (α_{mi}), *ilustracija 3*, [12]:

$$\alpha_{RT} = \sqrt[3]{\alpha_{ki}^3 + \alpha_{mi}^3} \quad (1)$$



Ilustracija 3. Režimi strujanja duž horizontalne cijevi, [12]

Koeficijent prijelaza topline pri isparavanju radne tvari u cijevi ovisi o gustoći masenog protoka G ($\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$), gustoći toplinskog toka svedenoj na unutarnju površinu cijevi q (W/m^2), unutarnjem promjeru cijevi d_u (m), hrapavosti površine R_a (μm), fizikalnim svojstvima kapljevite i parovite faze radne tvari, kao i o sadržaju pare x .

Za horizontalnu cijev vrijedi slijedeći izraz za koeficijent α_{ki} [12]:

$$\frac{\alpha_{ki}}{\alpha_{k_o}} = \left\{ (1-x)^{0,01} \left[(1-x) + 1,2x^{0,4} \left(\frac{\rho_k}{\rho_p} \right)^{0,37} \right]^{-2,2} + x^{0,01} \left[\frac{\alpha_{p_o}}{\alpha_{k_o}} \left(1 + 8(1-x)^{0,7} \left(\frac{\rho_k}{\rho_p} \right)^{0,67} \right) \right]^{-2} \right\}^{-0,5}, \quad (2)$$

u kojem α_{k_o} i α_{p_o} predstavljaju koeficijente prijelaza topline za slučaj da radna tvar, čija je gustoća masenog toka G , struji samo kao kapljevina, odnosno samo kao para.

Koeficijent prijelaza topline pri mjehuričastom vrenju radne tvari koja struji kroz cijev određuje se izrazom:

$$\frac{\alpha_{mi}}{\alpha_o} = C_F \left(\frac{q}{q_o} \right)^n F(p^*) F(d) F(W) F(G, x) \quad (3)$$

Utjecaj molne mase radne tvari izražen je značajkom C_F :

$$C_F = 0,789 \left(\frac{M}{M_{H_2}} \right)^{0,11} \quad (4)$$

pri čemu je M_{H_2} molna masa vodika.

Utjecaj gustoće toplinskog toka sadržan je u članu $\left(\frac{q}{q_o} \right)^n$ pri čemu je:

$$n = 0,8 - 0,13 \cdot 10^{(0,66p^*)} \quad (5)$$

Utjecaj tlaka isparavanja izražen je funkcijom $F(p^*)$ pri čemu je p^* omjer tlaka isparavanja i kritičnog tlaka za radnu tvar:

$$p^* = \frac{p_e}{p_{krit}} \quad (6)$$

Funkcija $F(d) = (d_o/d)^{0,5}$ izražava utjecaj promjera cijevi, a funkcija $F(W) = (R_a/R_{a0})^{0,33}$ utjecaj hrapavosti na prijelaz topline, dok funkcija $F(G, x)$ daje utjecaj gustoće masenog toka i sadržaja pare na prijelaz topline:

$$F(G, x) = \left(\frac{G}{G_o} \right)^{0,25} \left[1 - p^{*0,1} \left(\frac{q}{q_{kr,B}} \right)^{0,3} x \right], \quad (7)$$

pri čemu se kritična gustoća toplinskog toka računa prema izrazima:

$$q_{kr,B} = 2,79 q_{kr,k_0} p^{*0,4} (1 - p^*) \quad (8)$$

$$q_{kr,k_0} = 0,13 \Delta h_{p_0} \rho_{p_0}^{0,5} \left(\sigma_0 g (\rho_{k_0} - \rho_{p_0}) \right)^{0,25} \quad (9)$$

Konačni izraz za izračunavanje koeficijenta prijelaza topline pri mjehuričastom vrenju se dobiva u obliku:

$$\frac{\alpha_{mi}}{\alpha_0} = C_F \left(\frac{q}{q_0} \right)^n \left[2,692 p^{*0,43} + \frac{1,6 p^{*6,5}}{1 - p^{*4,4}} \right] \left(\frac{d_0}{d} \right)^{0,5} \left(\frac{R_a}{R_{a0}} \right)^{0,33} \left(\frac{G}{G_0} \right)^{0,25} \left[1 - p^{*0,1} \left(\frac{q}{q_{kr,B}} \right)^{0,3} \right] x \quad (10)$$

Normirana vrijednost $\alpha_0 = 3500 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ dobivena je za koeficijent prijelaza topline kod vrenja u mediju koji miruje. Normirane vrijednosti utjecajnih parametara su:

$$q_0 = 20000 \text{ W}/\text{m}^2, \quad d_0 = 0,01 \text{ m}, \quad R_{a0} = 1 \mu\text{m}, \quad G_0 = 100 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s}) \quad [12].$$

Koeficijent prijelaza topline pri strujanju jednofaznog fluida

Koeficijent prijelaza topline u cijevi za slučajeve da radna tvar struji kao čista kapljevina, α_{k_0} , odnosno kao čista para α_{p_0} , mogu se prema [12] izračunati korištenjem izraza Gnielinskog:

$$\text{Nu} = \frac{\frac{\xi}{8} (\text{Re} - 1000) \text{Pr}}{1 + 12,7 \sqrt{\frac{\xi}{8} (\text{Pr}^{2/3} - 1)}} \left\{ 1 + \left(\frac{d_u}{L} \right)^{2/3} \right\} \left(\frac{\text{Pr}}{\text{Pr}_s} \right)^{0,11}, \quad \left(\frac{\text{Pr}}{\text{Pr}_s} \right)^{0,11} \approx 1 \quad (11)$$

Faktor trenja ξ definiran je izrazom:

$$\xi = (1,82 \log_{10} \text{Re} - 1,64)^{-2} \quad (12)$$

Izraz (12) vrijedi za $2300 < \text{Re} = \frac{w d_u}{\nu} < 10^6$ i $\frac{d_u}{L} \ll 1$.

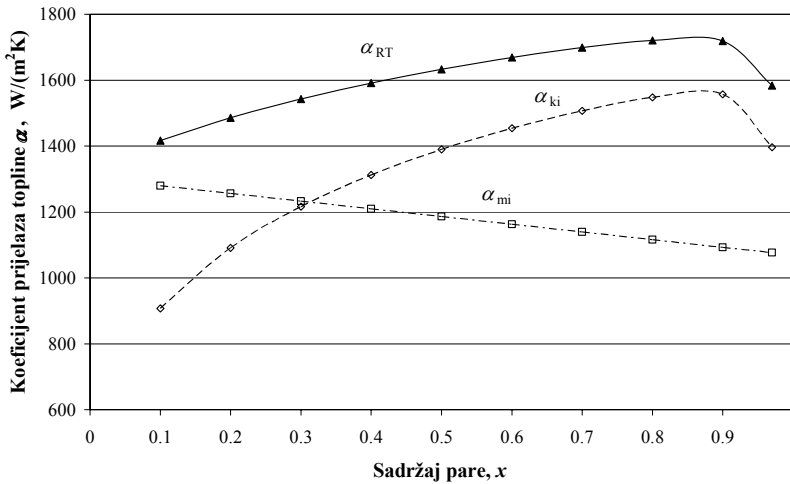
Koeficijent prijelaza topline je tada:

$$\alpha = \frac{\text{Nu} \lambda}{d_u} \quad (13)$$

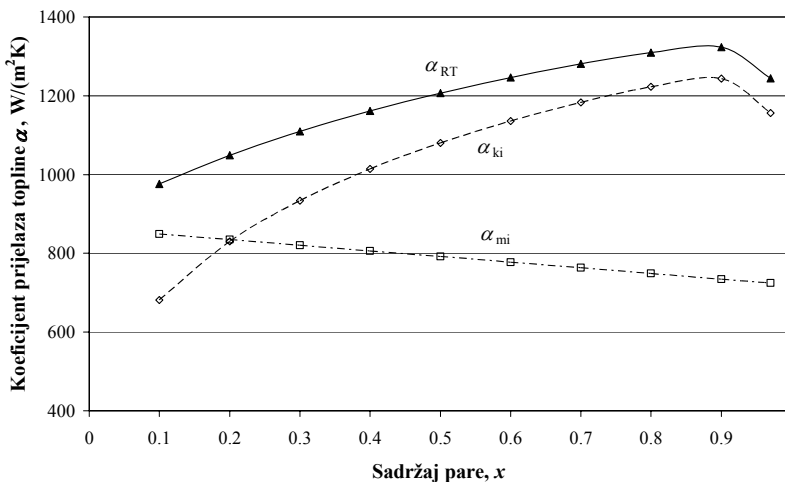
Navedeni izrazi (1 do 13) omogućuju određivanje koeficijenata prijelaza topline α_{ki} i α_{mi} , kao i njihov tok duž isparivačke cijevi u odnosu na sadržaj pare x.

4. REZULTATI

Ovisnost koeficijenta prijelaza topline u isparivaču (solarnom kolektoru) o sadržaju pare prikazana je na *ilustraciji 4*. Podaci vrijede za gustoću masenog protoka $G = 108 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$, gustoću toplinskog toka svedenoj na unutarnju površinu cijevi $q = 2500 \text{ W}/\text{m}^2$, unutarnji promjer cijevi kolektora $d_u = 10 \text{ mm}$ i hrapavosti površine $R_a = 0,6 \text{ }\mu\text{m}$. Ukupni koeficijent prijelaza topline α_{RT} (izraz 1) dobiven je superponiranjem koeficijenata prijelaza topline za konvekcijsko α_{ki} (izraz 2) i mjehuričasto α_{mi} (izraz 10) isparavanje [12]. U prvom dijelu isparivača dominantno je mjehuričasto isparavanje, dok u drugom dijelu isparivača, s porastom sadržaja pare, prevladava konvekcijsko isparavanje.



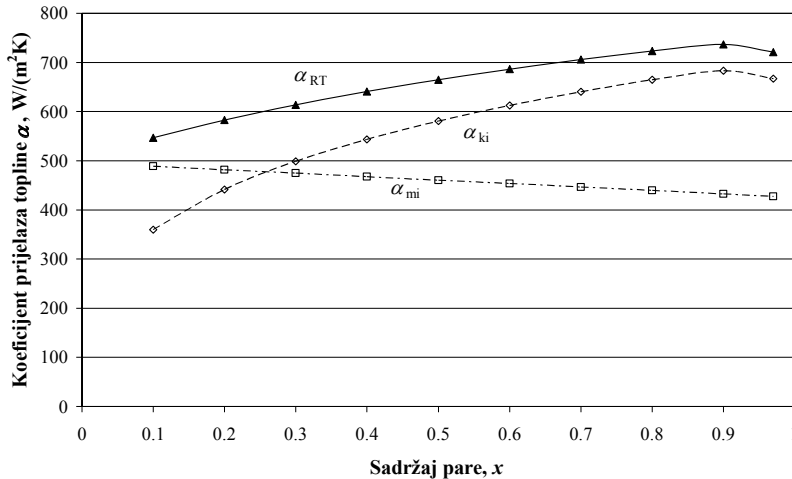
Ilustracija 4. Koeficijent prijelaza topline u isparivaču kao funkcija sadržaja pare, $G = 108 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$, $q = 2500 \text{ W}/\text{m}^2$, $I_{T\Sigma} = 979 \text{ W}/\text{m}^2$, $\vartheta_1 = 21,6 \text{ }^\circ\text{C}$, $\varepsilon_g = 5,86$, $\eta_k = 0,7$



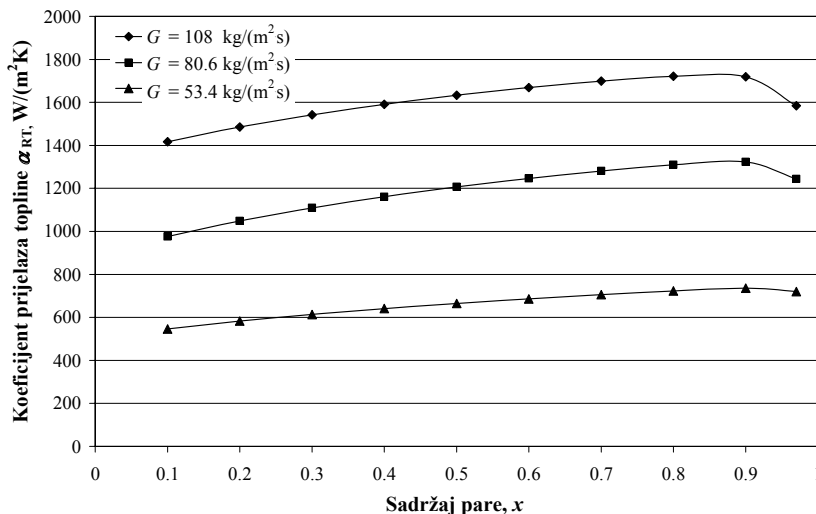
Ilustracija 5. Koeficijent prijelaza topline u isparivaču kao funkcija sadržaja pare, $G = 80,6 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$, $q = 2000 \text{ W}/\text{m}^2$, $I_{T\Sigma} = 610 \text{ W}/\text{m}^2$, $\vartheta_1 = 8,6 \text{ }^\circ\text{C}$, $\varepsilon_g = 4,7$, $\eta_k = 0,86$

Na ilustracijama 5. i 6. su dani koeficijenti prijelaza topline za vrijednosti gustoće masenog protoka $G = 80,6 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$ i $G = 53,4 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$. S padom gustoće masenog protoka pada koeficijent prijelaza topline, što se najbolje može uočiti na zbirnom prikazu koeficijenata prijelaza topline danom ilustracijom 7.

Također se jasno uočava smanjenje ukupnog koeficijenta prijelaza topline s nastupanjem raspršenog strujanja ($x > 0,9$).



Ilustracija 6. Koeficijent prijelaza topline u isparivaču kao funkcija sadržaja pare, $G = 53,4 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$, $q = 1200 \text{ W}/\text{m}^2$, $I_{T\Sigma} = 134 \text{ W}/\text{m}^2$, $\vartheta_1 = 1,5 \text{ }^\circ\text{C}$, $\varepsilon_g = 3,3$



Ilustracija 7. Koeficijent prijelaza topline u isparivaču za različite gustoće masenog protoka

Rezultati o ukupnom koeficijentu prijelaza topline u solarnom kolektoru u kojem isparava radna tvar (ilustracija 7.) usporedivi su s rezultatima prema [6]. Aziz, Chaturvedi i Kheireddine su dobili vrijednosti koeficijenta prijelaza topline od 1300 do 2800 $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ za gustoću masenog protoka $127 \text{ kg}/\text{m}^2\text{s}$ ($q_{mRT} = 0,01 \text{ kg/s}$), ovisno o sadržaju pare. Na ilustraciji

7. za gustoću masenog protoka od $108 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$, koeficijent varira od 1400 do $1770 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Razlike su posljedica korištenja različitog modela prijelaza topline, ali i u primjeni različitih radnih tvari.

Treba naglasiti da se tok koeficijenta prijelaza topline za konvekcijsko (α_{ki}) i mjehuričasto isparavanje (α_{mi}) duž cijevi isparivača dobiven u ovom radu, u potpunosti slaže s kvalitativnim prikazom koeficijenata prijelaza topline α_{ki} i α_{mi} prikazanih u knjizi autora Granryda [10].

5. ZAKLJUČAK

U ovom radu dana je analiza prijelaza topline u isparivaču jednog manje istraženog i primijenjenog tipa dizalice topline. Solarna dizalica topline s izravnim isparavanjem radne tvari R134a u solarnom kolektoru koristi Sunčevu energiju i okolišnji zrak kao izvor topline na isparivaču.

Ukupni koeficijent prijelaza topline za slučaj isparavanja radne tvari u horizontalnoj cijevi dobije se superponiranjem koeficijenta prijelaza topline za konvekcijsko i mjehuričasto isparavanje. U prvom dijelu isparivača prevladava mjehuričasto isparavanje, dok je u drugom dijelu isparivača naglašeno konvektivno isparavanje. Za veće gustoće masenog protoka radne tvari, raste koeficijent prijelaza topline.

Pri visokim sadržajima para ($x > 0,9$), kada je volumetrijski sadržaj kapljevine mali i kada se preostala kapljevina nalazi u struji pare u obliku magle dolazi do raspršenog strujanja, te se uočava nagli pad koeficijenta prijelaza topline na izlazu iz isparivača.

Podudarnost između rezultata dobivenih u ovom radu i rezultata koji se mogu naći u literaturi potvrđuje da je izbor modela za proračun prijelaza topline pri isparavanju radne tvari u horizontalnoj cijevi dobar.

POPIS OZNAKA

Latinička slova

A_{kol}	- površina kolektora	$[\text{m}^2]$
c_p	- specifični toplinski kapacitet	$[\text{J}/(\text{kgK})]$
d	- promjer	$[\text{m}]$
g	- ubrzanje sile teže	$[\text{m}/\text{s}^2]$
G	- gustoća masenog protoka	$[\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})]$
h	- specifična entalpija	$[\text{J}/\text{kg}]$
$I_{T\Sigma}$	- ukupno ozračenje na nagnutu površinu	$[\text{W}/\text{m}^2]$
L	- duljina cijevi kolektora	$[\text{m}]$
M	- molna masa	$[\text{kg}/\text{kmol}]$
p	- tlak	$[\text{Pa}]$
p^*	- omjer tlakova	$[-]$
P_{EL}	- električna snaga kompresora	$[\text{W}]$
q	- gustoća toplinskog toka	$[\text{W}/\text{m}^2]$
R_a	- hrapavost površine	$[\mu\text{m}]$
q_m	- maseni protok	$[\text{kg}/\text{s}]$
w	- brzina	$[\text{m}/\text{s}]$
x	- sadržaj pare	$[\text{kg}/\text{kg}]$

Grčka slova

α	- koeficijent prijelaza topline	$[\text{W}/(\text{m}^2\text{K})]$
α_{ki}	- koeficijent prijelaza topline za konvekcijsko isparavanje	$[\text{W}/(\text{m}^2\text{K})]$

α_{mi}	- koeficijent prijelaza topline za mjehuričasto isparavanje	[W/(m ² K)]
$\varepsilon_g = \Phi_K/P_{EL}$	- toplinski množitelj	[-]
η_{kol}	- učinkovitost kolektora	[-]
η	- dinamička viskoznost	[Pa s]
ϑ	- temperatura	[°C]
ϑ_i	- temperatura isparavanja	[°C]
ϑ_K	- temperatura kondenzacije	[°C]
λ	- koeficijent toplinske vodljivosti	[W/(m K)]
ν	- kinematička viskoznost	[m ² /s]
ξ	- faktor trenja	[-]
ρ	- gustoća	[kg/m ³]
σ	- površinska napetost	[N/m]
Φ_i	- učinak isparivača	[W]
Φ_K	- učinak kondenzatora	[W]

Bezdimenzijske značajke

$Nu = \alpha d_u/\lambda$	- Nusseltov broj
$Pr = \eta c_p/\lambda$	- Prandtllov broj
$Re = w d_u/\nu$	- Reynoldsov broj

LITERATURA

1. Kuang, Y.H., Sumathy, K., Wang, R.Z., *Study on a direct-expansion solar-assisted heat pump water heating system*, International Journal of Energy Research 27, 531-548, 2003.
2. Huang, B.J., Chyng, J.P., *Performance characteristics of integral type solar-assisted heat pump*, Solar Energy, Vol. 71, No. 6, pp. 403-414, 2001.
3. Hawlader, M.N.A., Chou, S.K., Ullah, M.Z., *The performance of a solar assisted heat pump water heating system*, Applied Thermal Engineering 21, pp. 1049-1065, 2001.
4. Ito, S., Miura, N., Wang, K., *Performance of a heat pump using direct expansion solar collectors*, Solar Energy, Vol. 65, No. 3, pp. 189-196, 1999.
5. Yumrutas, R., Kaska, O., *Experimental investigation of thermal performance of a solar assisted heat pump system with an energy storage*, International Journal of Energy Research, Vol. 28, pp. 163-175, 2004.
6. Aziz, W., Chaturvedi, S.K., Kheireddine, A., *Thermodynamic analysis of two-component, two-phase flow in solar collectors with application to a direct-expansion solar-assisted heat pump*, Energy 24, pp. 247-259, 1999.
7. Soldo, V., Čurko, T., Grozdek, M., *Experimental and analytical results of the solar-assisted heat pump performance*, Proceedings of VII SDHK Conference: Hlajenje in klimatizacija, pp. 159-170, Laško, Slovenija, 2004.
8. Soldo, V., Čurko, T., Balen, I., *Thermal performance of a direct expansion solar assisted heat pump*, Proceedings of the 2004 International Refrigeration and air Conditioning Conference at Purdue, Vol. 1, No. R081, West Lafayette, USA, 2004.
9. Kuntha, U., Kiatsiriroat, T., *Boiling heat transfer coefficient of R22 refrigerant and its alternatives in horizontal tube: small refrigerator scale*, Songklanakarin Journal of Science and Technology, 24 (2), pp. 243-253, 2002.
10. Granryd, E., *Introduction to refrigerating engineering*, Part I, Royal Institute of Technology, Stockholm, 2002.
11. Rohlin, P., *Zeotropic Refrigerant Mixtures in Systems and in Flow Boiling*, Royal Institute of Technology, Stockholm, 1996.
12. VDI - Wärmearbeitsatlas, 8. Auflage, Düsseldorf, 1997.

Verifikacija jednodimenzijskog numeričkog modela provođenja topline u ljudskom tkivu uz pomoć termografije

Srećko Švaić, prof.dr.sc.
Fakultet strojarstva i brodogradnje
Ivana Lučića 5, 10 000 Zagreb
Tel, fax: 01/6168-146
srecko.svaic@fsb.hr

Ivanka Boras, doc.dr.sc.
Fakultet strojarstva i brodogradnje
Ivana Lučića 5, 10 000 Zagreb
Tel: 01/6168-429
ivanka.boras@fsb.hr

Mirela Suša, dipl.inž.
Fakultet strojarstva i brodogradnje
Ivana Lučića 5, 10 000 Zagreb
Tel: 01/6168-510
mirela.susa@fsb.hr

SAŽETAK

U radu su prikazani rezultati dobiveni simulacijom provođenja topline kroz tkivo nadlaktice čovjeka uz postojanje toplinskih izvora, korištenjem jednodimenzijskog numeričkog modela i podataka dobivenih eksperimentom. U modelu je korištena metoda kontrolnih volumena, a kao rubni uvjeti dani su temperatura na površini kože i toplinski gubici s površine kože prema okolini. Toplinska svojstva tkiva preuzeta su iz odgovarajuće literature. Temperaturna razdioba na površini kože nadlaktice mjerena je u kontroliranim uvjetima u ispitnoj prostoriji pri zadanim temperaturama zraka. Rezultati dobiveni simulacijom uspoređeni su s podacima danima u literaturi [1]. Raspodjela temperature po presjeku nadlaktice dobivena simulacijom dana je dijagramom, a rezultati mjerenja temperatura površine kože promatranog subjekta prikazani su snimljenim termogramima.

KLJUČNE RIJEČI

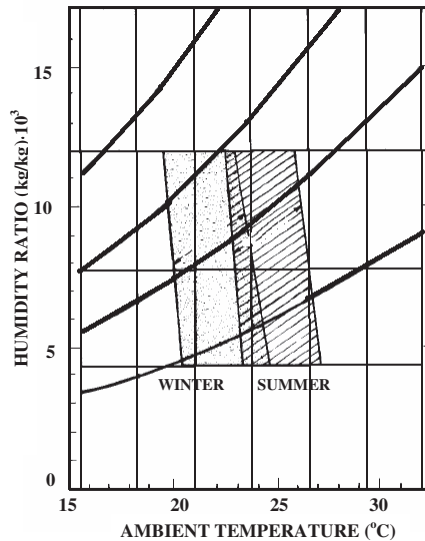
numeričko modeliranje, provođenje topline, termografija, ljudsko tkivo

1. UVOD

Stanje toplinske ugone kod čovjeka, uvjetovano je brojnim parametrima, među kojima prije svega temperaturom i vlažnošću zraka, brzinom strujanja zraka i njegovom kvalitetom, temperaturom okolišnih predmeta te fizičkom aktivnošću. Reakcije tijela na pojedine uvjete u kojima se nalazi, mogu se podijeliti u dvije skupine: aktivne i pasivne reakcije. U aktivne reakcije ubrajaju se one svjesne, primjerice odijevanje ili razodijevanje, te one nesvjesne, poput znojenja ili drhtanja. S druge strane, pasivne reakcije tijela predstavljaju izmjenu topline s okolišem kao posljedicu temperaturnih razlika između tijela i okoline te sukladno tome ovise o uvjetima u kojima se prijenos topline između tijela i okoline odvija. Toplinska neravnoteža između tijela i njegove okoline rezultirat će promjenom temperature tijela, odnosno, ovisno o uvjetima, njenim sniženjem, u slučaju kada je toplina koja se u tijelu generira manja od topline koja se predaje okolišu, ili povišenjem, u slučaju da se sva toplina koje se u tijelu generira ne uspijeva predati okolišu. Oba slučaja mogu u svojim ekstremima dovesti do stanja opasnih po život.

Dijagramom 1. prikazano je područje toplinske ugone za odjevenog čovjeka u sjedećem položaju u ovisnosti o temperaturi i vlažnosti zraka. Pri tom srednja temperatura zračenja odgovara temperaturi suhog termometra, dok koeficijent toplinske vodljivosti odjeće iznosi $10.8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Unutar područja toplinske ugone, čovjekov termoregulacijski sustav u mogućnosti je uz pomoć različitih mehanizama regulirati odavanje topline prema okolini i na taj način održavati tjelesnu temperaturu u normalnom rasponu. U slučaju potrebe za povećanim odavanjem topline, krvožilni sustav reagira povećanjem protoka krvi prema površini kože a time i povećanim odvanjem topline prema okolišu. U određenom trenutku dolazi do aktivacije i mehanizma znojenja koje vrlo efikasno, ishlapljivanjem, osigurava odvođenje viška topline iz tijela. Nasuprot tome, u slučaju kada tijelu prijeti opasnost od sniženja temperature, osim suženja krvnih žila a time i smanjenog dotoka krvi prema površini kože, javlja se i drhtanje, kojem je osnovni cilj grčenjem i opuštanjem mišića osigurati dodatnu proizvodnju topline.

Cilj rada bio je razviti numerički model kojim bi se mogla odrediti temperaturna raspodjela u ljudskom tkivu. Rubni uvjeti dobiveni su termografskim mjerenjima u kontroliranim vanjskim uvjetima.



Slika 1 Dijagramski prikaz parametara toplinske ugone za čovjeka koji mirno sjedi, pri čemu je temperatura objekata s kojima izmjenjuje toplinu zračenjem jednaka temperaturi suhog termometra, a toplinska provodnost kroz odjeću iznosi $10,8 \text{ W/m}^2\text{K}$ (ASHRAE, 1981.) [1]

2. TOPLINSKA RAVNOTEŽA

Termoregulacijski sustav ljudskog tijela ima zadatak održavati čovjekovu tjelesnu temperaturu stalnom. Energija koja se u organizam unosi hranom, pretvara se u mehanički rad i toplinu. Ukupna energija koja se u jedinici vremena oslobađa u ljudskom tijelu procesima oksidacije naziva se metaboličkom aktivnošću (M). Oslobođena toplina od tijela se okolini predaje pomoću dva mehanizma izmjene, i to izmjenom mase (Q_m) preko znojenja i disanja, i izmjenom topline (Q_h) konvekcijom, kondukcijom i zračenjem. Toplinska bilanca ljudskog tijela može se na osnovi rečenog zapisati u obliku:

$$M - W - Q_m - Q_h = 0 \quad (1)$$

ili svedeno na jedinicu površine ljudskog tijela:

$$\frac{M}{A} \cdot (1 - \eta) - q_m - q_h = 0 \quad (2)$$

Tablicom 1. [2] dane su različite vrijednosti metaboličkog toka (W/m^2) i specifični rad η u ovisnosti o aktivnosti tijela. Iz ovih podataka i prosječne površine ljudskog tijela od $1,77 \text{ m}^2$ slijedi da intenzitet metaboličke aktivnosti kod igranja tenisa iznosi:

$$M = 270 \cdot 1,77 = 478 \text{ W}$$

od čega 48 W se odnosi na mehanički rad, a 430 W na izmjenu topline s okolišem ($\eta = 0,1$).

Tablica 1.

Aktivnost	M/A (W/m^2)	η
Spavanje	40	0
Mirno sjedenje	60	0
Upravljanje automobilom	60	0
Tipkanje	70	0
Hodanje po ravnini pri 4,8 km/h	150	0
Kućanski poslovi čišćenja	120-200	0 - 0,1
Prenošenje tereta od 50 kg	230	0,2
Igranje tenisa	270	0 - 0,1

3. MJERENJA I ANALIZA DOBIVENIH PODATAKA

Mjerenja temperature površine kože nadlaktice vršena su u klimatiziranom prostoru komore Laboratorija za toplinu i toplinske uređaje Fakulteta strojarstva i brodogradnje, pri različitim temperaturama zraka prostorije.

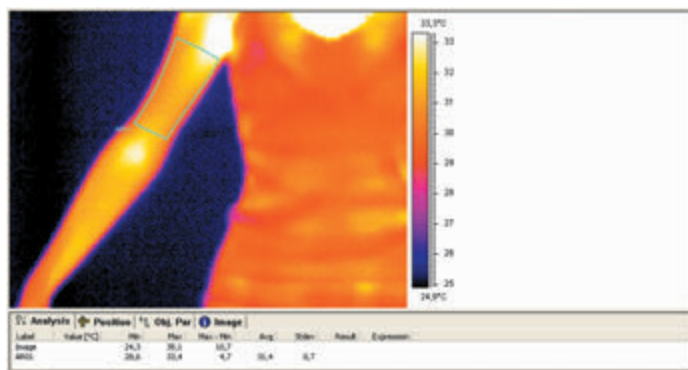
Mjerenje je obavljeno uz pomoć termografskog sustava ThermaCAM SC2000. Osnovne su karakteristike ovog sustava date u tablici 2.

Tablica 2

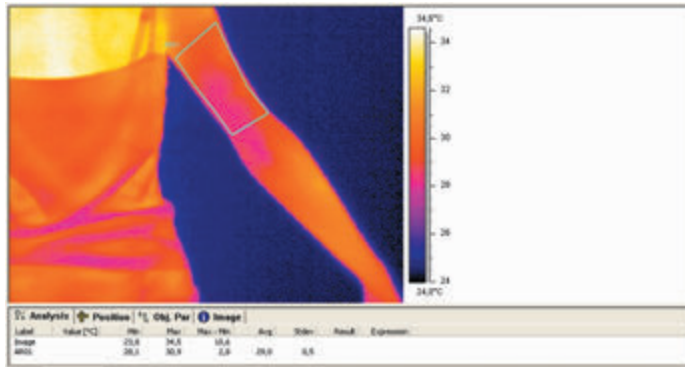
Točnost	+/- 2 %
Osjetljivost	0,08 °C kod 30 °C
Vidno polje	24 ° x 18 ° / 0,5m
Detektor	FPA 320 x 240 piksela (nehlađeni bolometar)
Područje osjetljivosti	7,5 – 13 mikrona
Spremanje slike	u realnom vremenu, 14 bitni digitalni zapis
Temperaturna područja	mjerna - 40 °C – 120 °C 0 °C – 500 °C 350 °C – 1500 °C

Subjekt je do trenutka snimanja termograma boravio u komori s mirujućim zrakom najmanje sat vremena od trenutka uspostavljanja zadane temperature zraka, kako bi se postiglo stacionarno stanje.

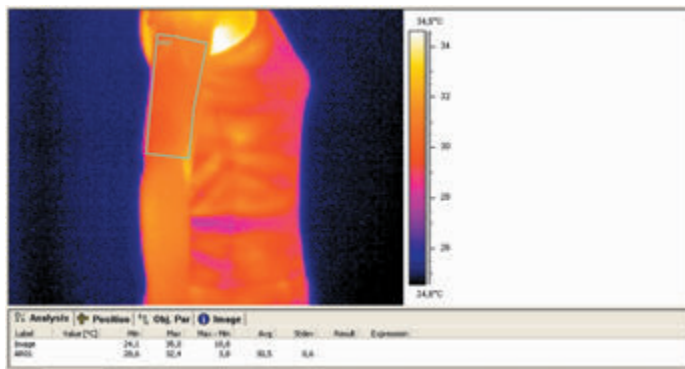
Snimke su napravljene s udaljenosti od 1 metra, uz temperature zraka od 18°C, 22°C, 25°C i 28°C, relativnu vlažnost 20% i emisijski faktor kože $\varepsilon = 0,97$ [7]. Podaci o temperaturama kože pri temperaturama okoliša između prethodno navedenih vrijednosti, dobiveni su grafičkom interpolacijom, a za temperature okoliša 31°C i 32°C ekstrapolacijom mjerenja.



Slika 2 Termogram prednjeg dijela podlaktice s analizom



Slika 3 Termogram stražnjeg dijela podlaktice s analizom



Slika 4 Termogram bočnog dijela podlaktice s analizom

4. NUMERIČKI MODEL

Numerički model bazira se na metodi kontrolnih volumena. Odabran je cilindrični koordinatni sustav u kojem je pretpostavljena nadlaktica u obliku cilindra vanjskog promjera 100 mm. Model, prikazan slikom 5., ima četiri sloja, s vanjskim radijusima: jezgre 28 mm, mišićnog tkiva 44 mm, masnog tkiva 48 mm te kože 50 mm. Koefijenti toplinske vodljivosti uzeti su prema [1] i iznose: $\lambda = 0,418 \text{ W/(mK)}$ za jezgru i mišićno tkivo, te $\lambda = 0,334 \text{ W/(mK)}$ za masno tkivo i kožu. Jednodimenzijski stacionarni model provođenja topline ima 18 kontrolnih volumena svaki debljine $\Delta r = 2 \text{ mm}$. Izvorni član jednake izdašnosti dodan je u svaki od kontrolnih volumena pojedinog sloja, a predstavlja toplinu transportiranu putem krvi i metaboličku aktivnost. Mreža kontrolnih volumena prikazana je slikom 6.

Rubni vjeti

Pretpostavljena tražena temperatura jezgre $t_c = 35,53 \text{ }^\circ\text{C}$ at $r = 14 \text{ mm}$

Koeficijenti prijelaza topline

Zračenjem: $h_r = 4,2 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$

Konvekcijom: $h_h = 2,1 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$

Bazalni gubici evaporacijom $q_e = 5,52 \text{ W}/\text{m}^2$

Omjer bazalnog oslobađanja topline za pojedini sloja tkiva u odnosu na jezgru

$n_c = 1$

$n_m = 0,8988$

$n_f = 0,5941$

$n_s = 0,8534$

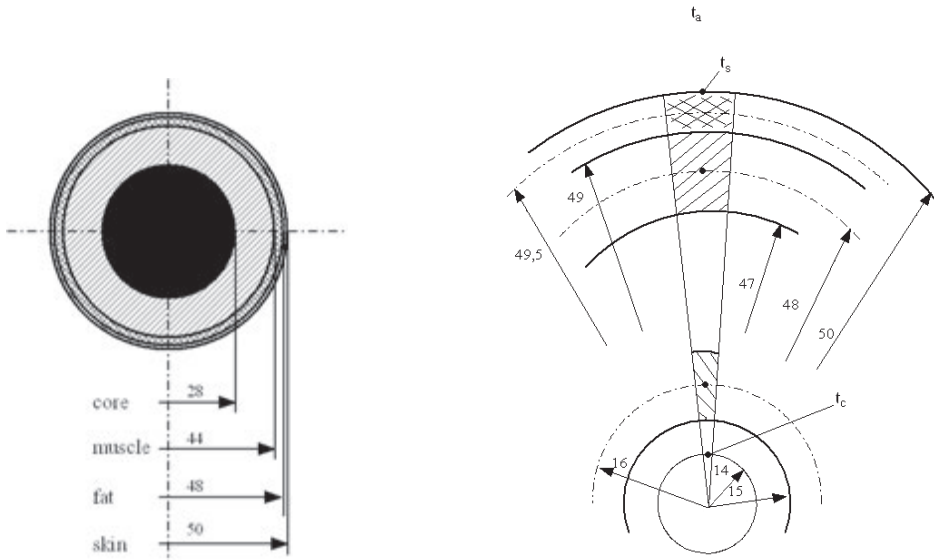
Površinska temperatura kože, t_s , dobivena je iz termograma.

Toplinski gubici s površine kože:

$$Q_r = h_r \cdot A_s \cdot (t_s - t_a) \quad (3)$$

$$Q_h = h_h \cdot A_s \cdot (t_s - t_a) \quad (4)$$

$$Q_e = q_e \cdot A_s \quad (5)$$



Slika 5 Poprečni presjek nadlaktice

Slika 6 Mreža kontrolnih volumena

Toplinska ravnoteža

U stacionarnom stanju, toplinski gubici s površine promatranog segmenta jednaki su ukupno oslobođenoj toplini u volumenu danog segmenta:

$$Q_r + Q_h + Q_e = Q_c + Q_m + Q_f + Q_s \quad (6)$$

gdje se indeksi odnose na:

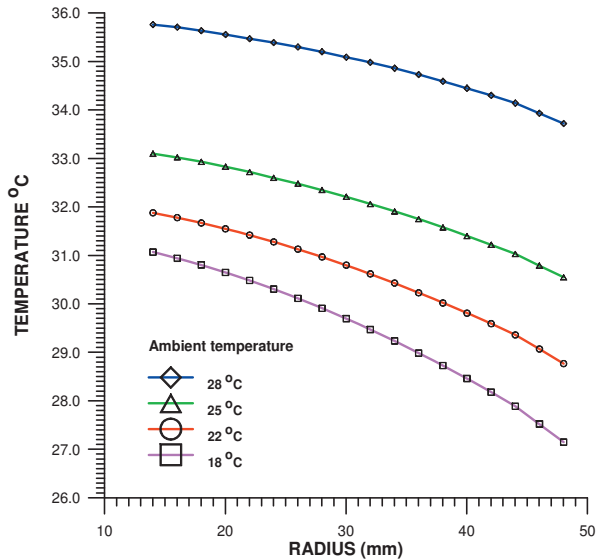
c	-	core
m	-	muscle
f	-	fat
s	-	skin
a	-	ambient

5. RESULTATI NUMERIČKE ANALIZE

Tablica 3. Rezultati numeričke analize

Mjerenje br.	1	2	3	4	
t_a , °C mjereno	28	25	22	18	
t_s , °C mjereno	33,47	30,3	28,47	26,77	
Toplinski gubici, W	1,01	1,019	1,244	1,592	
Toplinski izvori W/m ³	q_c	1740,4	1743,4	2145,8	2745,1
	q_m	1566,1	1566,9	1928,7	2467,3
	q_f	1029,3	1035,7	1274,8	1630,9
	q_s	1485,8	1487,8	1831,3	2342,7
Oslobođena toplina, W	1,035	1,029	1,243	1,590	
Δt , °C Pad temperature tkiva	2,28	2,79	3,4	4,29	
Površinski toplinski tok q , W/m ²	38,37	39,3	47,45	60,7	
t_c , °C izračunato	35,75	33,09	31,87	31,06	

Temperaturna raspodjela u promatranom segmentu dana je slikom 7.



Slika 7 Temperaturna raspodjela u promatranom segmentu u ovisnosti o temperaturi okoline

6. ZAKLJUČAK

Dobiveni podaci pokazuju da je za temperaturu okoline od 28°C, temperatura jezgre gotovo jednaka onoj u referentnoj literaturi [1]. Za druge tri temperature okoline, temperatura jezgre nužno mora biti niža od referentne ukoliko je nadlaktica u toplinskoj ravnoteži okolinom a koeficijenti provođenja topline ostaju nepromijenjeni. Dobiveni iznosi metaboličke aktivnosti kao i toplina koja se izmjenjuje uslijed prijenosa topline krvlju, viši su od onih danih u literaturi [1] i [6]. Specifični toplinski tok sa površine kože prema okolini povećava se za niže okolišnje temperature i u granicama je vrijednosti danih u relevantnoj literaturi.

LITERATURA

- [1] Arthur T. Johnson, *Biomechanics and exercise physiology*, John Wiley & Sons, Inc., New York
- [2] Cornwell K., *The Flow of Heat*, Van Nostrand Reinhold Company, London, 1977.

- [3] Ferreira, M.S., Yanagihara, J.I., Development of the passive system of a human thermal model, *BED-Vol. 50*, 2001 Bioengineering Conference ASME 2001
- [4] Kastberger G, Stachl R., Infrared imaging technology and biological applications. *Behav Res Methods Instrum Comput.* 2003 Aug;35(3):429-39.
- [5] Ellis W, Cheng S., Intraoperative thermographic monitoring during neurogenic thoracic outlet decompressive surgery. *Vasc Endovascular Surg.* 2003 Jul-Aug;37(4):253-7.
- [6] Peterson F., *Climate Calculations*, Department of Heating and Ventilation, Royal Institute of Technology, Stockholm (1999)
- [7] Gyton A. C., *Medicinska fiziologija*, Medicinska knjiga, Beograd-Zagreb, 1965.

TOPLINSKA BILANCA LJUDSKOG TIJELA KOD KUPANJA

Zdravko Poša ,dipl.ing.
ROTERM d.o.o.
SPLIT-Držićeva 8

SAŽETAK

U današnjem načinu urbanog života ljudsko tijelo je stalno izloženo suvišku energije . Jedan razlog jest nedostatak ozbiljnije fizičke aktivnosti a s druge strane i zbog konzumiranja prekomjerne količine hrane. Vrlo brzo takova situacija dovodi do nezdravih posljedica po ljudsko tijelo a to je gojaznost ili prekomjerna težina.

Tema ovog članka je da rasvijetli i objasni jedan mogući način rješavanja tog problema. A to je, prema provedenim proračunima, kupanje koje gotovo svakodnevno upražnjavamo tokom ljetnih mjeseci.

KLJUČNE RIJEČI

Ljudsko tijelo
Toplinska bilanca
Isparavanje
Kupanje

Suvremeni čovjek je na određeni način zarobljenik civilizacije koje gradi. Uvođenjem strojeva i automatizacije svoju fizičku aktivnost je sveo na minimum. Minimiziranje fizičkih aktivnosti direktno smanjuje i utrošak energije ljudskog tijela. Ukupna utrošena energija u čovječjem organizmu nadoknađuje se iz energetske vrijednosti hrane koje čovjek svakodnevno uzima. Visokim ekonomskim standardom s druge strane čovjek bezrazložno unosi prekomjernu količinu hrane visoke kalorične vrijednosti u svoje tijelo. Ljudsko tijelo je dakle konstantno podvrgnuto suvišku energije. Suvišna energija u tijelu se pretvara u masna tkiva i dolazi do povećavanja tjelesne težine. Kao posljedica takve situacije ubrzo se stvaraju zdravstveni problemi. Iznalaženja efikasnog načina utroška energije sa ili čak bez fizičke aktivnosti je primarni cilj u modernom načinu života .Usmjerenje ovog članka je da takav slučaj termodinamički rasvijetli i nađe jedan mogući odgovor na to pitanje.

Ljudski organizam može se promatrati kao toplinski stroj sa svim svojim zakonitostima .Za obavljanje funkcija ljudskog organizma odnosno njegovih internih organa (srca, mozga, jetre itd) proizvodnja energije u organizmu je neprekidna .Ta energija se razvija u organizmu putem oksidacije hrane. Taj neprekidni proces koji održava temperaturu ljudskog organizma približno konstantnom (oko 37° C) kao i rad unutarnjih organa nazvan je bazalni metabolizam. On iznosi oko 1,2 do 1,5 W kg tjelesne težine čovjeka. U uvjetima povećane aktivnosti ta proizvodnja toplinske energije u tijelu može se povećati i do deset puta. Povećana proizvodnja energije u tijelu mora biti povezana i sa adekvatnim i efikasnim načinom odvođenja. Podržavanje normalne temperature ljudskog tijela (37 °C) je vrlo bitna jer gornja granica, i to fatalna je 43 °C . Ista tako postoji i donja granična vrijednost temperature ljudskog organizma . Kod temperature tijela od 25 °C život također nestaje.

Pod pretpostavkom da je uspostavljena termoregulacija odnosno ravnoteža između proizvedene i odavane energije može se reći da odavana energija H (W) sastoji se od dvije komponente :

- osjetne(O)
- latentne (L)

$$H = L + O \quad (W) \quad (1)$$

Odnos stvorene topline (H) i odavanje iste ($L + O$) regulirana je čovječjim mehanizmom termoregulacije. Dvije vrste nervnih perceptora, za hladno i toplo na ljudskoj koži primaju utjecaj okoline i stvaraju impulse koji nervni sistem prenosi i utiče na:

- metabolizmom povećane proizvodnje topline kod osjećaja hladnoće
- povećanje odavanja topline kod osjećaja toplote

Osjetljivost receptora na temperaturne promjene je izuzetno visoka. Tako možemo navesti podatak da hladni receptori reagiraju na smanjenje temperature površine kože od $0,007 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{sek}$ a topli receptori na povećanje temperature brže od $0,001 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{sek}$.

Hladni receptori u hladnoj sredini pokreću povećanje bazalnog metabolizma tj. proizvodnju topline a paralelno s time smanjuje odavanje topline skupljanjem žila sistema krvotoka. Daljnje postojanje signala hladnih perceptora dovodi da drhtanja mišića kao simulacija povećanja fizičke aktivnosti. Drhtanje mišića prisutno je do temperature tijela oko $31 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Još daljnje hlađenje tijela dovodi čovjeka do opasnog stanja kome da bi smrt nastupila kod $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Postojanje signala s toplih perceptora povisuje se temperatura kože zbog proširenja krvnih kapilara i povećavanjem protoka krvi kroz iste. Povećani protok iznosi i do deset puta od nominalnog (za ruke i stopala i do 30 puta). Povećani protok povisuje temperaturu kože a time i odavanje topline prema okolini. To predstavlja senzitivni gubitak topline sa ljudskog tijela (O).

Istovremena se stimulira rad znojnih žlijezda. Isparavanjem na primjer 1 l vode sa površine tijela gubi se 2400 KJ. Znojenje predstavlja dakle osnovu latentnog gubitka topline (L). Ukoliko oba ova vida odavanja topline (O+L) ne dovodi do stabiliziranja temperature ($H > (L+O)$) dolazi da porasta unutarnje temperature tijela da bi fatalni nivo bio između 42 i $43 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Latentna toplina (L) sastoji se od sljedećih glavnih komponenti:

- Ld - odavanje topline difuzijom vodene pare kroz kožu
- Ls - odavanje toplote isparavanjem znoja sa površine kože
- Lr - odavanje toplote isparavanjem vode u plućima

Osjetna toplina (O) sastoji se od sljedećih glavnih komponenti:

- Od- zagrijavanje zraka pri disanje
- Oz- odavanje topline zračenjem
- Ok - odavanje topline konvekcijom

Za procese u tijelu u kojima se odaje toplina (H) postoje određeni kvantitativni odnosi. Dolje navedeni podaci se odnose za golo ljudsko tijelo u okruženju mirujućeg zraka temperature $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ i 50% relativne vlažnosti :

Znojenje (Ld + Lsv)	14,5 %
Disanje (Lr + Od)	10,2 %
Zračenje (Oz)	58,0 %

Konvekcija (Ok) 15 %

Postoje i također i gubici topline ljudskog tijela u procesu urinacije i defekacije. Zajedno ti procesi ne iznose više od 2% pod istim uvjetima.

Iz iznesenog možemo zaključiti da gubitak topline tijela se najlakše smanjuje zračenjem (Oz). To se i primjenjuje kod otopljanja promrzlih ljudi potpunim omatanjem tijela. Ostaje pitanje što da se primjenjuje u suprotnom slučaju da se pospješi hlađenje ljudskog tijela. Zračenje i konvekcija ne pomažu zbog manje temperaturne razlike između ljudske kože i okoline. Ostaje jedino dakle proces isparavanja kao proces koji može efikasno oduzimati toplinu sa tijela. To se i primjenjuje na pr. kod bolesnika sa povišenom temperaturom sa vlažnim oblogama po tijelu.

Ishlapljivanjem vode sa površine tijela dakle značajno se gubi energija. Stoga za odvođenje suvišne energije iz tijela to je idealni proces koji je dostupan n.pr. kupanjem u ljetnim mjesecima.

Da dokažemo gore iznesenu tvrdnju postaviti ćemo bilansu topline. Pretpostavimo slučaj kad je ljudsko tijelo u stanju mirovanja a izloženo suncu i ovlaženo vodom nakon kupanja. Za taj slučaj postoje toplinski gubici tijela kao i dobici.

-GUBICI TOPLINSKI S TIJELA

- a. metabolizam (L+O)
- b. isparavanje vode sa tijela

-TOPLINSKI DOBICI TIJELA

- c. sunčanje

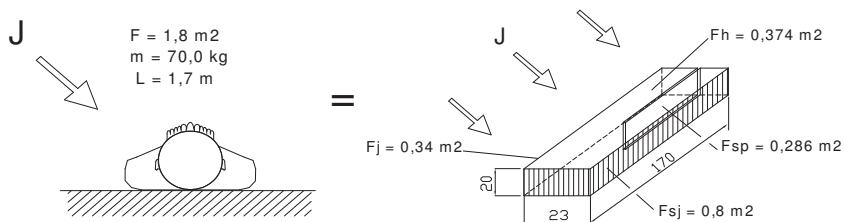
Za postaviti energetske bilancu i dobiti numeričke vrijednosti moraju se postaviti prosječne vrijednosti za ljudsko tijelo i one iznose:

masa	$m = 70 \text{ kg}$
volumen tijela	$V = 60 \text{ l}$
površina tijela	$F = 1,8 \text{ m}^2$
tjelesna temperatura	$t = 37 \text{ oC}$
temperatura kože	$t = 30 \text{ oC}$
bazalni metabolizam	
u stanje mirovanja	80 W

Dane vrijednosti su prosječne vrijednosti. Možemo navesti da u medicinskoj literaturi /5/ u sličnim proračunima su korištene su neznatno druge brojčane vrijednosti. Te razlike ne mogu utjecati značajno na konačne rezultate. Nekim mjerenjima se ustanovila funkcionalna ovisnost spomenutih parametara. Prema De Boise-u uz visinu ljudskog tijela $h(m)$ i masu (m) površina ljudske kože iznosi:

$$F = 0,204 \cdot m^{0,425} \cdot h^{0,725} (m^2) \quad .(2)$$

Također radi matematičkog računanja, u proračunima što slijede, može se zamijeniti kao bliska aproksimacija ljudsko tijelo sa prizmatičnim tijelom približno iste površine i volumena kako je prikazano i na slici 1. Nakon toga možemo započeti sa detaljnijim proračunima kako slijedi.



Slika1. Zamjena ljudskog tijela sa prizmatičnim tijelom

A. ODAVANJE TOPLINE METABOLIZMOM

Odavanje topline metabolizmom i to bazalnim objašnjena je u uvodnom prethodnom izlaganju .Kod sunčanja naime podrazumijevamo mirno ležanje bez ikakvog fizičkog rada .

B.GUBITAK TOPLINE ISPARAVANJEM SA TIJELA

Kupanjem i izlaskom iz vode na koži ostaje izvjesna količina vode u vidu tankog filma vode. Pretpostavimo jednoliku debljinu filma od 0,25 mm te je zadržana voda na tijelu

$$W = F \cdot \delta = 1,8 \cdot 0,00025 = 0,45 \cdot 10^{-3} \text{ (m}^3 \text{)} = 0,45 \text{ (l)}$$

Od izračunate količine vode dio ne sudjeluje u procesu ishlapljivanja . Razlog tome su:

- na vertikalnim površinama tijela nakon kratkog vremena dođe do gravitacionog slijevanja i stvaranja kapljica koje cijedenjem otpadaju sa tijela.
- dio vode prijeđe na tlo preko dodirne površine
- dio vode ostaje na površinama koje nisu na koži (kosa, dlake).

Ako navedeno iznosi 40% tada dio vode koji direktno ishlapljuje na koži iznosi:

$$W' = 0,6 \times W = 0,271$$

Energija isparavanja zadržane vode iznosi:

$$r = W' \cdot di_{32} = 0,27 \times (i'' - i')_{32} = 0,27 \times (2553 - 137) = 652,32 \text{ kJ}$$

Izračunata toplina se gubi iz ljudskog tijela te je bilanca ljudskog tijela poremećena. Perceptori hladnoće reagiraju i javljaju se popratne reakcije (skupljanje kože, drhtanje) što ponekad čini kupanje tj period nakon izlaska iz vode neudobnim. Postavlja se pitanje intenziteta gubljena energije u vremenu. To definira prijenos mase u procesu ishlapljivanja. Koeficijent prenosa mase σ kod isparavanja vode može se iznaći iz Lewis-ova zakona :

$$\frac{\alpha_k}{\sigma} = c_p (J / kg, ^\circ) \quad (3)$$

Ispitivanjem se je ustanovilo da zadovoljava za proračun faktora σ sljedeća jednakost gdje je w (m/s) brzina nastrojavanja zraka preko vlažne ili mokre površine.

$$\sigma = (25 + 19.w)(kg_z / m^2, h) \quad (4)$$

Uz brzine nastrojavanja zraka od $w=1.0$ (m/s) numerička vrijednost izraza (4) je

$$\sigma = (25 + 19.w) = (25 + 19.1.0) = 44,0(kg_z / m^2, h) = 12.10^{-3}(kg / m^2, s)$$

Ukupna toplina koja se oduzima tijelu q (W/m^2) troši se dijelom na toplinu predanu konvekcijom okolnom zrake q_k (W/m^2) a dijelom za ishlapljivanje vode sa površine q_i . Može se postaviti sljedeća jednakost (5)

$$q = \pm (q_k + q_i) (W/m^2) \quad (5)$$

Sve tri veličine u izrazu mogu imati različite predznake već prema toku procesa. Spomenute komponentne topline su dane sljedećim izrazima

$$q_k = \alpha_z.(t_g - t_z)(W / m^2) \quad (6)$$

$$q_i = \sigma.(x_g - x_z).r_g(W / m^2) \quad (7)$$

Za promatrani slučaj , ovlaženog ljudskog tijela u ljetnom periodu možemo postaviti sljedeće podatke koji će numerički determinirati spomenute topline.Dakle:

$t_g = 32$ $^\circ C$ vodeni film poprira temperature kože

$x_g = 0,031$ (kg_w/kg_z) -apsolutna vlažnost graničnog sloja zadanu temperaturu

$t_z = 33$ $^\circ C$ projektna temperatura ljetnog perioda

$x_z = 0,015$ (kg_w/kg_z) vlažnost projektnog stanja zraka

Za dane vrijednosti možemo zaključiti da je konvektivni prelaz topline q_k zanemariv zbog malenog dt ($^\circ C$). Također iz $i-x$ dijagrama izraz (5) poprira sljedeći oblik

$$q = q_i \gg q_k (W/m^2)$$

odnosna uz spomenute bliske aproksimacije ($q_k = 0$)

$$q_i = \sigma \cdot (x_g - x_z) \cdot r_g \text{ (W/m}^2\text{)}$$

$$q_{i,i} = 12,2 \cdot 10^{-3} \cdot (0,031 - 0,015) \cdot (2559 - 133) \cdot 10^3 = 474,9$$

$$q_{i,i} = 474,9 \text{ (W/m}^2\text{)}$$

Ukupni toplinski intenzitet isparavanja je:

$$Q_i = q_i \cdot F = 474,9 \cdot 1,8 = 854,8 \text{ (W)} = 854,8 \text{ (J/s)}$$

Vrijeme potrebno za isparavanje vode je

$$\tau = \frac{r}{Q} = \frac{652,32 \cdot 10^3}{854,9} = 763,0 \text{ (s)} = 12,7 \text{ (min)}$$

Potonje vrijednosti su i bliske iskustvenim podacima te će se i koristiti u daljnjem proračunu i razradi bez korekcije.

C. DOBITAK TOPLINE USLJED SUNČEVOG ZRAČENJA

Dozračena radijacijska toplina od sunca na ljudsko tijelo može se izraziti kao :

$$Q = F_o \cdot q \text{ (W)} \quad .(8)$$

Gdje je:

$F_o \text{ (m}^2\text{)}$ - osunčana površina ljudskog tijela
 $q \text{ (W/m}^2\text{)}$ - dozračena sunčeva energija. Varira od usmjerenja površine, doba dana i godišnjeg doba.

Kod sunčanja usvajamo princip da je tijelo u ležećem položaju longitudinalno izloženo prema jugu. Za numerička određivanje $Q \text{ (W)}$ možemo prihvatiti dva principa:

A/ Površine ljudskog tijela usvajamo kao konstantu a određujemo $q_{sr} \text{ (W/m}^2\text{)}$ za tu površinu kao neku srednju vrijednost. Formula (8) prema tome poprima izraz

$$Q = F \cdot q_{sr} \cdot k \text{ (W)} \quad .(9)$$

Faktor k uvodimo kao bezdimenzionalni faktor i predstavlja omjer osunčane površine prema ukupnoj površini ljudskog tijela ($k < 1,0$).

B/ Površine ljudskog tijela razlažemo na površine čiste orijentacije (jug, horizontalno, sjever). Uz taj pristup formula 8 poprima izraz :

$$Q = q_j \cdot F_j + q_h \cdot F_h + q_s \cdot F_s \text{ (W)} \quad .(10)$$

$$F = F_{jug} + F_{hor} + F_{sjen} + F_{spoj} \text{ (m}^2\text{)}$$

Dozračena sunčeva toplina $q(\text{W/m}^2)$ mijenja se tokom dana kako je naznačeno.. Za vrijeme mjeseca srpnja a za naše geografsko područje važeće odnosno usvojene su sljedeće vrijednosti.

	Horizontalno (W/m^2)	Jug (W/m^2)	Sjena (W/m^2)	Srednje (W/m^2)
10 sati	682	347	126	521
13 sati	753	420	132	593
16 sati	429	110	102	273
Dnevna srednja	621	290	120	462

Za određivanje pojedinih površina u postupku B ljudsko tijelo je zamijenjeno sa tijelom pravilne prizme,kako je rečeno prije, čije se dimenzije prema slici 1 a adekvatne površine su :

$$F = F_{\text{jug}} + F_{\text{hor}} + F_{\text{sjen}} + F_{\text{spoj}} \quad (\text{m}^2)$$

$$1,8 = 0,34 + 0,374 + 0,8 + 0,286 \quad (\text{m}^2)$$

Dozračena energija u 10 h

$$A/ Q_{10} = F \cdot q_{sr} \cdot k = 1,8 \cdot 521 \cdot 0,45 = 422 \text{ (W)}$$

$$B/ Q_{10} = F_j \cdot q_j + F_h \cdot q_h + F_s \cdot q_s = 0,34 \cdot 347 + 0,374 \cdot 682 + 0,8 \cdot 126 = 118 + 255 + 101 = 474 \text{ (W)}$$

$$Q_{10} = 474 \text{ (W) usvojeno}$$

Dozračena energija u 13 h

$$A/ Q_{13} = F \cdot q_{sr} \cdot k = 1,8 \cdot 593 \cdot 0,45 = 480 \text{ (W)}$$

$$B/ Q_{13} = F_j \cdot q_j + F_h \cdot q_h + F_s \cdot q_s = 0,34 \cdot 420 + 0,374 \cdot 753 + 0,8 \cdot 132 = 530 \text{ (W)}$$

$$Q_{13} = 530 \text{ (W) usvojeno}$$

Dozračena energija u 16 h

$$A/ Q_{16} = F \cdot q_{sr} \cdot k = 1,8 \cdot 273 \cdot 0,45 = 221,1 \text{ (W)}$$

$$B/ Q_{16} = F_j \cdot q_j + F_h \cdot q_h + F_s \cdot q_s = 0,34 \cdot 104 + 0,374 \cdot 429 + 0,8 \cdot 102 = 278 \text{ (W)}$$

$$Q_{16} = 278 \text{ (W) usvojeno}$$

Dozračena energija srednja dnevna

$$A/ Q_d = F \cdot q_{sr} \cdot k = 1,8 \cdot 462 \cdot 0,45 = 374,2 \text{ (W)}$$

$$B/ Q_d = F_j \cdot q_j + F_h \cdot q_h + F_s \cdot q_s = 0,34 \cdot 291 + 0,374 \cdot 621 + 0,8 \cdot 120 = 426,8 \text{ (W)}$$

$$Q_d = 410 \text{ (W) usvojeno}$$

Sa izračunatim vrijednostima može se postaviti sveukupna toplinska bilanca:

1. Toplinski tok za period isparavanja vode sa tijela

$$Q_i = -Q_{mb} + Q_s - Q_i = -90 + 410 - 854.9 = -534.9 \text{ (W)}$$

2. Toplinski tok za period sunčanja

$$Q_s = -Q_{mb} + Q_s = -90 + 410 = 320 \text{ (W)}$$

Iz proračunatog vidljiva je značajna razlika u toplinskom toku sa ljudskog tijela za vrijeme isparavanja i čistog sunčanja te proračunavam prosječnu vrijednost toplinskog toka za period 60 minuta

$$Q_f = \frac{-Q_i \cdot \tau + Q_s \cdot 3600 - Q_{mb} \cdot 3600}{3600} \text{ (W)} = \frac{-854,8 \cdot 763,0 + 410 \cdot 3600 - 80 \cdot 3600}{3600} = +148,8 \text{ (W)}$$

Račun nam ukazuje da sa jednim kupanjem i sunčanjem ne gubi se energija nego sasvim suprotno dobiva. To ljudsko tijelo rješava termoregulacijom sa spomenutim postupcima hlađenja . No uz uzastopno ishlapljivanje tj. kupanje u toku jednog sata prosječna vrijednost toplinskog toka , uz isti računski postupak, poprima sljedeće numeričke vrijednosti:

$$Q_{II} = -32,3 \text{ (W)} \text{ - za dva kupanja}$$

$$Q_{III} = -213,0 \text{ (W)} \text{ -za tri kupanja}$$

$$Q_{IV} = -394,0 \text{ (W)} \text{ -za četiri kupanja}$$

Od proračunatih izdvojimo vrijednost prosječnog gubitaka topline od 394 W za period 60 minuta uz četiri kupanja tj sušenja što je teoretski moguće. Nabrojimo prema podacima iz literature /4/ radi usporedbe neke ljudske aktivnosti sa odgovarajućim utroškom energije:

umjereni ples	-265(W)
hodanje 5 km/h	-295(W)
kuglanje u dvorani	-440(W)
teški rad sa dizanjem	-470(W)
sportske aktivnosti, atletika	-585(W)

Kompariranjem sa danim vrijednostima vidljiva je pogodnost kupanja sa sunčanjem za efikasni utrošak energije iz ljudskog tijela čak bez ikakve fizičke aktivnosti .Sa fizičkom aktivnosti konačni rezultati bi bili još pozitivniji.

ZAKLJUČAK

Povećani utrošak energije u ljudskom tijelu tokom kupanja vrši se odnosno može se vršiti bez direktnih fizičkih aktivnosti tj u fazi potpunog odmaranja ili relaksacije. U izvjesnim prilikama ,kada tijelo nije u mogućnosti podnositi fizička naprezanja, to predstavlja idealno riješene za utrošak suvišne energije iz ljudskog tijela.Treba napomenuti , da ovim proračunom dobivene vrijednosti , bi svakako trebalo provjeriti preciznijim mjerenjima ili eksperimentima te ih po potrebi korigirati.

Ona što daje kupanju pogodnost u rješavanju problema suvremenog čovjeka jest sam proces ishlapljivanja . To nas upućuje da samo izlaganje tijela sunčevim zrakama bez kupanja tj ishlapljivanja ne predstavlja rješenje za spomenute poteškoće kako bi neupućeni mogli zaključiti. U zaključku svakako možemo reći da s posmatranog aspekta kupanje je zdrava i preporučljiva aktivnost. Ona daje predispozicije zdravijeg a time i sretnijeg života jer suzbija nezdrave posljedice urbanog života industrijske ere.

NAZIVLJE :

$\alpha(\text{W/m}^2,^{\circ})$ -	koeficijent prijelaza topline
δ (m) -	debljina filma vode
$c_p(\text{J/kg},^{\circ})$ -	specifična toplina
$F(\text{m}^2)$ -	površina
$h(\text{m})$ -	visina
$i(\text{kJ/kg})$ -	entalpija
$m(\text{kg})$ -	masa tijela
Q (W) -	toplinski tok
$q(\text{W/m}^2)$ -	specifični toplinski tok
$r(\text{kJ/kg})$ -	toplina isparavanja
$\sigma(\text{kg/m}^2, \text{h})$ -	koeficijent ishlapljivanja
τ (s) -	vrijeme
$t(^{\circ}\text{C})$ -	temperatura
$V(\text{m}^3)$ -	volumen tijela
$w(\text{m/s})$ -	brzina
$x(\text{kg/kg})$ -	sadržaj vode u zraku

LITERATURA:

1. Bošnjaković F. : *Nauka a Toplina II*, Tehnička knjiga, Zagreb 1976
2. Poša Z.: *Toplinska bilanca ljudskog tijela kod kupanja* ,EGE 3/2004 ,Zagreb
3. Reknagel Šprenger :*Grijanje i klimatizacija*, Školska knjiga '87, Beograd
4. ASHRAE : *Fundamentals 1989* .ASHRAE, Atlanta, 1989
5. Fiala D. i drugi : *A computer model of human thermoregulation for a wide range of environment conditions : the passive system*
Journal of Applied Physiology ,Nov 1999
6. CARRIER: Handbook of Air Conditioning System Design, McGraw-Hill Co, New York 1964

POBOLJŠANJE SUSTAVA UPRAVLJANJA PRIMJENOM MODELSKIH PREDIKTIVNIH REGULATORA

IMPROVEMENT OF CONTROL SYSTEM BY APPLYING MODEL PREDICTIVE CONTROLS

*Krešimir Osman, dipl. ing. stroj.
I.B.R. INŽENJERING Cirković d.o.o.
Adresa: Ulica Svetog Roka 10, Zagreb
Telfax: 01/6678-147, 01/6678-148
e-mail: kresimir.osman@zg.htnet.hr*

SAŽETAK

U radu je analizirana primjena jednog algoritma upravljanja u svrhu poboljšanja sustava upravljanja u kotlovnici (njenog ogrijevnom i rashladnog dijela). Obuhvaćene su: opis sustava (kotlovnice), karakteristike prediktivnog algoritma upravljanja, princip rada predikcijskih regulatora, osobitosti poopćenog predikcijskog regulatora (GPC), te realizacija samog sustava upravljanja, u ogrijevnom, te u rashladnom dijelu kotlovnice. Tu su prikazani njihovi matematički modeli, parametri kriterijske funkcije, formiranje referentne trajektorije, predikcija izlazne veličine procesa i minimizacija kriterijske funkcije.

Ključne riječi: kotlovnica, upravljanje, modelsko prediktivno upravljanje

SUMMARY

The paper analyzes application of one control algorithm for the purpose of improving the control system in the boiler room (its heating and cooling parts). It includes: description of the system (boiler room), characteristics of the predictive control algorithm, operating principle of predictive controls, particularities of the generalized predictive control (GPC), and implementation of the control system itself in the heating and cooling parts of the boiler room. It displays their mathematical model, criteria function parameters, formation of referential trajectory, prediction of process output quantity, and minimization of criteria function.

Key words: boiler room, control, model predictive control

1. UVOD

Modelske prediktivno upravljanje značajno se razvilo u posljednjih nekoliko godina, unutar istraživanja same automatske regulacije, kao i u industriji. Razlog za to je što je modelsko prediktivno upravljanje, vjerojatno naj glavni način rješavanja problema procesne regulacije u vremenskom području. Ono u sebi objedinjuje stohastičke procese, upravljanje procesima sa mrtvim vremenom, te multivarijabilne sustave upravljanja. Vlada mišljenje da će ovaj algoritam upravljanja i slijedećih godina doživljavati veliku ekspanziju unutar zajednice. Ovaj rad analizira primjenu jednog takvog algoritma na jedan multivarijabilni sustav (kotlovnice).

2. OPIS POSTROJENJA

U sklopu poslovnog objekta nalazi se kotlovnica, koja je ložena na prirodni (zemni) plin. Postrojenje se sastoji od dijela za pripremu grijevnog medija, te dijela za pripremu rashladnog medija. Grijevni dio proizvodi toplu vodu, temperaturnog režima 90°C u polaznom vodu, te 70°C u povratnom vodu. U sklopu grijevnog dijela nalaze se pet krugova potrošača topline (grijači u klima komorama, priprema potrošne tople vode, radijatorsko grijanje, kalorifersko grijanje i zračne zavjese, te ventilokonvektorsko grijanje. Dio za pripremu grijevnog medija radi u sezoni grijanja, te služi za zagrijavanje navedenih prostora u objektu, dok rashladni dio radi kada želimo klimatizirati prostore, tj. održati određenu temperaturu zraka u prostoru, relativnu vlažnost zraka, brzinu strujanja zraka u zoni boravka čovjeka (biozoni), mehaničku i kemijsku čistoću zraka, te određenu razinu tlaka ili buke. Prostor klimatiziramo obično u toku ljetnih mjeseci.

2.1. Priprema grijevnog medija

U sklopu kotlovnice, dijela koji služi za pripremu grijevnog medija (vidi ilustraciju 1.), nalaze se tri toplovodna kotla, koji u svom kompletu sadrže plinske plamenike sa plinskim rampama. Kotlovi su opremljeni zaštitnim cirkulacijskim pumpama, koje su uključene serijski s kotlom. U pogonu su paralelno spojena tri kotla, koji rade u kliznom režimu rada. Prilikom projektiranja same kotlovnice potrebno je obratiti pažnju na slijedeće stvari:

- potrebno je paziti na protok kroz kotlove, jer preveliki protok kroz jedan kotao može izazvati premaleni protok kroz drugi kotao, preveliki protok također uzrokuje veći pad tlaka od očekivanog i može izazvati eroziju unutar cjevovoda vode u kotlu, kao i pojavu buke,
- za krugove s više kotlova primjenjuje se paralelni dvocijevni razvod (postoji polazni i povratni vod grijevnog medija), radi povezivanja u funkcionalnu cjelinu,
- ulazna temperatura vode u kotao može biti jednaka temperaturi povratne vode od potrošača, ukoliko ta temperatura osigurava zaštitu od niskotemperaturne korozije, ali se može i miješati s izlaznom vodom iz kotla te tako postići propisanu minimalnu ulaznu temperaturu vode u kotao.

Kotlovske zaštitne cirkulacijske pumpe su stalno u pogonu (pale se i gase preko regulatora u primarnom krugu). Ako treba povišiti temperaturu vode u povratnom vodu kotla, zatvara se troputni elektromotorni ventil prije pumpe, te se tada topla voda vrti samo u primarnom krugu dok se ne postigne željena temperatura na povratnom vodu kotla. Radom elektromotornog ventila upravlja granični temperaturni osjetnik u povratnom vodu kotla. Troputni ventili su u stanju "zatvoreno" kada temperatura vode u povratnom vodu padne ispod granične, u suprotnom slučaju su u stanju "otvoreno". Za vrijeme rada plamenika, zaštitna cirkulacijska pumpa mora stalno biti u pogonu, kako bi se osigurao minimalni protok vode kroz kotao. Također se prati temperatura u kotlu, tj. kada ona padne ispod minimalne uključuje se plamenik i otvara elektromagnetski ventil, tako da plin ulazi u plamenik gdje izgara u smjesi sa zrakom, kojeg usisava ventilator plamenika, te na taj način povišuje temperaturu u kotlu. Regulator u primarnom krugu prati tijek vanjske temperature, te ako ona padne za određenu temperaturnu razliku, uključuje se kotao kao bi se nadoknadila toplina izgubljena padom vanjske temperature. Tokom neradnog vremena kotao se ne isključuje, nego topla voda cirkulira u primarnom vodu, dok se plamenik uključuje zavisno od temperature vode u polaznom vodu i temperature vode u kotlu. Kotao se ne isključuje jer se time produžava vijek trajanja uređaja, zbog toga što često isključivanje kotla uzrokuje velika naprezanja u materijalu.

Krugovi potrošača (radijatorsko grijanje, kalorifersko grijanje i zračne zavjese, ventilokonvektorsko grijanje) opremljeni su sa jednim troputnim elektromotornim ventilom i

cirkulacijskom pumpom, koja je dimenzionirana prema protoku svakog potrošača i padu tlaka cijelog sustava pripreme ogrijevnog medija. Krug radijatorskog grijanja radi u temperaturnom režimu 90/70°C, krug kaloriferskog grijanja u temperaturnom režimu 80/60°C, dok je temperaturni režim ventilokonvektorskog grijanja 50/40°C. Pod temperaturnim režimom mislimo na temperaturu medija (u ovom slučaju) je to voda, u polaznom vodu (vod od razdjelnika prema potrošačima), te temperaturu medija u povratnom vodu (vod od potrošača prema sabirniku). Temperaturni režim primarnog kruga (krug od kotla prema razdjelniku, te od sabirnika prema kotlu) je 90/70°C. Na polaznim vodovima navedena tri kruga potrošača stavljaju se temperaturni osjetnici, koji upravljaju radom tropskih elektromotornih ventila, tj. kada temperatura premaši graničnu, ventili se zatvaraju, te voda cirkulira samo u sekundarnom krugu, tj. krugu potrošača. Pošto su kotlovske pumpe spojene u seriju s cirkulirajućim pumpama potrošača, može se dogoditi da radna točka sustava ne leži na zadanoj karakteristici pumpe, čime se mijenja i ukupna karakteristika sustava. U tom slučaju rješenje je u hidrauličkom odvajanju primarnog (krug kotla) i sekundarnog (krug potrošača) preko tzv. spojnog mjesta. To je takvo mjesto na kojem se uspostavlja dopuštena razlika tlaka između primarne i sekundarne strane u skladu s protokom i temperaturom. Spojno mjesto se postavlja između razdjelnika polaznih vodova prema potrošačima i sabirnika u povratu medija od potrošača. Pošto je protok kroz kotao konstantnog iznosa, tada se između razdjelnika i sabirnika ugrađuje prestrujni ventil, koji osigurava da suvišni tlak pumpe djeluje samo u primarnom krugu. Krug potrošača (grijači u klima komorama) sadrži cirkulacijsku pumpu koja je u stalnom pogonu, dok krug koji dobavlja vodu za akumulacijske spremnike potrošne tople vode (bojlere) ima u svom krugu cirkulacijsku pumpu koja radi u temperaturnom režimu 90/70°C, te voda služi kao primarni nosilac topline, za zagrijavanje potrošne tople vode u spremnicima. Krug potrošne tople vode ne nalazi se u toplinskoj podstanici objekta (van kotlovnice), te on kao takav nije predmet ovog seminarskog rada. Temperaturni režim za krug grijača u klima komorama je 80/60°C. Van sezone grijanja kotlovi rade tek toliko da pokriju potrebe potrošne tople vode i grijača u klima komorama za toplinom.

Uštedu energije dobivamo u zavisnosti od vanjske temperature, tj. kada je vanjska temperatura niža, temperatura u kotlu mora biti viša, tj. trebamo dovoditi više plina, odnosno dobiti više goriva, da bismo pokrili nastale toplinske gubitke. Vrijedi i obratno.

U kotlovnici se nalazi uredaj za omekšavanje vode, preko kojeg se voda iz vodovoda priprema za upotrebu u procesu. Ekspanzijski modul služi za kompenzaciju toplinskih dilatacija vode, a radi sa dvije diktir pumpe, jednom radnom i jednom rezervnom.

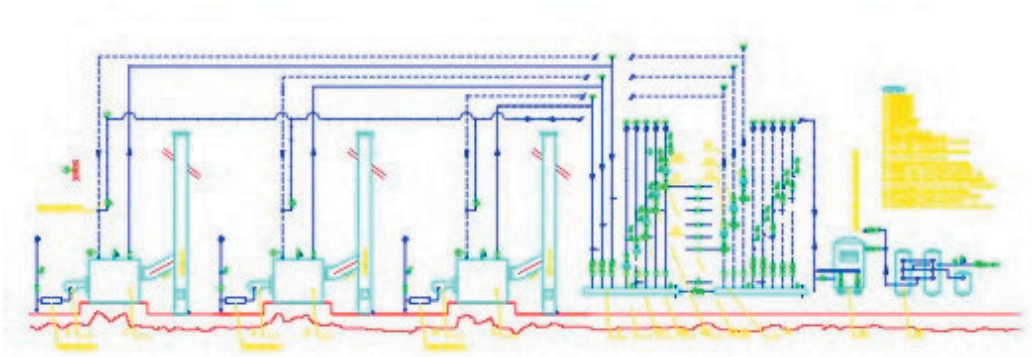
2.2. Priprema rashladnog medija

Izvori rashladne topline su dva rashladnika koji se nalaze na krovu objekta. Priprema rashladnog medija (vidi ilustraciju 2.) sastoji se također iz dva kruga (primarnog i sekundarnog), gdje primarni krug čini krug od rashladnih agregata do razdjelnika, dok je sekundarni krug krug potrošača, tj. krug od razdjelnika prema potrošačima, odnosno od potrošača prema sabirniku. Rashladnik se sastoji od: isparivača, kondenzatora, rashladnog kompresora i termoekspanzijskog ventila. Radni medij u rashladniku je freon R-22, koji u isparivaču predaje rashladnu toplinu vodi, koja tu toplinu prenosi prema razdjelniku, odnosno dalje prema potrošačima. Priprema rashladnog medija radi na principu akumuliranja (pohranjivanja) rashladne energije u spremniku ledene vode (puferu). U spremniku se voda najprije hladi kao tekućina, zatim se skrućuje, te daljnjim hlađenjem se odvodi osjetna toplina krutoj tvari (ledu) i to sve dotle dok se preko temperaturnog osjetnika ne isključi kompresor u rashladniku. Na taj način proces akumuliranja je završen. Ovaj proces se u pravilu odvija noću kada se koristi temperatura vanjskog zraka koji je prilično hladniji od unutarnjeg. Na taj način pohranjuje se velika količina akumulirane rashladne energije, čime dobivamo na njoj

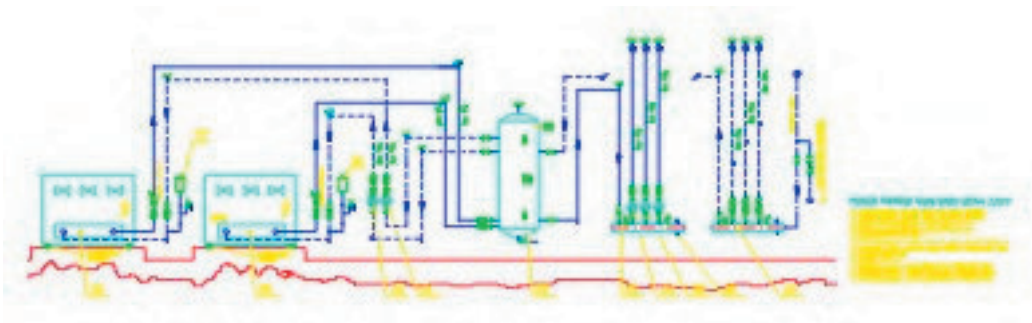
uštedi. Rashladnici u svojim povratnim vodovima imaju cirkulacijske pumpe, dok krugovi potrošača u svojim polaznim vodovima sadrže cirkulacijske pumpe koje su stalno u radu. Krug od rashladnika prema spremniku ledene vode, ima ugrađene sklopke protoka (to je u stvari diferencijalni presostat), koji ima dvojaku funkciju. S jedne strane služi kao zaštita pumpi od pregrijavanja, radi nedostatka vode, dok s druge strane onemogućava pokretanje kompresora, dok cirkulacijske pumpe nisu u pogonu. Krugovi potrošača su: hladnjaci klima komora lokala, hladnjaci klima komora hipermarketa i sistem četverocijevnih ventilokonvektora u poslovnom prostoru, na katu objekta. Četverocijevni sistem ventilokonvektora znači da postoji dva voda ogrijevnog medija (polazni i povratni vod), dva voda rashladnog medija (polazni i povratni vod) i vod za odvod kondenzata. Temperaturni režim ledene vode u krugovima rashladnika, te krugovima potrošača je 7/12°C. Temperaturni režim freona u rashladniku, nije naveden jer je on podatak koji proizvođač rashladnih uređaja ne daje.

Postrojenje se također puni preko uređaja za omekšavanje vode, koje vodu iz vodovoda priprema za proces. Kao i u slučaju ogrijevnog dijela, ovdje se također koristi ekspanzijski modul, za savladavanje toplinskih dilatacija vode u sistemu. Treba napomenuti da je on stalno u pogonu.

Ilustracija 1. Ogrijevni dio kotlovnice



Ilustracija 2. Rashladni dio kotlovnice



3. MODELSKO PREDIKTIVNO UPRAVLJANJE

3.1. Matematički modeli

Općenito se matematičkim modelima opisuju statičke i/ili dinamičke karakteristike stvarnog procesa. Ukoliko su one prikazane tablično ili u grafičkom obliku, tada se govori o neparаметarskom modelu procesa. Ako pak model procesa ima jasno vidljivu strukturu i parametre, govori se o parametarskom modelu procesa. Vanjski modeli procesa (ulazno-izlazni modeli procesa) uzimaju u bzir samo odnos ulaza i izlaza procesa, dok se unutrašnjim modelima modeliraju i stanja procesa (koja često nisu mjerljive veličine).

Tu postoji nekoliko modela, od kojih su najpoznatiji:

- model konačnog impulsnog odziva (engl. *FIR – Finite Impulse Response*)
- model konačne prijelazne funkcije (engl. *FSR – Finite Step Response*)
- prijenosna funkcija – u nastavku će ona biti analizirana.

Većina predikcijskih regulatora koristi baš model procesa opisan prijenosnom funkcijom: Opći oblik prijenosne funkcije u diskretnoj domeni opisana je slijedećim izrazom:

$$y(k) = \frac{B(q^{-1})}{A(q^{-1})} u(k - nk) + \frac{C(q^{-1})}{D(q^{-1})} \xi(k) \quad (1)$$

Polinomi $A(q^{-1})$, $B(q^{-1})$, $C(q^{-1})$, $D(q^{-1})$ su funkcije q^{-1} i imaju općenito slijedeće oblike:

$$\begin{aligned} A(q^{-1}) &= I_{n \times n} + a_1 \cdot q^{-1} + a_2 \cdot q^{-2} + \dots + a_{na} \cdot q^{-na}, \\ B(q^{-1}) &= b_0 + b_1 \cdot q^{-1} + b_2 \cdot q^{-2} + \dots + b_{nb} \cdot q^{-nb}, \\ C(q^{-1}) &= I_{m \times m} + c_1 \cdot q^{-1} + c_2 \cdot q^{-2} + \dots + c_{nc} \cdot q^{-nc}, \\ D(q^{-1}) &= I_{n \times n} + d_1 \cdot q^{-1} + d_2 \cdot q^{-2} + \dots + d_{nd} \cdot q^{-nd}, \end{aligned}$$

Izraz (1) predstavlja opći oblik prijenosne funkcije za MIMO procese (sa n ulaza i m izlaza) na osnovu kojeg se odgovarajućim odabirom polinoma $A(q^{-1})$, $B(q^{-1})$, $C(q^{-1})$, $D(q^{-1})$ dolazi do jednostavnijih modela.

Uobičajeni pojednostavljeni modeli su su:

- AR** (engl. *AutoRegressive model*),
- MA** (engl. *Moving Average model*),
- X** (engl. *eXogenous ili eXternal*) ili **C** (engl. *Controlled*)

Najčešći korišteni tipovi prijenosne funkcije su dani u nastavku:

- ARX model** (engl. *AutoRegressive eXternal*),
- ARMAX model** (engl. *AutoRegressive Moving Average eXternal*),
- ARIMAX model** (engl. *AutoRegressive Integrated Moving Average*), koji se još u metodologiji predikcijskih regulatora naziva i **CARIMA model** (engl. *Controlled AutoRegressive and Intagreted Moving Average*)

$$A(q^{-1})y(k) = B(q^{-1})u(k - nk) + \frac{C(q^{-1})\xi(k)}{\Delta} \quad (2)$$

Prednosti korištenja prijenosne funkcije za modeliranje procesa:

- zahtijeva se minimalan broj parametara,
- moguće je modelirati stabilne i nestabilne procese.

Nedostaci su:

- potrebno je poznavati strukturu modela (red procesa),

- računanje izlaza modela je puno složenije nego kod FIR i FSR modela.

Proces opisan prijenosnom funkcijom (1) može se prikazati i modelom po varijablama stanja:

$$\begin{aligned}x(k+1) &= A \cdot x(k) + B \cdot u(k) \\y(k) &= C \cdot x(k) + D \cdot u(k)\end{aligned}\quad (3)$$

Matematički model kod GPC regulatora (Generalized Predictive Control) se postavlja tako da se uzima da je izbor polinoma $A(q^{-1})$, $B(q^{-1})$ i $C(q^{-1})$ proizvoljan, a $D(q^{-1})$ se uzima kao $A\Delta$. Preko polinoma $B(q^{-1})$ uključujemo stvarno mrtvo vrijeme u model, dok se polinom $C(q^{-1})$ može odabrati na više načina:

1. $C(q^{-1}) = 1$, tada se dinamika poremećajne veličine ne ključuje u matematički model procesa,
2. Ako je $C(q^{-1})$ poznat ili identificirani polinom, dobivamo prediktor izlazne veličine procesa s optimalnim karakteristikama, tj. S onim koje imaju minimalno odstupanje od stvarnog procesa,
3. Polinom $C(q^{-1})$ može biti polinom s konstantnim koeficijentima kojeg postavlja projektant sustava upravljanja. U tom slučaju prediktor izlazne veličine procesa neće biti optimalan, no time ipak možemo poboljšati svojstva sustava upravljanja, naročito smanjiti osjetljivost na razlike matematičkog modela i stvarnog procesa.

3.2. Princip rada predikcijskih regulatora

Postoji više tipova predikcijskih regulatora, no svi oni temelje svoj rad na istom osnovnom principu.

Postupak računanja optimalnog predikcijskog vektora izlaza regulatora radi se kroz slijedeće korake:

1. formiranje referentne trajektorije

Na osnovu referentne vrijednosti w u trenutku $t = kT$ i izmjenjenog izlaza procesa $y(k)$ formiraju se matrice referentne trajektorije w koje opisuju željenu funkciju prijelaza izlaza procesa s vrijednosti $y(k)$ na vrijednost w .

2. predikcija izlaza procesa

Predikcijska matrica izlaza procesa \hat{y} proračunava se na osnovu matematičkog modela procesa, te matrice u , y i \hat{u} . Metodologija predikcijskih regulatora nije ovisna o načinu na koji se računa izlaz procesa, tako da pri tom možemo upotrijebiti razne modele procesa. Pri tom je bitno da model što bolje opisuje stvarni proces.

3. formiranje kriterijske funkcije

Kriterijske funkcije svih predikcijskih regulatora mogu se opisati jednom općom kriterijskom funkcijom:

$$J(w, \hat{y}, \hat{u}) = \sum_{j=N_1}^{N_2} \left[P(q^{-1}) \cdot \hat{y}(k+j) - P(1) \cdot w(k+j) \right]^2 + \rho \cdot \sum_{j=N_1}^{N_2} \left[\frac{Q_n(q^{-1})}{Q_d(q^{-1})} \cdot \hat{u}(k+j-1) \right] \quad (4)$$

Parametri kriterijske funkcije kod GPC regulatora: N_2 – proizvoljan, N_1 – proizvoljan, N_U – proizvoljan, $P = 1$, ρ – proizvoljan, $Q_n = \Delta$, $Q_d = 1$.

4. računanje predikcijskog izlaza regulatora

Računa se optimalni predikcijski izlaz regulatora \hat{u}_{opt} kojim se minimizira kriterijska funkcija (4).

Rješenje problema minimizacije dobiva se iteracijskim postupkom u više koraka.

5. ažuriranje izlaza regulatora

Prvi element proračunatog predikcijskog izlaza regulatora šalje se na izlaz regulatora. Ostali elementi se ne koriste, već se u trenutku $t=(k+1)T$ cijeli postupak ponavlja.

4. POBOLJŠANJE SUSTAVA UPRAVLJANJA U KOTLOVNICI

Poboljšanje sustava upravljanja u kotlovnici izvesti će se pomoću regulatora čiji se rad temelji na algoritmu modelskog prediktivnog upravljanja za MIMO procese.

U oba slučaja (ogrijevni i rashladni dio kotlovnice) razmatrati će se slučaj kada je $C(q^{-1}) = I_{n \times n}$.

Promatra se Diophantska jednačba:

$$I_{n \times n} = E_k(q^{-1})\tilde{A}(q^{-1}) + q^{-k}F_k(q^{-1}) \quad (5)$$

$$\tilde{A}(q^{-1}) = A(q^{-1})y(t+k) \quad (6)$$

Množeći izraz za CARIMA model (2) sa $\Delta E_k(q^{-1})z^k$, te koristeći (5) i nakon sređivanja dobije se:

$$y(t+k) = F_k(q^{-1})y(k) + E_k(q^{-1})B(q^{-1})\Delta u(t+k-1) + E_k e(t+k) \quad (7)$$

$$\tilde{y}(t+k | t) = E(y(t+k)) \quad (8)$$

Nakon rekurzije Diophantske jednačbe dobije se:

$$\tilde{y}(t+k | t) = G_j(q^{-1})\Delta u(t+k-1) + f_k \quad (9)$$

ili u skrćenoj formi:

$$y = G \cdot u + f \quad (10)$$

Jedinični korak je:

$$\Delta u(t) = [1 \ 0 \ \dots \ 0]^T, \Delta u(t+1) = 0, \dots, \Delta u(t+N-1) = 0 \quad (11)$$

Matrica G se može napisati u općenitom obliku:

$$(G_k)_{i,j} = y_{i,j}(t+k+1) \quad (12)$$

$$y_{N12} = G_{N12} \cdot u_{N3} + f_{N12} \quad (13)$$

$$u_{N3} = [\Delta u(t)^T, \dots, \Delta u(t + N_3 - 1)^T]^T$$

$$f_{N12} = [f_{N1}^T, \dots, f_{N2}^T]^T \quad (14)$$

$$G_{N12} = \begin{bmatrix} G_{N1-1} & G_{N1-2} & \dots & G_{N1-N2} \\ G_{N1} & G_{N1-1} & \dots & G_{N1+N3} \\ \mathbf{M} & \mathbf{M} & \mathbf{M} & \mathbf{M} \\ G_{N2-1} & G_{N2-2} & \dots & G_{N2-N3} \end{bmatrix} \quad (15)$$

Izraz za kriterijsku funkciju može se preformulirati kao:

$$J = (G_{N123} \cdot u_{N3} + f_{N12} - w)^T \cdot \bar{R} (G_{N123} \cdot u_{N3} + f_{N12} - w) + u_{N3}^T \bar{Q} u_{N3} \quad (14)$$

$$\bar{R} = \text{diag}(R, \dots, R)$$

$$\bar{Q} = \text{diag}(Q, \dots, Q)$$

Optimalni predikcijski izlaz regulatora:

$$\hat{u}_{opt} = (G_{N123}^T \bar{R} G_{N123} + \bar{Q})^{-1} G_{N123}^T \bar{R} (w - f_{N12}) \quad (15)$$

U slučaju kotlovnice realizirat će se dva regulatora, jedan u ogrijevnom, a drugi u rashladnom dijelu kotlovnice. Kod ogrijevnog dijela kotlovnice definiramo slijedeće matrice:

$y_1 = T_{k1}$ – matrica temperature u kotlu 1, koju mjeri temperaturni osjetnik u ložištu kotla,

$\hat{y}_1 = T_{m,k1}$ – predikcijska matrica temperature u kotlu 1,

$w_1 = T_{k,ref1}$ – matrica referentne temperature u kotlu 1

$u_1 = x_{v1}$ – matrica pomaka kotve u elektromagnetskom ventilu primarnog kruga 1,

$\hat{u}_1 = x_{m,v1}$ – predikcijska matrica pomaka kotve u elektromagnetskom ventilu,

$y_2 = T_{pov1}$ – matrica temperature u povratnom vodu kotla1, koju mjeri temperaturni osjetnik u povratnom vodu kotla 1,

$\hat{y}_2 = T_{m,pov1}$ – predikcijska matrica temperature u povratnom vodu kotla 1,

$w_2 = T_{pov,ref1}$ – matrica referentne temperature u povratnom vodu kotla 1,

$u_2 = \Theta_{tv1}$ – matrica kuta zakreta u elektromotornom troputnom ventilu primarnog kruga 1

$\hat{u}_2 = \Theta_{m,tv1}$ – predikcijska matrica kuta zakreta u elektromotornom troputnom ventilu primarnog kruga 1,

$y_3 = T_{kon}$ – matrica temperature u polaznom vodu sistema konvektorskog grijanja, koju mjeri temperaturni osjetnik u polaznom vodu sistema konvektorskog grijanja,

$\hat{y}_3 = T_{m,kon}$ – predikcijska matrica temperature u polaznom vodu sistema konvektorskog grijanja,

$w_3 = T_{ref,kon}$ – matrica referentne temperature u polaznom vodu sistema konvektorskog grijanja,

$u_3 = \Theta_{kon}$ – matrica kuta zakreta u elektromotornom troputnom ventlu sistema konvektorskog grijanja,

$\hat{u}_3 = \Theta_{m, kon}$ – predikcijska matrica kut zakreta u elektromotornom troputnom ventilu sistema konvektorskog grijanja,

$y_4 = T_{kal}$ – matrica temperature u polaznom vodu sistema kaloriferskog grijanja, koju mjeri temperaturni osjetnik u polaznom vodu sistema kaloriferskog grijanja,

$\hat{y}_4 = T_{m, kal}$ – predikcijska matrica temperature u polaznom vodu sistema kaloriferskog grijanja,

$w_4 = T_{ref, kal}$ – matrica referentne temperature u polaznom vodu sistema kaloriferskog grijanja,

$u_4 = \Theta_{kal}$ – matrica kuta zakreta u elektromotornom troputnom ventilu sistema kaloriferskog grijanja,

$\hat{u}_4 = \Theta_{m, kal}$ – predikcijska matrica kut zakreta u elektromotornom troputnom ventilu sistema kaloriferskog grijanja.

$y_5 = T_{rad}$ – matrica temperature u polaznom vodu sistema radijatorskog grijanja, koju mjeri temperaturni osjetnik u polaznom vodu sistema radijatorskog grijanja,

$\hat{y}_5 = T_{m, rad}$ – predikcijska matrica temperature u polaznom vodu sistema radijatorskog grijanja,

$w_5 = T_{ref, rad}$ – matrica referentne temperature u polaznom vodu sistema radijatorskog grijanja,

$u_5 = \Theta_{rad}$ – matrica kuta zakreta u elektromotornom troputnom ventilu sistema radijatorskog grijanja,

$\hat{u}_5 = \Theta_{m, rad}$ – predikcijska matrica kut zakreta u elektromotornom troputnom ventilu sistema radijatorskog grijanja.

Za rashladni dio imat ćemo slijedeće matrice:

$y = T_s$ – matrica temperature u spremniku ledene vode, koju mjeri temperaturni osjetnik u spremniku ledene vode,

$\hat{y} = T_{m, s}$ – predikcijska matrica temperature u spremniku ledene vode,

$w = T_{s, ref}$ – matrica referentne temperature u spremniku ledene vode,

$u = I_{up}$ – matrica jakosti električne struje koja pokreće cirkulacijske pumpe.,

$\hat{u} = I_{m, up}$ – predikcijska matrica jakosti električne struje koja pokreće cirkulacijske pumpe.

Time su definirani regulatori za oba dijela kotlovnice.

ZAKLJUČAK

Teoretskom analizom modelskih regulatora i njihovom primjenom na jedan ovakav ovdje opisani sustav može se doći do slijedećih zaključaka:

- imaju mogućnost primjene na SISO i MIMO sustave,
- njihov princip rada je intuitivno lak za razumijevanje,
- jednostavnost podešavanja parametara regulatora (veza između parametara regulatora i ponašanja regulacijskog sustava nije složena),
- predikcijski regulatori primjenjivi su bez modifikacija na procese različitih karakteristika (statičke i astatičke, minimalno fazne i neminimalno fazne, s dobro i loše prigušenim polovima, sa ili bez mrtvog vremena),
- ograničenja procesnih veličina mogu se uzeti u obzir prilikom optimiranja izlazne veličine regulatora, što je vrlo važno, budući da su ograničenja procesnih veličina redovito prisutna kod stvarnih procesa,
- mogućnost korištenja raznovrsnih modela procesa (linearnih i nelinearnih),
- koncept predikcijskog upravljanja je otvoreni koncept, tako da danas postoje razne izvedne predikcijskih regulatora,
- moguće je vrlo jednostavno uvesti predupravljanje (*engl. feed-forward*) radi kompenzacije utjecaja mjerljivih poremećaja te radi poboljšanja slijedenja referentne trajektorije,

i) mogućnost korištenja unaprijed (a-priori) poznate referentne vrijednosti za formiranje vektora referentne trajektorije.

NAZIVLJE

Latinične oznake:

A – matrica sustava,

B – upravljačka matrica,

C – matrica izlaza,

D – ulazno-izlazna matrica

n_a – red polinoma $A(q^{-1})$,

n_b – red polinoma $B(q^{-1})$,

n_c – red polinoma $C(q^{-1})$,

n_d – red polinoma $D(q^{-1})$.

n_k – mrtvo vrijeme procesa u koracima uzrokovanja

$P(q^{-1})$ – monički polinom filtera signala predikcijskog izlaza procesa,

$Q_n(q^{-1})$, $Q_d(q^{-1})$ – polinomi filtera signala predikcijskog izlaza regulatora,

q^{-1} – operator jediničnog kašnjenja

x – vektor stanja sustava,

u – vektor stanja sustava,

y – vektor izlaza sustava,

Grčke oznake:

$\Delta = 1 - q^{-1}$ – diferencijalni operator

$\xi(k)$ – korelirana poremećena veličina koja djeluje preko filtera $C(q^{-1})/D(q^{-1})$ na izlaz procesa

ρ – težinski koeficijent upravljačkog signala.

BIBLIOGRAFIJA

1. Donjerković P. : "Osnove i regulacija sustava grijanja, ventilacije i klimatizacije, I i II dio", Alfa, Zagreb, 1996.
2. Camacho E.F., Bordons C. : "Model Predictive Control", Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, London, 1999.
3. Cambell W.J. : "Model Predictive Run-To-Run Control Of Chemical Mechanical Planarization", The University of Texas, Austin, 1999,

Ekonomičan i ekološki prihvatljiv!

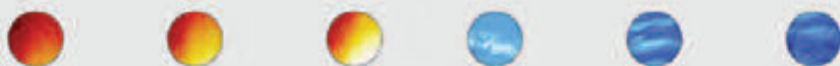


Viessmann ima odgovarajući novi kotao na drva **VITOLIG 150**. Dostupan u snagama od 18, 25, 40, 60 i 80 kW.

Viessmann d.o.o. Hrvatska
Dr. Luje Naletića 29
10000 Zagreb
Tel: 01/6593-650; Fax: 01/6546-793
E-mail: viessmann@viessmann.hr
www.viessmann.hr

VIESSMANN
more than heat

PLAMEN KOJI HLADI



Hrvatska Gospodarska Komora

• grijanje i hlađenje na plin

- propan butan i prirodni plin

ekološki prihvatljiv medij (bez upotrebe freona)
učinkovito grijanje i hlađenje uz očuvanje okoliša

ADRIA

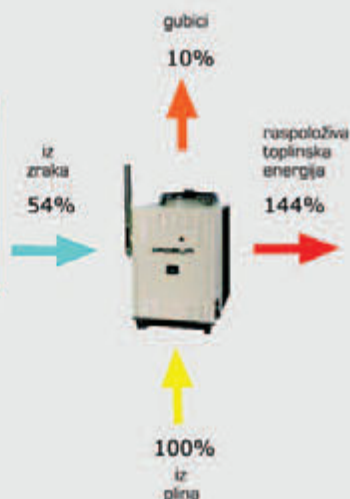
NOVO!

Visokoučinske plinske apsorpcijske dizalice topline:

- zrakom hlađeni kondenzator - samo grijanje (GAHP-A)
- zrakom hlađeni kondenzator - grijanje i hlađenje (GAHP-AR)
- zrakom hlađeni kondenzator - hlađenje + PTV (GA-HR)
- vodom hlađeni kondenzator - istovremeno hlađenje i grijanje (GAHP-W)

Visokoučinski plinski apsorpcijski:

- rashladnici vode (GA)
- rashladnici / grijači vode (GA)
- split sustavi za industriju i javne objekte (PRONTOCLIMA)
- rashladnici za procesnu industriju (GA-TK)
- rashladnici za industrijsko hlađenje (GA-LB)



TEHNOKOM

Hrvatska, 10000 Zagreb, Voćarska 15
tel. 01 4686 222, fax. 01 4635 637
e-mail: tehnikom@tehnokom.hr

U našem radu opredijelili smo se za promoviranje uštede energije, smanjenje gubitaka u energetske postrojenjima i termotehničkim instalacijama.

Naš tim visokokvalificiranih stručnjaka stoji Vam na raspolaganju.

Podrška projektantima i servis osigurani!



B

OBNOVLJIVI IZVORI ENERGIJE, ENERGETSKA I TERMOTEHNIČKA OPREMA

B1

A. BUSUTTIL, I. KURILJ, I. MAJCE, R. K. RAI: Izvedba održivog energetskog sustava na otoku - slučaj Vis 77

B2

M. CHALAVI, M. HOHNJEC, D. MALJKOVIĆ, M. SEVER, T. VIRKES: Izvedba održivog energetskog sustava na otoku - slučaj Šipan 78

B3

M. PERIĆ, V. KOROMAN, I. ČULJAK - Vodikov energetski sustav - moguće rješenje spremanja obnovljive energije 79

B4

T. RENGEL; D. ABRAMOVIĆ PRODAN; H. DECORTI - Osnove upravljanja na vodenoj strani u termotehničkim instalacijama 89

Skupina autora:
OBNOVLJIVI IZVORI ENERGIJE

U posljednjih nekoliko desetljeća, a posebice danas, na početku novog tisućljeća, obnovljivi izvori imaju sve veću ulogu u svjetskoj proizvodnji energije. Iako su neki od njih poznati i koriste se još od davnina obnovljivi ili alternativni izvori energije svoje 'mjesto pod suncem' (!) dobivaju u vrijeme prvih tzv. energetske krize, sedamdesetih godina prošlog stoljeća. Uz to, posljednjih godina čovjeku je sve više očito kako je prevelikim iskorištavanjem fosilnih goriva značajno i najvjerojatnije nepopravljivo oštetio

životni okoliš, ne samo sebe, već i svih vrsta na Zemlji. Nadamo se da će ovaj PRIRUČNIK ZA OBNOVLJIVE IZVORE ENERGIJE svakako povećati ne samo primjenu obnovljivih izvora, već i svijest o nužnosti njihove primjene. Uostalom, radi se o budućnosti svih nas!



izdanje 2002.
836 stranica
format A5

The Design of Sustainable Energy System on the Island – Case study: Island Vis.

Authors: Antoine Busuttil, Ivan Majce, Ivan Kurilj, Raj Kumar Rai

Many island power systems are powered by diesel generators or long underwater cables, which results in greater operating costs or losses than stand alone systems. It is therefore desirable to integrate renewable energy sources into these mini grids.

The main objective of the present project is to develop and present a more unified and generally applicable approach for assessing the technical and economical feasibility of isolated power supply systems with Renewable Energy sources.

In our study on one of the coast islands of Croatia -Vis - we will analyse and present Distributed intelligent load control to integrate RES up to 90% sustainability thus reducing losses, increase renewable energy penetration and cut diesel fuel consumption, whilst maintaining system stability and increasing job opportunities. Energy storage methods and possibilities are also analysed to ride through periods of generation deficit.

The results succeed to support the applicability of RES in the energy system of Vis and although there are of course many obstacles which impede the development of energy management, all in all it proves that the advantages outweigh the disadvantages.

The Design of Sustainable Energy System on the Island – Case study: Island Šipan

***Authors: Mehdi Chalavi, Marijan Hohnjec, Danica Maljković, Mark Sever,
Tomislav Vikres***

Croatia has 1185 island, rocks and reefs, of which 47 are inhabited. Demographic outlook of the Croatian island in the last hundred years is linearly decreasing considering number of inhabitants.

The question of sustainable development is the question of survival. In the previous century we were witnessing last technical revolution, a big population growth and an increase in energy consumption. Some experts in the field consider that there are two main factors that effect human society. The first one is a demographic factor, in this term demographic expansion is considered, and the second is the level of availability of resources, of any kind and so of energy as well, at a certain level of technological development.

The Island Šipan is the biggest and inhabited Elaphite island, with the population of 436 inhabitants in 2001. The goal of the project is to design a sustainable and renewable energy system at the highest possible level. The project was conducted in two phases. The first was the elaboration of the starting point and obtaining related data followed by the defined development plan of implementing renewable energy sources and their utilization as the primary energy source.

First, energy data base was made with the perspective of getting an inside looks of the energy consumption on the island and the basis for the further planning of the energy system was created. Energy consumption is directly related to the economical development of the island, and in that manner all available resources and development plans were taken into account. Potential for the exploration of the renewable energy sources was elaborated based on the location and meteorological records. Following, several possible solutions were modeled. With the reduction of the harmful emissions, economy and investment rate in sight two solutions were suggested.

The results showed that the solar power should be the leading source of energy, followed in the smaller ratio with the energy of wind. At present, this presents a high investment and operating cost, but with the trend of reduction of the solar appliances prices or the support from international of state/local fundings, systems that are suggested could be became feasible in the period less then their lifetime of 20 years. Anyhow, the environmental benefits of an almost renewable energy island and the possibility to even sell energy produced should not be overseen.

VODIKOV ENERGETSKI SUSTAV moguće rješenje spremanja obnovljive energije

Mario Perić, mr. sc. Vladimir Koroman, prof.dr.sc.; Ivan Čuljak mr.sc.
Brodarski institut d.o.o.

Av. Većeslava Holjevca 20, HR-10020, Zagreb
01 6504 347, 01 6504 400

peric@hrbi.hr; Vladimir.koroman@hrbi.hr; ivan.culjak@hrbi.hr

SAŽETAK

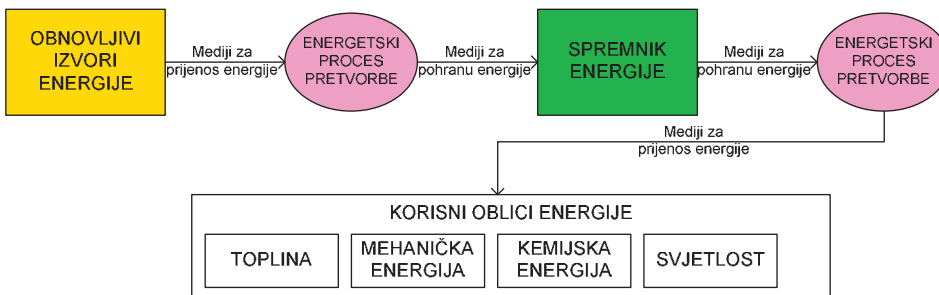
Porast potrošnje energije u posljednjih 30 godina doveo je do naglog razvoja novih energetske tehnologije. Posebno se to odnosi na razvoj obnovljivih izvora energije. Iako ekološki održive, kapacitetom neiscrpane, obnovljivi izvori energije manjkaju problemom raspoloživosti i cijenom. Razvojem industrije za proizvodnju opreme za iskorištavanje obnovljivih izvora energije s jedne te razvojem svijesti o važnosti održivog razvoja civilizacije može se postići smanjenje cijene energije. Raspoloživost energetske postrojenja utemeljenih na obnovljivim izvorima (sunce i vjetar) može se značajno povećati razvojem tehnika spremanja energije. Vodikov energetske sustav (VES) je moguće rješenje za spremanje velikih količina električne energije. VES čini podsustav proizvodnje vodika, transporta, spremanje vodika te potrošnja vodika kao energenta u gorivim ćelijama ili gorionim komorama. Ukratko je dan pregled podsustava VES-a s posebnim osvrtom na trenutno stanje na svjetskom tržištu. U radu je opisan koncept vodikovog sustava na primjeru spremanja energije iz vjetroelektrana i fotonaponskih elektrana.

KLJUČNE RIJČI

Vodik, obnovljivi izvori energije, spremanje energije

UVOD

Razvoj civilizacije koju poznajemo uglavnom je utemeljen korištenju fosilnih goriva i električnoj energiji. Svaka ljudska aktivnost koja zahtjeva veće količine energije zapravo nepovratno utječe na energetska ravnotežu u prirodi. Iako se to ne događa trenutno, kad-tad ljudska civilizacija će se suočiti s posljedicama narušavanju prirodne ravnoteže. Protokol iz Kyota obvezuje sve potpisnice na smanjenje emisije stakleničkih plinova u razdoblju 2008 do 2012. godine u odnosu na referentnu godinu za utvrđeni postotak. Smanjenje emisije CO₂ ujedno znači smanjenje korištenja termoelektrana za proizvodnju električne energije. Trajno rješenje pitanja globalne opskrbe energijom ni izbliza nije na vidiku. Jedno od perspektivnijih rješenja jest korištenje obnovljivih izvora energije. No pored niza slabosti (nekonkurentnost, male snage, velika investicije, slaba iskoristivost...) tu je i problem izrazite neprilagođenosti potrošnji s jedne kao i neraspoloživost s druge strane. Spremanje velikih količina energije proizvedenih iz obnovljivih izvora čini se jednim od mogućih rješenja.



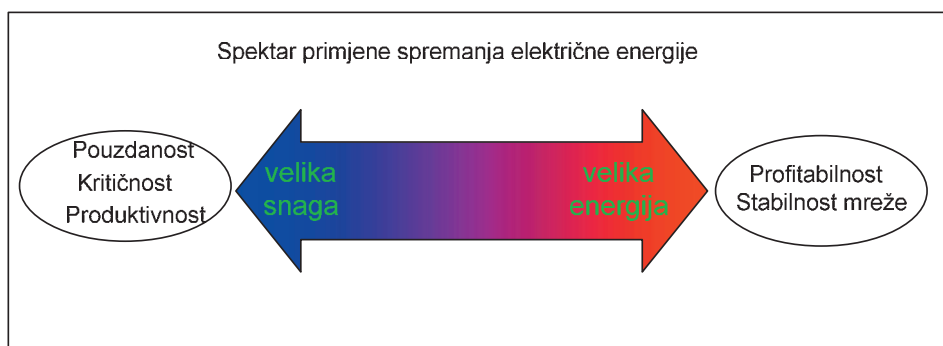
Slika 1. Pojednostavljeni proces obnovljivog energetskog sustava

Korisna energija (toplina, mehanički rad i svjetlost) lako se dobiva iz električne energije. Prema tome, problem spremanja energije iz obnovljivih izvora svodi se na proizvodnju električne energije iz obnovljivih izvora, spremanje električne energije te konačno proizvodnju električne energije iz spremnika. Paralelno s razvojem tehnologija za proizvodnju sustava obnovljivih izvora energije veliki napor treba uložiti na rješavanje spremanja velikih količina energije. Postoje rješenja izravne pretvorbe energije iz obnovljivih izvora u spremnički mediji, no te tehnologije su na početku razvoja.

SPREMANJE ENERGIJE – spremanje električne energije

Pod spremanjem energije obično se podrazumijeva korištenje takvih sustava koji određeni oblik energije mogu apsorbirati, pohraniti i nakon određenog vremena predati u istom ili nekom drugom obliku. Fosilna goriva su u širem smislu spremnik primarnog oblika energije. No, u današnje vrijeme obično pod spremanjem energije se smatra spremanje električne energije.

Temeljna zadaća svakog elektroenergetskog sustava je optimiranje proizvodnje u odnosu na potrošnju. Drugim riječima treba proizvoditi onoliko električne energije koliko se troši. Od početka razvoja elektrifikacije paralelno su se razvijali sustavi za spremanje energije. Brz razvoj izmjenične električne mreže ostavio je po strani problem „kako pospremiti električnu energiju za poslije“. No, prva naftna kriza početkom 70-tih godina prošlog stoljeća, otvorila je niz pitanja vezanih uz sigurnost centralnog načina proizvodnje i distribuirani način prijenosa i potrošnje električne energije. Razni mogući krizni scenariji kao što su nedostupnost fosilnih goriva, teroristički napadi i u konačnici globalni nestanak temeljnih energenta ove civilizacije – nafte, potakli su razvoj alternativnih izvora energije i spremanja energije. Kada je riječ o spremanju električne energije već postoje razna rješenja s velikim iskustvom u primjeni. Primjena spremanje električne energije proteže se od jako brzih intervencija na očuvanju razine kvalitete električne energije do više-satnih zaliha velikih količina električne energije za potrebe pokrivanja vršnih opterećenja. Spektar primjene spremanja energije slikovito se može prikazati na slici 2.



Slika 2. Spektar primjene spremanja el. energije

Spremanje električne energije u velikoj mjeri rješava problem kvalitete električne energije i proizvoda zbog kratkotrajnih ispada. Ovo se naročito odnosi na industriju osjetljivu na gubitak električkog napajanja

(proizvodnja mikročipova i elektroničke opreme). Na drugom kraju spektra, spremanje električne energije rješava problem vršnih opterećenja te s tim u vezi i problem profitabilnosti rada elektroenergetskog sustava. Naime u periodu smanjene potrošnje kada je cijena električne energije niska, energija se sprema za period velike potrošnje i visoke cijene. U sredini spektra je primjena spremanja energije u sustavima s obnovljivim izvorima energije o čemu se posebno govori u ovom članku.

Danas postoje razvijene mnoge tehnike spremanja električne energije kao što su: reverzibilne hidroelektrane, protočne akumulatorske baterije, rotirajući zamašnjaci, komprimirani zrak, te baterije PbSO₄, NiCd Li-ion, NMH itd.. Izbor tehnologije spremanja električne energije je između ostalog pitanje cijene, djelotvornosti, životnog vijeka, snage, kapaciteta ali i održivosti u smislu utjecaja na okoliš.

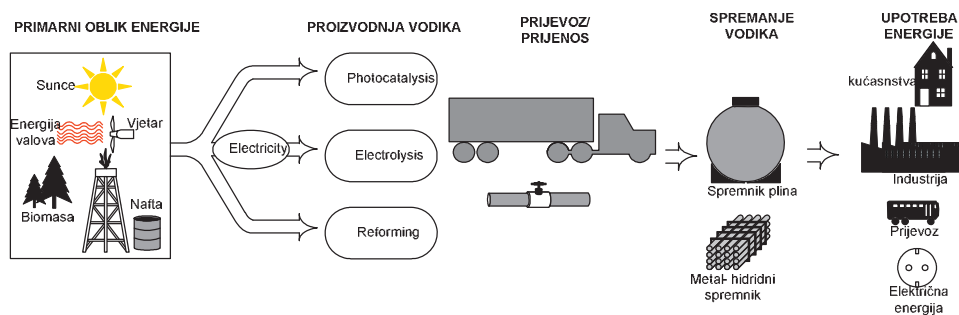
OBNOVLJIVI IZVORI ENERGIJE – PREDNOSTI I MANE

Tehnologija iskorištavanja obnovljivih izvora energije na današnjem stupnju razvoja i primjene predstavlja dobru osnovu za rješavanje problema održivog razvoja i globalne opskrbe energijom (GOE). Na žalost, prema današnjem statusu ovih tehnologija ne može se zaključiti da sami obnovljivi izvori energije (sunce, vjetar, biomasa, male hidroelektrane i dr.) mogu podnijeti sav teret globalne opskrbe energijom u budućnosti. Rješenje GOE biti će kompilacija konvencionalnih tehnologija; prvenstveno nuklearne energije i novih tehnologija iskorištavanja obnovljivih izvora energije. No obnovljivi izvori energije imaju niz prednosti koje ih čine atraktivnim rješenjem. Iskorištavanje obnovljivih izvora energije je potpuno ekološki prihvatljivo s praktički neiscrpnim rezervama. Fotonaponski sustavi su modularni energetske sustavi što ih čini atraktivnim u smislu proširenja s jedne i distributivnosti proizvodnje sa druge strane. Za razliku od centraliziranih sustava proizvodnje električne energije, fotonaponski sustavi su decentralizirani (krovni fotonaponski sustavi) što ih čini inherentno stabilnim s obzirom na rad i održavanje. S stajališta sigurnosti, mala gustoća energije po jediničnom proizvodnom objektu (snaga jednog modula nije veća od 200 W) je puno manji rizik nego u slučaju sinkronih generatora (snaga već od 100 MW). Međutim svi obnovljivi izvori energije imaju važan nedostatak, a ta je neusklađenost proizvodnje i potrošnje energije. Promjenjivost snage izvora otežava planiranje opskrbe kako samostalnih tako i mrežnih aplikacija sustava s obnovljivim izvorima energije. Drugim riječima operater električne mreže ne može se u potpunosti

osloniti na proizvodne kapacitete iz obnovljivih izvora. Nadalje, statistički maksimum proizvodnje (raspoložive snage) vremenski je pomaknut od statističkog maksimuma potrošnje električne energije. Ovaj nedostatak obično vodi predimenzioniranju sustava. Najviše se to odnosi na fotonaponske sustave.

VODIKOV ENERGETSKI SUSTAV

U vodikovom energetsom sustavu, vodik nije primarni izvor energije. Vodik je prijelazni oblik energije odnosno može se smatrati prijenosnikom energije. S obzirom da se određena količina energije troši za izoliranje molekularnog vodika (energetski zanimljiv) a određeni dio te energije se ponovo može restrukturirati, vodik se može nazvati gorivom. U širem smislu sva goriva (nafta, ugljen, zemni plin) nastala su akumuliranjem primarnih oblika energije koju u određenim uvjetima (temperatura paljenja, kisik i drugo) mogu pretvoriti u korisni oblik energije (mehaničku, toplinsku, kemijsku ili svjetlosnu). S druge strane vodik proizveden iz vode može vratiti dio energije proizvodnje te ga se stoga može smatrati spremnikom energije. Najvažniji podsustavi vodikovog energetsog sustava su: primarni oblik energije, proizvodnja vodika, prijenos/prijevoz, spremanje i potrošnja energije i/ili vodika. Na slici 3. prikazan je vodikov energetska sustav.



Slika 3. Vodikov energetska sustav

Korištenjem energije iz primarnih izvora vodik se najčešće može dobiva reformiranjem fosilne energije ili elektrolizom vode. Međutim najperspektivniji način proizvodnje vodika je elektroliza vode. Trenutno samo 4% godišnje proizvodnje vodika otpada na elektrolizu vode [1]. Proces je ekološki prihvatljiv jer elektroliza nema emisije stakleničnih plinova. Kao sirovina za proizvodnju vodika koristi se voda. Priprema vode za elektrolizu troši određenu količinu energije; demineralizacija,

dodavanje odgovarajućih soli za postizanje vodljivosti itd... No u zatvorenom sustavu, gdje voda kao sirovina ne izlazi iz zatvorenog kruga proizvodnje-spremanja-potrošnje, čistoća vode se može održavati na zadovoljavajućoj razini. Elektroliza morske vode nije prihvatljiva zbog emisije plinova na bazi klora. Temeljna jednadžba elektrolize je:



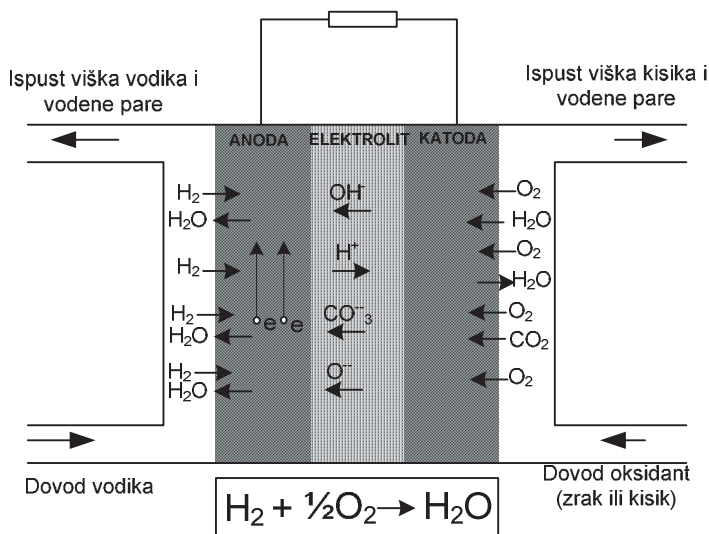
Teoretski elektrodni potencijal reakcije je 1,229 V dok u praksi napon elektrolize po ćeliji ide do 2 V. Postoje druge reakcije elektrolize, energetski povoljnije; kao što je elektroliza vodik-bromida no, zbog svojstava broma, ova reakcija je ekološki neprihvatljiva. Spremanje vodika je temelj spremanja energije u vodikovom energetskom sustavu. Postoje tri osnovna načina spremanja vodika; visoko-tlačni plinski spremnik; ukapljeni vodik; metal-hidridni sustav. Kriteriji uspoređivanja načina spremanja su potrošnja energije po m³ spremljenog vodika; gustoća spremljene energije (teoretski energetski ekvivalent vodika je donja ogrjevna moć: 10,8 MJ/Nm³). Važna karakteristika tlačnog spremnika plinovitog vodika je mehanička čvrstoća i inertnost s obzirom na molekularni vodik. Ako je tlak u spremniku 80 MPa gustoća vodika raste do 36 kg/m³ (400 puta) pri čemu je specifična energija spremanja 7,95 MJ/kg što predstavlja oko 6,5 % energetskog ekvivalenta spremljenog [2]. S druge strane, da se vodik spremi kao tekući plin treba ga ohladiti do 20 K pri čemu gustoća vodika raste do 70,8 Kg/m³. Energija potrebna za ukapljivanje iznosi 15,2 MJ odnosno 12% energetskog ekvivalenta vodika [2]. Konačno, metal hidridni spojevi su vrlo obećavajući način spremanja vodika s obzirom na gustoće spremanja. Vodik reagira s mnogim prijelaznim metalima i njihovim legurama. Elementi koji nemaju u potpunosti popunjene ljuske i podljuske atoma osobito su pogodni za spremanje vodika u svojoj kristalnoj strukturi. Kada se vodik veže za metal, određena količina topline se oslobodi. S druge strane kod oslobađanje vodika potrebno je dovesti toplinu. Postoji nekoliko metal hidrida u praktičnoj primjeni: MgH₂ (gustoća 101 kg/m³), Mg₂NiH₄ (81 kg/m³), FeTiH_{1,95} [2]. Iako se procesi spremanja i otpuštanja vodika teoretski provode uz konstantan tlak postoji izvjesna razlika između tlaka spremanja i tlaka otpuštanja. Vodik spremljen kao plin može ponovo vratiti dio pohranjene energije kao električna energija u gorivim ćelijama ili kao toplinska energija. Najpoznatija primjena vodika u prošlosti je raketno pogonsko gorivo. S druge strane vodik se može koristiti kao plinsko gorivo u gorionim komorama. Takvo korištenje

vodika rezultira stvaranjem NO_x plinova zbog velike količine dušika u zraku koji se koristi kao oksidant.

Gorive ćelije

Kada je riječ o proizvodnje energije jedna od najzanimljivijih primjena vodika jest izravna proizvodnja električne energije korištenjem gorivih ćelija. Molekularni vodik se reducira s kisikom pri čemu nastaje voda. Uz prisustvo katalizatora i elektrolita, promjena slobodne energije reakcije pretvara se u rad nabijenih čestica. To je zapravo obrnut proces od elektrolize. Standardni elektrodni potencijal reakcije vodika i kisika iznosi 1,23 V [3]. No uzimajući u obzir polarizaciju elektroda i omskih gubitaka izlazni napon gorive ćelije iznosi 0,6 do 0,8 V. Postoji nekoliko vrsta gorivih ćelija s obzirom na tip elektrolita. *Alkalne* gorive ćelije imaju KOH kao elektrolit. Visokotemperaturna izvedba ovog tipa gorivih ćelija ima elektrolit sa 85% KOH a nisko temperaturna s 35 %. Radni napon ćelija kreće se u području 0,85-0,93 V s gustoćama struje 200-500 mA/cm^2 . *Goriva ćelija s polimernom membranom* kao elektrolitom (PEM) je niskotemperaturna (60-80°C) goriva ćelija. Zbog vrlo tankog elektrolita (12-20 mikrona) ovaj tip se sve više koristi u mobilnim sustavima ali i u malim stacionarnim energetske postrojenjima. Radni napon ovog tipa ćelija kreće se u granicama od 0,65 do 0,8 V (struje: 200 – 800 mA/cm^2). Gotovo ista anodna i katodna reakcija kao u polimernim gorivim ćelijama odvija se u *ćelijama sa fosfornom kiselinom* kao elektrolitom. Radna temperatura je 150-220 °C, napon se kreće u granicama od 0,6 do 0,72 V a struja od 150 do 400 mA/cm^2 . Posebna grupa gorivih ćelija su visokotemperaturne gorive ćelije. Pored ovih postoje i visokotemperaturne gorive ćelije (600 – 1000 °C) koje se najčešće koriste za stacionarnu proizvodnju električne energije. Ovisno o izvedbi, djelotvornost gorivih ćelija iznosi 0,5 do 0,75%. Teoretska djelotvornost gorivih ćelija definira se kao omjer slobodne energije reakcije i gorive moći (0,83 % za gornju gorivnu moć i 0,98 za donju) [3]. Realna vrijednost djelotvornosti je puno manja zbog napon polarizacije i napon aktivacije te pada napona na unutrašnjem omskom otporu. Daljnjem padu djelotvornosti uzrok je neiskorišten vodik odnosno neusklađenost protoka vodika i struje opterećenja. To je tzv: Faradejeva djelotvornost.

$$\eta = \frac{nFE^0}{\Delta H} \frac{V}{E^0} \frac{I}{nF \dot{m}} = \frac{IV}{\Delta H \dot{m}} \quad (2)$$



Slika 4. Shematski prikaz rada i reakcija raznih tipova gorivih ćelija

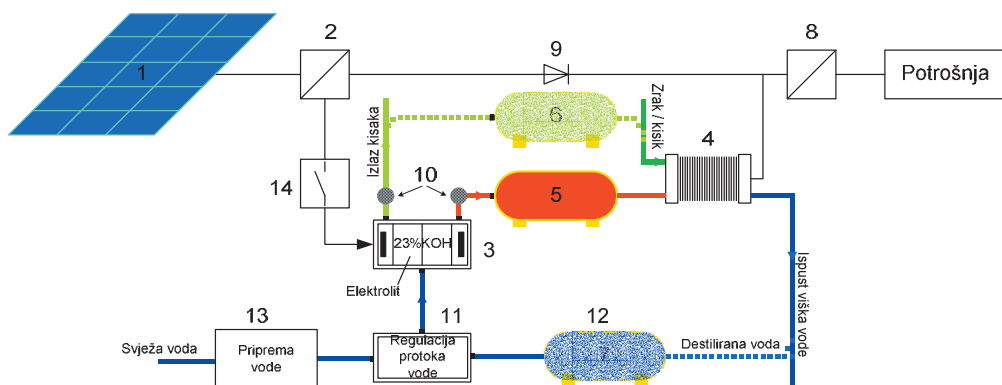
SPREMANJE ENERGIJE IZ OBNOVLJIVIH IZVORA

Spremanje energije iz obnovljivih izvora korištenjem elektrolize vode principijelno se ne razlikuje od spremanja energije iz ma kojeg drugog izvora, kako je to prikazano na slici 1. S obzirom na činjenicu da efikasno spremanje energije iz obnovljivih izvora rješava niz inherentnih slabosti OIE te da se za to može koristiti vodik; tzv. *obnovljivi vodikov energetski sustav* čini se gotovo idealnim energetskim sustavom (čist, obnovljiv i obilan). No, ne smije se zaboraviti da tržišna ekonomija percipira samo konkurentne i profitabilne investicije. Na žalost mehanizmi evaluacije profitabilnosti i konkurentnosti ne uzimaju u obzir održivost razvoja, utjecaj na okoliš, socijalnu pravednost i uopće raspoloživost odnosno dostupnost konvencionalnih energenata svim ljudima svijeta.

Fotonaponski vodikov energetski sustav (FNVES)

Fotonaponski sustav male i srednje snage spojen na razdjelnu električnu mrežu obično ne treba nikakav spremnik. Pogotovo to vrijedi ako je u globalnu opskrbu energijom zakonom predviđeno uključivanje fotonaponskih sustava. S obzirom na veličinu sama električna mreža je svojevrsni spremnik. Kada je riječ o velikim FNS-ima snage veće od 5 MW, spremanje energije je potrebno s obzirom na raspoloživosti postrojenja. Kada je riječ o samostalnim sustavima za opskrbu električnom energijom potrebno je riješiti dva problema spremanja

energije. Prvi se odnosi na spremanje energije u ciklusu noć – dan te potrebe rezervnog napajanja. Drugi se odnosi na sezonsko spremanje čime se može smanjiti predimenzioniranost fotonaponskog agregata. Spremanje vodika za stacionarne sustave mora zadovoljiti uvjete niske specifične energije spremanja, niske vrijednosti gubitaka ali ne nužno zadovoljiti uvjete kompaktnosti spremnika. Po svemu sudeći, spremanje vodika u metal hidride čini se ozbiljnim kandidatom za ovu primjenu. U pilot postrojenjima solarno vodikovog sustava koji su inače snaga do 20 kW (*Schatz Solar Hydrogen Project*), spremanje vodika se obično izvodi u tlačnom spremniku [4]. Na slici 5 prikazana je pojednostavljena shema fotonaponskog vodikovog sustava sa zatvorenim krugom voda-vodik.



Slika 5 Shema fotonaponskog vodikovog energetskog sustava

Opis rada : fotonaponski agregat (1) čine moduli međusobno serijski-paralelno spojeni ovisno o nazivnom naponu i snazi predaju električnu energiju posredno preko regulatora snage agregata i (8) regulatora napona potrošaču. Višak električne energije se dovodi u komoru za elektrolizu (3). U komoru se dovodi destilirana voda. Elektroliza takve vode nije moguće bez dodavanja primjesa soli (KOH) čime ona postaje vodljiva. Protok vode se regulira (11) s obzirom na struju elektrolize čime se postiže bolje iskorištenje elektrolize [5]. Crpke (10) omogućavaju protok plinova vodika i kisika u spremnike (5) odnosno u (6). Kada proizvodnja fotonaponskog agregata ne zadovoljava potrošnju, vodik i kisik (ili zrak) se dovode u gorivu ćeliju koja proizvodi električnu energiju. Produkt rada gorive ćelije je destilirana voda koja se vraća u spremnik.

Vjetroturbinski vodikov sustav (VTVES)

Slično fotonaponskom vodikovom sustavu VTVES također izravno opskrbljuje potrošače a višak sprema posredstvom elektrolize vode u vodik koji se zatim na sličan način sprema u tlačne spremnike ili metal hidride. Najčešća razlika je u tome što izmjenični napon asinkronog vjetrogeneratora valja pretvoriti u istosmjerni napon [6]. S druge strane, sezonske razlike u proizvodnji električne energije nisu toliko izražene kao u fotonaponskim sustavima.

ZAKLJUČAK

Obnovljivi izvori energije u budućnosti biti će vrlo važni nosioci globalne opskrbe energijom. Iako ekološki atraktivni, s gotovo neiscrpnim zalihama energije, velike početne investicije ne idu u prilog konkurentnosti naspram konvencionalnih izvora. Tomu treba pridodati opće ekonomske trendove koji na nedovoljan način uzimaju u obzir zaštitu okoliša i cjelokupnu održivost razvoja civilizacije. Inherentna slabost obnovljivih izvora energiji (neraspoloživost) rješiva je spremanjem energije u vremenu od 10 sati do tjedan dana. S obzirom na izdašnost, raznovrsnost primjene vodikov energetski sustav nameće se kao idealno rješenje spremanja energije iz obnovljivih izvora.

BIBLIOGRAFIJA

1. Dunn, S., *Hydrogen Futures: Toward a Sustainable Energy System*, *Hydrogen Energy*, br. 27, str. 235 - 264, 2002.
2. Zütel, A., *Materials for Hydrogen Storage*, *Materials Today*, rujana 2003, str. 24-33.
3. Linden D., Reddy, T. B., *Handbook o Batteries*, McGraw-Hill, New York, 1995.
4. Lehman, P. A., Chaberlin, C. E., Pauletto G., Rocheleau, M. A., *Operating Experience With a Photovoltaic Hydrogen Energy System*, *Hydrogen Energy*, svezak 22, br. 5, str. 465-470, 1997
5. Pyle, W., Healy J., Cortez R., *Solar Hydrogen Production by Electrolysis*, *Home Power* br. 39, veljača/ožujak 1994, str 32 - 38
6. Dutton, A. G, Bleijs, J. A. M., Dienhart, H., Falchetta, M., Hug, W., Prischich, D., Ruddell A.J. *Experience in the Design, Sizing, Economics, and Implementation of Autonomous Wind - Powered Hydrogen Production Systems*, *Hydrogen Energy*, br. 25, str 705-722, 2000

Osnove upravljanja na vodenoj strani u termotehničkim instalacijama

Tihomir RENGEL, dipl.ing.; Damir ABRAMOVIĆ PRODAN, dipl.ing.;
Hrvoje DECORTI, dipl.ing.
DHT PROJEKT d.o.o.
Malešnica 54, Zagreb, Hrvatska
Tel/fax: + 385 1 66 79 874
e-mail: tihomir.rengel@dhtprojekt.hr

SAŽETAK

Regulacijski ventili su izvršni elementi na vodenoj strani u sustavima termotehničkih instalacija. Regulacijski ventili mogu biti prolazni ili troputi, ovisno o namjeni i položaju u hidrauličkom krugu. Tako razlikujemo nekoliko položaja ugradnje regulacijskih ventila. Položaji mogu biti takovi da čine razdjelni krug, miješajući krug, prigušni krug ili ubrizgavajući krug.

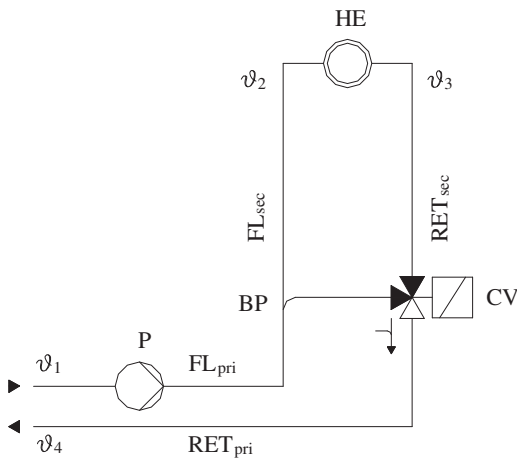
KLJUČNE RIJEČI

Regulacijski ventil, razdjelni krug, mješajući krug, prigušni krug, ubrizgavajući krug

Osnovni hidraulički krugovi

Postoje četiri osnovna hidraulička kruga koji se koriste u sustavima termotehničkih instalacija. To su u ovisnosti o položaju ugradnje razdjelni krug, miješajući krug, prigušni krug i ubrizgavajući krug.

Razdjelni krug



Ilustracija 1. Osnovni dijagram razdjelnog kruga sa regulacijskim ventilom

- HE = izmjenjivač topline
- BP = premosnica
- P = crpka
- CV = ventil za miješanje
- FL_{pri} = primarni krug (primarni polaz)
- FL_{sec} = sekundarni krug (sekundarni polaz)
- RET_{pri} = primarni povrat
- RET_{sec} = sekundarni povrat
- ϑ_1 = nominalna temperatura u primarnom krugu
- ϑ_2 = nominalna temperatura u primarnom krugu (temperatura na ulazu u izmjenjivač topline)
- ϑ_3 = nominalna temperatura u sekundarnom krugu (temperatura na izlazu iz izmjenjivača topline)
- ϑ_4 = nominalna temperatura u primarnom povratu

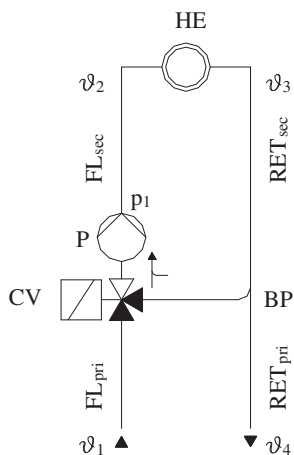
Ilustracija 1. prikazuje miješajući ventil instaliran u skretni krug. Ventil dijeli protok na primarni krug (kotao → crpka → premosnica → regulacijski ventil → kotao) i na sekundarni krug (premosnica → sekundarni protok → izmjenjivač topline → sekundarni povrat → regulacijski ventil). Kada je regulacijski ventil zatvoren, sva voda koja cirkulira kroz sustav pomoću pumpe, P, je usmjerena s primarnog polaza [FL_{pri}] na primarni povrat [RET_{pri}]. U svakom međupoložaju regulacijskog ventila, određeni omjer ukupnog volumenskog protoka vode ulazi s temperaturom ϑ_1 u izmjenjivač topline. Ovaj volumen

određuje količinu topline Φ [kW] koju izmjenjivač topline može prenijeti na sekundarni medij. Ovo upućuje na upravljanje količinom. Treba primijetiti kako kod upravljanja količinom, veza između količine protoka i prijenosa topline u izmjenjivaču topline nije linearna. Nadalje treba primijetiti da je kod niskih opterećenja, sekundarni medij (uzduh ili voda) podvrgnut temperaturnoj stratifikaciji, te je upotreba ovog tipa kruga kod komforne primjene ograničena.

Ovisno o položaju ventila, određeni omjer površinskog područja rashladne cijevne baterije postići će temperaturu rosište, i odgovarajući omjer zraka koji struji kroz bateriju biti će odvlažen. Prednost ovog kruga je da osigurava konstantno parcijalno odvlaživanje koje je proporcionalno rashladnom učinku. U temperaturno kontroliranom sustavu (miješajući ubrizgavajući krug), za razliku, odvlaživanje se zbiva najjednom čim temperatura medija padne ispod temperature rosišta.

Prema većim temperaturnim gradijentima koji se mogu zbivati u ovakvim krugovima, oni se mogu koristiti samo tamo gdje dobavna temperatura zraka na izlazu iz izmjenjivača topline nije kritična, npr. za zone dogrijavanja i sustave grijanja zrakom koji ne koriste vanjski zrak. Ovaj tip kruga nje prikladan za predgrijače zbog velikog rizika od smrzavanja.

Miješajući krug



Ilustracija 2. Osnovni miješajući krug

- HE = izmjenjivač topline
- BP = prenosnica
- P = crpka

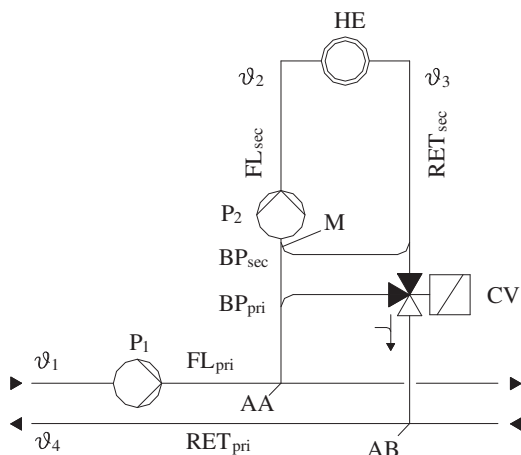
CV	=	ventil za miješanje
Fl_{pri}	=	primarni krug (primarni polaz)
Fl_{sec}	=	sekundarni krug (sekundarni polaz)
RET_{pri}	=	primarni povrat
RET_{sec}	=	sekundarni povrat
ϑ_1	=	nominalna temperatura u primarnom krugu
ϑ_2	=	nominalna temperatura u primarnom krugu (temperatura na ulazu u izmjenjivač topline)
ϑ_3	=	nominalna temperatura u sekundarnom krugu (temperatura na izlazu iz izmjenjivača topline)
ϑ_4	=	nominalna temperatura u primarnom povratu
p_1	=	tlak na izlazu iz crpke

Kod ovog kruga, ukupni volumen vode se konstantno tlači kroz izmjenjivač topline, pa kod zahtjeva za utjecanjem na toplinski izlaz, potrebno je regulirati temperaturu vode (ilustracija 2.).

Kada je regulacijski ventil zatvoren, crpka tlači vodu od ventila kroz polaz, izmjenjivač topline, povrat i premosnicu natrag u ventil. Kako se regulacijski ventil otvara, samo dio ukupnog volumena struji kroz premosnicu, ovisno o veličini otvorenosti ventila. Ostatak se tlači natrag do kontrolnog ventila putem primarnog povrata, kotla i primarnog polaza. Oba djelomična opterećenja se miješaju u regulacijskom ventilu. Ovo upućuje na „temperaturno upravljanje miješanjem“.

Prilagodbe miješanjem koriste se u sustavima kondicioniranja zraka svugdje gdje se zahtijeva varijabilna temperatura vode u izmjenjivaču topline i gdje nema tlaka crpke na primarnoj strani. Prednost miješajućeg kruga u usporedbi sa razdjelnim krugom je da ostvaruje emisiju topline preko cijele površine izmjenjivača topline. Ovo je rezultat konstantnog protoka q_v , jer je sva voda koja prolazi kroz izmjenjivač topline približno iste temperature. Kao posljedica, postoji samo mali temperaturni gradijent u sekundarnom mediju. Kako točka smrzavanja vode pada s tlakom i pomicanje raste, rizik od smrzavanja je manji kada je crpka u funkciji. U malim sustavima grijanja, miješajući krug može se koristiti bez primarne crpke osiguravajući da zahtjevi proizvođača za rad kotla i minimum protoka budu striktno udovoljeni.

Ubrizgavajući krug



Ilustracija 3. Osnovna shema ubrizgavajućeg kruga sa troputnim miješajućim ventilom

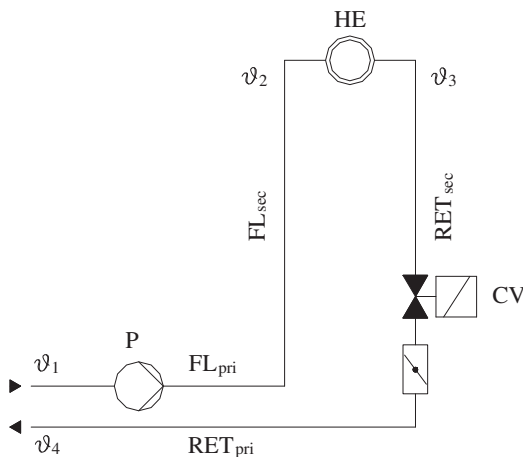
- HE = izmjenjivač topline
- P₁ = crpka u primarnom krugu
- P₂ = crpka u sekundarnom krugu
- CV = ventil za miješanje
- M = mješalište
- BP_{sec} = premosnica sekundarnog kruga
- BP_{pri} = premosnica primarnog kruga
- ϑ_1 = nominalna temperatura u primarnom krugu
- ϑ_2 = nominalna temperatura u primarnom krugu
(temperatura na ulazu u izmjenjivač topline)
- ϑ_3 = nominalna temperatura u sekundarnom krugu
(temperatura na izlazu iz izmjenjivača topline)
- ϑ_4 = nominalna temperatura u primarnom povratu

Ako kao rezultat distribucijskog cjevovoda postoji razlika tlaka između poveznih točaka AA i AB odvojaka do izmjenjivača topline, ovo se može upotrijebiti za svladavanje otpora regulacijskog ventila. Kada je regulacijski ventil zatvoren, sekundarna crpka P₂ tlači vodu od točke M preko sekundarnog protoka, izmjenjivača topline, sekundarnog povrata i

sekundarne prenosnice natrag do točke miješanja M. Primarni protok vode potreban za ovu zonu je tjeran primarnom crpkom P_1 od spojne točke AA prema prenosnici primarnog kruga kroz regulacijski ventil i natrag do spojne točke AB. Kada se regulacijski ventil otvori, određeni volumen vode (definiran otvorenošću ventila) je ubrizgan u točku miješanja M iz primarne struje u sekundarni krug; u isto vrijeme, ekvivalentni volumen napušta sekundarni krug prema povratu i regulacijski ventilu. Nadalje, u ubrizgavajućem krugu, otpor regulacijskog ventila pokorava se primarnoj crpki.

Kako je sekundarni krug potpuno za sebe, bez obzira na položaj kontrolnog ventila, također je moguće tlačiti različite volumene vode kroz dva hidraulička kruga. Ovo osigurava mogućnost za djelovanje različitim temperaturnim razlikama u dva kruga, npr. $110^{\circ}\text{C}/70^{\circ}\text{C}$ u primarnom krugu i $90^{\circ}\text{C}/70^{\circ}\text{C}$ u sekundarnom krugu.

Prigušivački krug



Ilustracija 4. Osnovni dijagram prigušivačkog kruga

- HE = izmjenjivač topline
- P = crpka
- CV = ventil za miješanje
- Fl_{pri} = primarni krug (primarni polaz)
- Fl_{sec} = sekundarni krug (sekundarni polaz)
- RET_{pri} = primarni povrat
- RET_{sec} = sekundarni povrat

$\vartheta_1 - \vartheta_2$ = nominalna temperatura pri $Fl_{pri} = Fl_{sec}$

$\vartheta_3 - \vartheta_4$ = nominalna temperatura pri RET_{sec} = nominalna temperatura pri RET_{pri}

Kod ovog kruga, volumenski protok regulira se regulacijskim ventilom, što upućuje na regulacijski krug protokom. Kada je ventil skroz otvoren, tlak pumpe p_1 tjera vodu kroz izmjenjivač topline s nominalnim protokom. Kada je ventil u bilo kojem međupoložaju, opterećenje je samo djelomično. Volumen i temperatura vode su isti u primarnom i sekundarnom krugu. Međutim, kako volumen vode varira, tako varira i količina topline Φ [kW] prenesena sekundarnom mediju (uzduhu ili vodi) putem izmjenjivača topline.

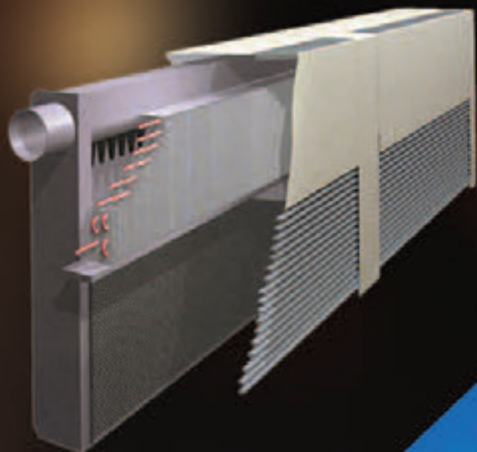
Kao kod skretnog kruga, i ovdje je važno primijetiti da prijenos topline na izmjenjivaču topline nije linearan, i da je sekundarni medij podložan fluktuacijama temperature. Kako se pad tlaka Δp_{HE} u izmjenjivaču topline javlja u sekciji varijabilnog protoka, veličina ventila je i tu od velike važnosti, i esencionalno je provjeriti veličinu P_v u odnosu na raspoloživi pad tlaka Δp_{av} .

Zbog temperaturnih razlika, ovaj tip kruga preporučuje se za korištenje samo tamo gdje se dobavna temperatura zraka na izlazu iz izmjenjivača topline ne treba kontrolirati, npr. za zone dogrijavanja i sustave grijanja zrakom koji ne koriste vanjski zrak. Ozbiljan rizik od smrzavanja čini ovaj tip kruga neprihvatljivim za predgrijače.

BIBLIOGRAFIJA

- [1] Donjerković, P., *Osnove i regulacija sustava grijanja, ventilacije, klimatizacije*, ALFA d.d., Zagreb, 1996.
- [2] Recknagel, H., Sprenger, E., Schramek, E.R., *Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik*, R. Oldenburg Verlag GmbH, München, 1997.
- [3] Tobert Petitjean, *Total Hydronics Balancing*, Tour&Andersson Hydronics AB, Responstryck, Boras, Sweden, 1997.
- [4] Steafa Control System, *The control device in water circulation*, Staefa, Switzerland, 1995.





OSTANIMO
NA VRHU

TROX[®] TECHNIK

GARANCIJA DOBRE KLIMATIZACIJE

*Decentralni fasadni
ventilacijski i klimatizacijski uređaji FSL*



TROX Austria GmbH, Predstavništvo u RH
Cvijete Zuzorić 37, 10000 Zagreb
tel: 01/615 54 01, 615 54 02, faks: 01/615 85 98
e-mail: trox-austria@zg.htnet.hr, www.trox.hr



interklima 2005



**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE,
STROJARSTVA I BRODOGRADNJE
U SPLITU**

KATEDRA ZA TERMOTEHNIKU
www.kt.fesb.hr

KARAKTERISTIKE UREĐAJA:

- ✓ Hlađenje prostora ljeti i grijanje istog prostora zimi, ostvaruje se na isti način kao kod klasičnog split-klima uređaja.
- ✓ Ljeti istovremeno sa hlađenjem prostora potrošna voda se grije potpuno besplatno na račun otpadne topline.
- ✓ Zimi, istovremeno sa grijanjem prostora grije se i potrošna topla voda, što znači da uređaj mora nešto duže raditi, ali je dobivena toplina oko tri puta jeftinija.
- ✓ Kada nije potrebno niti hlađenje niti grijanje prostora voda se grije na isti način kao u zimskom režimu.



**KLIMA
BOJLER
UREĐAJ !!!**

***Za prosječni životni vijek
instalacije ostvaruju se
uštede u vrijednosti od
2 do 4 potpuno nova uređaja !!!***

U SURADNJI SA :

KONČAR
KUĆANSKI APARATI d.o.o
Žitnjak bb. 10 001 Zagreb
Tel: 01/ 2404 555

FRIGOS d.o.o
21 315 Dugi Rat
Mob: 098/265-651
Fax:021/305-893



Inovativni kondenzacijski uređaji: **JUNKERS** nudi sve od veličina S do XL

Kompletna ponuda od
22 - 90 kW!



Kao inovativni ponuđač toplinske tehnike, **JUNKERS** nudi za svaku situaciju ugradnje i učinak odgovarajući kondenzacijski aparat. Sada zaista možete profitirati na uštedeti energije, a istodobno čuvati okolinu. K tome dolazi još i

jednostavno rukovanje, montaža i održavanje. **Cerasmart**, **Cerasmart Modul**, **Cerapur** ili **Cerapur Maxx** - pravilna odluka za vaš dom. I toplina za život.

Toplina za život

ROBERT BOSCH d.o.o. • Područje **JUNKERS** • Kneza Branimira 22 • 10040 Zagreb
tel: 01/295 80 81 • fax: 01/295 80 60 • junkers@hr.bosch.com • www.bosch.hr

 **JUNKERS**
Bosch Grupa

KONDEZACIJSKI UREĐAJI JUNKERS

Zanimljivost kondenzacijske tehnike nije samo u rješenju gotovo potpunog iskorištenja topline sadržane u dimnim plinovima, već i u samom razvitku ideje. Kondenzacija predstavlja jedno od rjeđih znanstvenih saznanja koja su prošla dugotrajan put od gotovo 100 godina do iskoristive tehničke izvedbe, odnosno do trenutka kada je proizvodna tehnologija dosegla stupanj isplativosti serijske proizvodnje kondenzacijskih uređaja.

Hugo Junkers bio je čovjek ispred svojeg vremena, što je dokazao mnoštvom jedinstvenih tehničkih rješenja koja su s vremenom počela predstavljati standarde u tehnici grijanja i u zrakoplovstvu. Njegov izum patentiran 1893. godine predstavlja ujedno prvi koncept kondenzacijske tehnike. Ispitujući mogućnosti izmjere količine vodenog kondenzata koji nastaje potpunim izgaranjem energenta, Hugo Junkers izumio je i patentirao ne samo prvi kalorimetar, koji se usput rečeno, zapravo i danas koristi u nešto unaprijeđenom obliku, već i skice prvog kondenzacijskog uređaja. Godine 1985. tvornica Junkers je i na tržište uvela prvi svjetski kondenzacijski uređaj. Svijet grijanja u tom je trenutku promijenjen. Postavljen je standard današnjice i budućnosti kojem se svijet postupno prilagođava.

Koncept današnjeg kondenzacijskog uređaja Junkers proizlazi upravo iz duge tradicije i saznanja koja su istovremenim razvitkom mehaničkih i elektroničkih komponenata dovela do danas optimalnog korisničkog komfora, iskoristivosti i pouzdanosti koje današnji uređaj može ponuditi.

Izmjenjivači topline izrađeni su kod svih kondenzacijskih uređaja Junkers od legure Al-Si kojoj udjio silicija od 9 do 10 % daje izuzetnu korozijsku postojanost i vrlo dobru livljivost, važnu za preciznu izradu što veće površine izmjene topline postignute velikim brojem prolaznih kanala. Plamenik izrađen od nehrđajućeg čelika nalazi se s gornje strane izmjenjivača topline te se kod uređaja Junkers može u pojedinim kondenzacijskim uređajima naći u dvije izvedbe: s otvorima za protok gorive smjese plina i zraka promjerom prilagođenim pojedinim područjima rasporeda tlaka smjese ili s oblogom od metalne vune. Uređaji su opremljeni elektronički upravljanim ventilatorima promjenjivog broja okretaja, koji u skladu s potrebom za toplinom kroz usisnu cijev uvlače određenu količinu zraka. S obzirom na protok zraka, u cijevi plinskog ventila spojenoj na zračnu usisnu cijev stvara se potlak koji uzrokuje miješanje točno određene količine plina i zraka. Nastala goriva smjesa provodi se do plamenika i tamo izgara stvarajući dimne plinove koji, među ostalim sastojcima, sadržavaju određenu količinu vodene pare. Prolazeći kroz izmjenjivač dimni plinovi uslijed velike površine izmjene topline predaju toplinu prijenosnom mediju sve do



kondenzacije vodene pare. Nastali kondenzat odvodi se kroz sifon u odvodni ili poseban akumulacijski sustav, dok se preostali dimni plinovi temperature oko 40 °C odvođe kroz dimovodni sustav u atmosferu.

Povećanje korisničkog komfora prvenstveno je posljedica velikog broja mogućnosti ostvarenih naprednom elektronikom. Osim regulacije vođene vanjskom temperaturom, većeg broja isključenja i uključenja grijanja i pripreme potrošne tople vode, mogućnosti vođenja odvojenih krugova grijanja i niza drugih korisničkih mogućnosti, Bosch Heatronic elektronika nadgleda sve radne funkcije uređaja. Ujedno je CAN-BUS kompatibilna što omogućava napredni prijenos informacija između uređaja i vanjskih elektroničkih komponenata. U ponudi uređaja Junkers nalazi se trenutno najšira svjetska prodajna paleta s obzirom na snagu uređaja. Promatrajući podesivu snagu zidnih uređaja kupcu je na raspolaganju raspon od 3 do čak 90 kW, raspoređeno u tri skupine uređaja koje se nadalje razlikuju i po elektroničkoj opremljenosti. Na taj je način u potpunosti pokrivena svaka potreba potencijalnog kupca trenutno najbogatijim brojem kombinacija snage i opremljenosti. Već poznate linije Cerasmart, Cerapur i Cerapurmaxx stalno se usavršavaju, prema već poznatoj krilatici grupacije Bosch: 'Tradicija inovacije'. Od novih uređaja svakako je za istaknuti Cerasmartmodul, kondenzacijski uređaj podesive snage 8 - 30 kW s integriranim slojevito punjenim spremnikom potrošne tople vode od 150 l smještenim s donje strane. CrossMatrix spojna tehnika omogućava spoj instalacije s bilo koje strane uređaja. Junkers je, nadalje, na prošlom sajmu ISH u Frankfurtu predstavio patent mehaničke zaklopke koji omogućava priključak 5 kondenzacijskih uređaja na jedan dimovodni sustav zgrade.

Uređaj Cerapurmaxx nudi mogućnosti izbora maksimalne snage zidnog kondenzacijskog uređaja 65 ili 90 kW. Uređaji linije Cerapur maksimalnih snaga 28 kW u izvedbi grijanja ili kombiniranoj izvedbi te 42 kW u izvedbi grijanja vrhunski su elektronički opremljeni.

Trenutno najveća moguća iskoristivost energenta, pouzdanost i trajnost, zajedno s najbogatijom opremljenošću prilagođenom korisnicima i stručnjacima održavanja čine ove uređaje prvenstvenim izborom današnjice. Ekološka prihvatljivost, uz navedene prednosti, čine ga i obaveznim izborom budućnosti.



interklima 2005

C

SUSTAVI ZA GRIJANJE, VENTILACIJU, KLIMATIZACIJU, HLAĐENJE

C1

V. SOLDO, V. ZANKI ALUJEVIĆ, M. GROZDEK,
T. ĆURKO - Svojstva zamjenskih radnih tvari 109

C2

D. JANKOVIĆ - Analiza isplativosti uvođenja novog rashladnog sistema s kaskadnim CO₂/NH₃ uređajem umjesto postojećeg amonijačnog rashladnog sistema u tvrtki Gavrilović 120

C3

D. ZADRO - Sistemi distribucije zraka u čistim prostorima s posebnim osvrtom na realizaciju projekta "Pliva-Biotehnologija" 133

C4

S. GALUŠIĆ - Mogućnosti primjene zračnih zavjesa u komercijalnim i industrijskim objektima 143

C5

P. DONJERKOVIĆ, S. PEKAS - Projekt termotehničkih instalacija klimatizacije muzeja suvremene umjetnosti u Zagrebu 153



Klimaoprema - Samobor

Za čist i ugodan zrak

Već punih 30 godina Klimaoprema proizvodi i svojim kupcima isporučuje opremu za klimatizaciju, ventilaciju i čiste prostore. Tisuće objekata u Hrvatskoj, u mnogim zemljama Europe pa i šire, u kojima su ugrađeni naši proizvodi, svjedoče o kvaliteti naših proizvoda, uspješnosti naše tvrtke, te nam daju jasnu viziju budućeg razvoja.

KLIMAOPREMA su, prije svega, ljudi koji svojim znanjem i energijom ostvaruju viziju uspješnog rasta tvrtke.

Moderno organizirana proizvodna tvrtka sa vrhunskim stručnjacima, kvalitetni CNC strojni park, ERP informatički sustav za upravljanje poslovanjem, certifikat ISO 9001, software za odabir proizvoda, nove tehnologije i novi proizvodi – to je danas KLIMAOPREMA.

Tvrtka zapošljava oko 90 djelatnika, od kojih je 13% sa VSS obrazovanjem.

Tvornica koja obuhvaća 4.500 m² proizvodno-skladišnih i uredskih prostora, smještena je na 15.000 m² u naselju Gradna – Samobor, neposredno uz auto cestu Zagreb-Ljubljana.

Osnovna djelatnost tvrtke je proizvodnja opreme za klimatizaciju i ventilaciju:

- elementi za distribuciju zraka
- protupožarne zaklopke
- prigušivači buke
- uređaji za filtraciju zraka,
- operacijski stropovi,
- zračne zavjese...

Snažni rast i razvoj zadnjih godina doživjelo je područje opreme za rad u čistim prostorima tzv. Cleanroom Technology. Kabine, kabineti i čiste sobe isporučene velikim farmaceutskim kompanijama (Pliva, Belupo) učvrstili su leadersku poziciju u tom, znanjem zahtjevnom, području.

Klimaoprema - Samobor

Posjet tvornici

Klimaoprema – novi proizvodno-poslovni objekat



Ovo je prigoda da vas pozovemo da nam se pridružite u obilasku našeg novog proizvodno – poslovnog prostora. Prijevoz obilazak i povratak su organizirani prema slijedećem redu:

- polazak autobusom je u 15:30 ispred ulaza Zagrebačkog velesajma,
- u prostorima Klimaopreme predviđen je uvodni govor, kratka prezentacija tvrtke te obilazak tvornice,
- nakon obilaska tvornice u obližnjem restoranu «Gradna» organiziran je ručak za sve posjetitelje,
- povratak na Zagrebački velesajam je predviđen za 18:30.

Radujemo se vašem dolasku!

Djelatnici Klimaopreme

info:

Klimaoprema d.d.

Gradna 78A, Samobor

tel: 01/ 33 62 513, fax: 01/33 62 905

web: www.klimaoprema.hr, e-mail: main@klimaoprema.hr

klimaoprema
Samobor

SVOJSTVA ZAMJENSKIH RADNIH TVARI

PROPERTIES OF ALTERNATIVE REFRIGERANTS

Dr.sc. Vladimir SOLDO
Mr.sc. Vlasta ZANKI ALUJEVIĆ
Marino GROZDEK, dipl.ing.
Prof.dr.sc. Tonko ČURKO

Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilišta u Zagrebu, Ivana Lučića 5, Zagreb
e-mail: vladimir.soldo@fsb.hr, vlasta.zanki@fsb.hr,
marino.grozdek@fsb.hr, tonko.curko@fsb.hr

SAŽETAK

Zbog štetnog utjecaja radnih tvari koje se rabe u rashladnoj i klimatizacijskoj tehnici na pojačanu razgradnju ozona u stratosferskim slojevima atmosfere i remećenja toplinske ravnoteže Zemlje, neophodna je zamjena radnih tvari novim ekološki prihvatljivim radnim tvarima i prijelaz na uređaje i tehnologije koje neće narušavati osnovna ekološka načela.

Zamjena radnih tvari CFC (karakterističan predstavnik R12) i HCFC (karakterističan predstavnik R22) u rashladnim uređajima i dizalicama topline tvarima koje ne sadrže po ozon štetan klor, u skladu s odrednicama Montrealskog protokola iz 1987, nametnula je potrebu za istraživanjem ponašanja novih radnih tvari u kompresorskim sustavima. Osim eksplozivnih ugljikovodika HC (butan, propan) na tržištu se pojavljuju HFC i njihove mješavine. Najpoznatija radna tvar iz HFC skupine je jednokomponentna radna tvar R134a, koja se uglavnom koristi kao zamjena za R12. U manjim kućanskim hladnjacima danas se radna tvar R12 često mijenja s ugljikovodikom R600a. Zamjenske radne tvari za R22 su najčešće mješavine radnih tvari, koje mogu biti azeotropске ili zeotropске (HFC407C, HFC410A). Azeotropска radna tvar R502 (CFC/HCFC), koja se u prošlosti koristila za niže temperature hlađenja, danas se najčešće zamjenjuje s pseudo zeotropskom smjesom HFC404a ili azeotropskom smjesom HFC507.

S obzirom da nove radne tvari iz skupine HFC-a imaju značajan utjecaj na efekt staklenika, današnja se istraživanja u rashladnoj tehnici sve više usmjeravaju na primjenu prirodnih radnih tvari kao što su amonijak, ugljični dioksid ili ugljikovodici.

Ključne riječi: zeotropске smjese, prirodne radne tvari, termofizikalna svojstva

ABSTRACT

Due to the harmful impact of refrigerants in the refrigeration and air conditioning applications on the increased ozone depleting in the stratosphere and on the global warming, the currently used refrigerants should be replaced by new, environment-friendly refrigerants. The introduction of modern equipment and technologies that do not disturb the ecological balance of nature is also needed.

The replacement of the refrigerants CFC (a typical representative – R12) and HCFC (a typical representative – R 22) in refrigeration units and heat pumps by substances that do not contain ozone depleting chlorine, in accordance with the Montreal Protocol from 1987, has stressed a need for research into the behaviour of newly introduced refrigerants in compressor systems. In addition to explosive hydrocarbons HC (butane, propane) on the market, one can also find HFC and their mixtures. The most common refrigerant from the HFC group is the pure refrigerant R134a which is primarily used as a substitute for R12. Today, the refrigerant R12 in small household refrigerators is often replaced by the hydrocarbon R600a. In most

cases, the substitute refrigerants for R22 are mixtures of refrigerants, either azeotropes or zeotropes (HFC407C, HFC410A). The azeotropic refrigerant R502 (CFC/HCFC), used for low cooling temperatures in the past, is today replaced by the near-azeotropic mixture HFC404a or the azeotropic mixture HFC507.

Since the new refrigerants from the HFC group have a significant impact on the greenhouse effect, the current researches in the field of refrigeration are increasingly focused on the application of natural refrigerants such as ammonia, carbon dioxide and hydrocarbons.

Key words: zeotropic mixtures, natural refrigerants, thermophysical properties

1. UVOD

Početak devedesetih godina donesen je niz administrativnih mjera s ciljem očuvanja okoliša s obzirom na ustanovljenu pojačanu razgradnju ozona u stratosferskim slojevima atmosfere, odnosno pojavu efekta staklenika. Kao posljedica poduzetih mjera dolazi do velike zamjene radnih tvari-freona (CFC-a i HCFC-a) korištenih u rashladnoj i klima tehnici, ali i freona korištenih za proizvodnju izolacijskih materijala, aerosola, pjena i otapala.

Republika Hrvatska kao potpisnica Montrealskog protokola obvezala se Uredbom o tvarima koje oštećuju ozonski omotač, koja je stupila na snagu početkom 1999. godine, provoditi propise međunarodnog ugovora. Ovom se uredbom ograničavaju proizvodnja, potrošnja, uvoz i izvoz štetnih tvari, zabranjuje se ispuštanje u zrak svih tvari koje oštećuju ozonski omotač, prilikom održavanja, popravka te isključivanja iz uporabe.

Tvari koje ne sadrže klor (HFC-i), ugljikovodici, te prirodne radne tvari koriste se kao zamjena za CFC-e i HCFC-e u postojećim i novim uređajima. Međutim, postavlja se pitanje kako prilagoditi konstrukciju kompresora i aparata novim radnim tvarima, kako postupiti s postojećim uređajima, te je li moguća zamjena radnih tvari u postojećim sustavima. Najbolje je rješenje izravna zamjena starih s novim radnim tvarima, koja je međutim moguća samo u nekim slučajevima. Postupak prilagodbe postojećeg sustava novoj radnoj tvari u literaturi se naziva «retrofiting».

2. ZAMJENA RADNIH TVARI

Rezultati istraživanja [1-2] su pokazali da je R134a (HFC) najbolja zamjena za R12 (CFC) u postojećim sustavima, jer su termofizikalna svojstva tih radnih tvari približno jednaka. Ipak R134a se ne može koristiti kao direktna zamjena za R12. R134a se ne otapa u mineralnim uljima koja se upotrebljavaju kao maziva za kompresore s R12. Zbog toga je potrebna potpuna izmjena mazivog ulja, kao i potpuno odstranjivanje eventualnih zaostataka ulja i radne tvari iz svih komponenti sustava. Na taj se način sprječava miješanje mineralnog ulja s mazivim uljem sintetičkog podrijetla podobnim za R134a.

U novim manjim sustavima radnu tvar R12 sve češće zamjenjuje izo-butan, koji zbog znatno manje gustoće dvostruko umanjuje punjenje kućanskih hladnjaka, te na taj način dodatno smanjuje potencijalnu mogućnost zapaljenja (temperatura zapaljenja 460 °C) i eksplozije (u volumnom udjelu sa zrakom od 1,8 do 8,5 %) ugljikovodika R600a. Izo-butan (R600a), propan (R290) i ostali ugljikovodici odlikuju se izvrsnim termofizikalnim svojstvima, ali se zbog njihove zapaljivosti preporučuje rabiti ih samo u manjim dobro brtvljenim jedinicama s malom količinom radne tvari, kao što su hladnjaci za kućanstvo i komercijalnu uporabu i hladnjače kod kojih je moguće kontrolirati zdravstvene i sigurnosne rizike. U posljednje se vrijeme sve više govori o radnoj tvari R152a kao zamjeni za R12 [2-3].

Europska regulativa predlaže ograničenje GWP vrijednosti na 150 za radne tvari koje se koriste u rashladnim uređajima u automobilskoj industriji, gdje R152a ima prednost pred drugim radnim tvarima.

Tablica 1. Ekološki prihvatljive radne tvari

Radna tvar	Sastav	Zamjena za	GWP ₁₀₀	Primjena	Napomena
R134a		R12, R22	1300	Kućanski aparati i mali komercijalni rashladni uređaji	Prikladna za retrofiting
R152a		R12	140	Automobilski rashladni uređaji (u istraživanju)	Umjereno zapaljiva
R600a		R12, R134a	20	Kućanski aparati	Zapaljiva, eksplozivna
R404a	143a/125/134a 52/44/4 %	R502, R22	3260	Pokretne hladnjače za smrznutu robu	Pseudo azeotropna RT
R407C	32/125/134a 23/25/52 %	R22	1526	Klimatizacija	Klizanje temperature
R417a	600/134a/125 3,5/50/46,5 %	R22	2138	Rashladnici vode, rashladne vitrine	Klizanje temperature
R410A	32/125 50/50 %	-	1725	Split sustavi za hlađenje	Visok tlak
R23		R13	11700	Kaskadni rashladni uređaji	Visok GWP
R744			1	Kaskadni rashladni uređaji	Previsok tlak, T_{kr} - niska
R717		R22	0	Industrijsko hlađenje	Otrovna

Istraživanja su pokazala da se miješanjem dviju ili više radnih tvari mogu dobiti zamjenske radne tvari za R22 i R502, približnih termofizikalnih svojstava [2, 4-5]. Na taj su način dobivene zeotropne smjese, radne tvari koje pri promjeni agregatnog stanja mijenjaju temperaturu, pri čemu parna i kapljevitost faza mijenjaju sastav. Najpoznatija zeotropna radna tvar je R407C koja se pretežno koristi u klimatizaciji. Ako se u postojećem sustavu želi zadržati mineralno ulje, onda je kao zamjena za R22 pogodna zeotropna smjesa R417a.

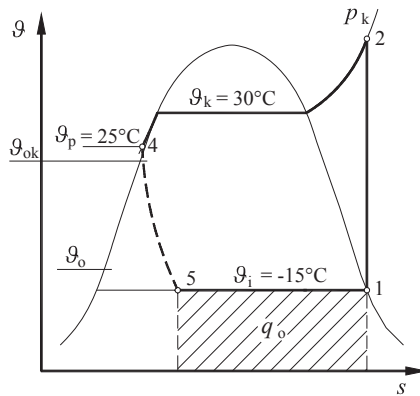
Od azeotropskih smjesa najraširenije radne tvari su R507 i R508a. Azeotropna smjesa R507 sadrži u sebi zapaljivu komponentu R143a zbog čega su proizvođači radnih tvari u spomenutu smjesu dodali 4 % komponente R134a. Time je dobivena smjesa koja je izvan zapaljivog područja, koja je znana kao pseudo azeotropna smjesa R404a. Zeotropna smjesa R404a odlikuje se s malom temperaturom klizanja (0,5 °C), a upotrebljava se za niža temperaturna područja. Komponente R143a i R125 imaju relativno veliki utjecaj na globalno zagrijavanje Zemlje, tako da se azeotropna smjesa R507 i pseudo azeotropna smjesa R404a koriste u sustavima s povećanim nadzorom.

Neki od problema koji se javljaju pri korištenju raznih zeotropskih i azeotropskih smjesa odnose se na izdvajanje faza s nižom temperaturom zasićenja u pojedinim dijelovima rashladnih uređaja (isparivaču, kondenzatoru, odvajaču kapljevine, sakupljaču kondenzata), te na posljedice koje izaziva promjena sastava većeg dijela smjese u cirkulaciji, uz druge posljedice promjene tlaka u sustavu, kapaciteta i dr. Isto tako treba spomenuti probleme s različitim topivostima ulja kod pojedinih komponenata smjese, te promjene termodinamičkih svojstava i sastava radne tvari zbog prisutnosti ulja u smjesi. Većina HFC-a i njihovih smjesa imaju lošija svojstva glede koeficijenta prijelaza topline u odnosu na, primjerice, R22 (niži koeficijent toplinske vodljivosti i višu viskoznost radne tvari). To izravno utječe na smanjenje termodinamičke valjanosti rashladnog procesa ili procesa s dizalicom topline, unatoč prednostima koje isparavanje ima pri promjenjivoj temperaturi kod zeotropskih smjesa i uvjetima čistog protustrujnog strujanja.

Zbog problema s fracioniranjem zeotropskih smjesa, one se koriste isključivo u kombinaciji sa suhim isparivačima, a nikako ne u sustavima s potopljenim isparivačima. Zeotropske se smjese pune isključivo kapljevitom fazom.

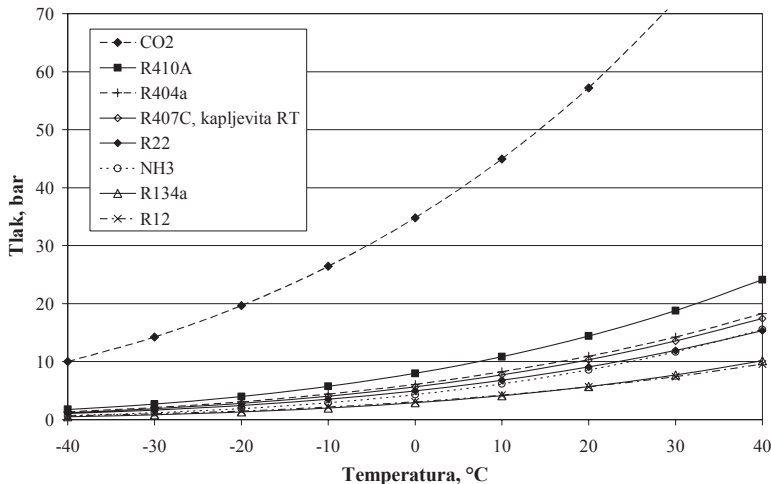
3. SVOJSTVA RADNIH TVARI

Svojstva radnih tvari su u daljnjem tekstu, ako to nije drukčije navedeno, dana za standardni rashladni proces, prikazan *ilustracijom 1.* (temperatura kondenzacije $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$, temperatura pothlađenja $+25\text{ }^{\circ}\text{C}$ i temperatura isparavanja $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$). Radna tvar na usisu u kompresor je suhozasićena para.



Ilustracija 1. Standardni rashladni proces

Svojstva radnih tvari određuju parametre sustava (količinski protok radne tvari, veličinu kompresora, dimenzije izmjenjivača i cjevovoda, punjenje sustava). Odnos tlaka i temperature zasićenja pare radnih tvari prikazan je krivuljom napetosti na ilustraciji 2.



Ilustracija 2. Krivulje napetosti radnih tvari

Za radnu tvar CO₂ debljina stijenki izmjenjivača treba biti veća, dok konstrukcija kompresora treba biti otpornija na visoke pripadne tlakove zasićenja.

U tablici 2. dane su radne tvari koje se koriste u rashladnim uređajima manjeg kapaciteta. Radna tvar R12 koja se u prošlosti koristila u manjim rashladnim uređajima danas se najčešće mijenja s jednokomponentnom radnom tvari R134a i ugljikovodikom R600a. Za mobilne automobilske sustave u posljednje se vrijeme kao zamjena za R12 predlaže R152a.

Tablica 2. Svojstva radnih tvari koje se koriste u rashladnim uređajima manjeg kapaciteta

Svojstvo	R134a	R12	R152a	R600a
ODP	0	1	0	0
GWP ₁₀₀	1300	8100	140	20
Molekularna masa	102,03	120,9	66,05	58,12
Kritična temperatura, °C	101	111,97	113,3	134,7
Kritični tlak, bar	40,6	41,4	45,2	36,4
Temperatura isparavanja (1 bar), °C	-26,1	-29,8	-24	-11,6
Tlak isparavanja (-15 °C), bar	1,64	1,82	1,49	0,89
Gustoća kapljevine (30 °C), kg/m ³	1187	1293	886,6	544,3
Gustoća pare (-15 °C), kg/m ³	8,29	10,89	4,84	2,49
Spec. toplina isparavanja (-15 °C), kJ/kg	209,5	159,9	321,7	369,8
Volumetrički rashladni učinak, kJ/m ³	1285,3	1327,5	1225	688

Zamjenske radne tvari za R12 (R134a, R152a i R600a), imaju sve redom veću latentnu toplinu isparavanja, što znači da će pri istim uvjetima rada i za isti kapacitet sustava imati manju protočnu masu radne tvari (R134a 25%, R152a 50% i R600a 55 %). Manji maseni protok radne tvari te manja gustoća kapljevine i parne faze u odnosu na radnu tvar R12 znače manji promjer kapljevinskog i parnog voda.

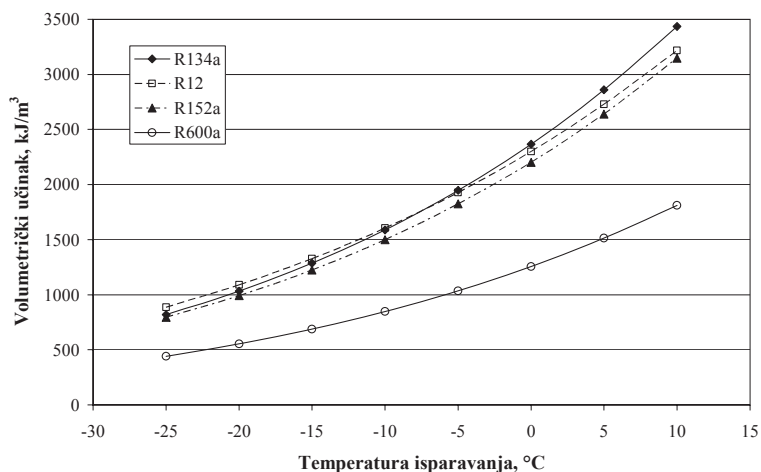
Umnožak gustoće radne tvari na usisu u kompresor (ρ_1) i specifičnog rashladnog učinka (q_o) naziva se volumetrički učinak radne tvari (q_{oV1}) i predstavlja iznimno važnu karakteristiku svake radne tvari:

$$q_{oV1} = \rho_1 q_o = \rho_1 (h_1 - h_4), \text{ kJ/m}^3 \quad (1)$$

Vrijednost volumetričkog rashladnog učinka izravno utječe na kapacitet sustava:

$$\Phi_o = q_{mRT} q_o = \rho_1 q_{VRT} q_o = q_{VRT} q_{oV1}, \text{ kW} \quad (2)$$

Vrijednosti volumetričkog učinka radnih tvari R134a, R12 i R152a su međusobno usporedive (ilustracija 3.). Radna tvar R600a ima najmanji volumetrički rashladni učinak, što znači da će za isti kapacitet sustava imati najveći radni volumen cilindra kompresora (gotovo dva puta veći od npr. radnog volumena cilindra kompresora za radnu tvar R12). Za niže temperature isparavanja, volumetrički rashladni učinak se smanjuje (manja gustoća na usisu u kompresor i manji specifični rashladni učinak). To znači da pri nižim temperaturama isparavanja za isti rashladni učinak volumen cilindra kompresora treba biti veći.



Ilustracija 3. Volumetrički rashladni učinak radnih tvari kao funkcija temperature isparavanja

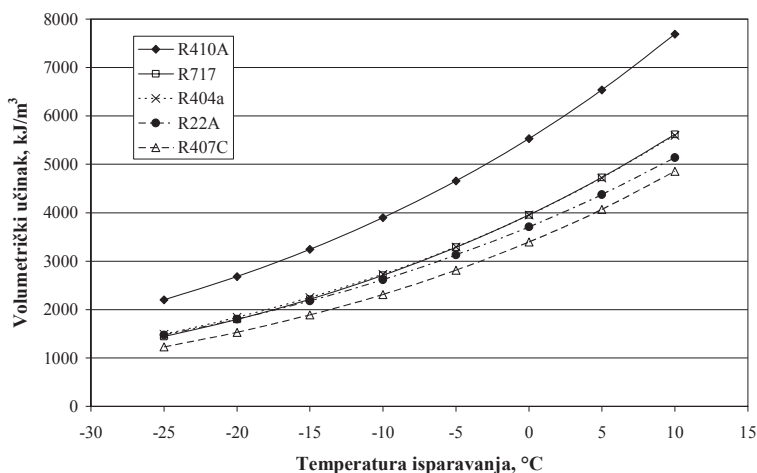
Slično razmatranje vrijedi za radne tvari koje se primjenjuju u srednjim i većim rashladnim uređajima (*tablica 3.*).

Tablica 3. Svojstva radnih tvari koje se koriste u srednjim i većim rashladnim uređajima

Svojstvo	R22	R404a	R410A	R407C	R717
ODP	0,055	0	0	0	0
GWP ₁₀₀	1500	3260	1725	1526	0
Molekularna masa	86,47	97,6	72,59	86,2	17,03
Kritična temperatura, °C	96,2	72,14	70,17	86,05	135,25
Kritični tlak, bar	49,9	37,4	47,7	46,3	113,3
Temperatura vrenja (1 bar), °C	-40,8	-46,6	-51,6	-43,8	-33,33
Klizanje temperature, °C	0	0,5	0,1	5-7	0
Tlak vrenja/rošnja (-15 °C), bar	2,96	3,72	4,82	3,39/2,64	2,36
Gustoća kapljevine (30 °C), kg/m ³	1171	1021	1035	1116	595,2
Gustoća pare (-15 °C), kg/m ³	12,9	18,57	18,43	11,48	1,97
Spec. toplota isparavanja (-15 °C), kJ/kg	216,5	177,7	237,6	221,9	1312,8
Volumetrički rashladni učinak, kJ/m ³	2178,8	2250,7	3243,7	1888,5	2214,3

Radna tvar R717 ima najveću toplinu isparavanja, pa zato i najmanje dimenzije cjevovoda. Zbog male gustoće radne tvari R717 na usisu u kompresor, vrijednost volumetričkog rashladnog učinka usporediva je s volumetričkim učinkom radnih tvari R22, R404a i R407C (*ilustracija 4.*). Radna tvar R410A ima, od navedenih radnih tvari, najveći volumetrički rashladni učinak te je za isti kapacitet rashladnog uređaja korisni volumen

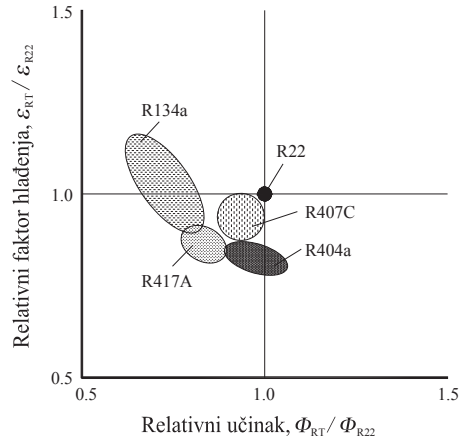
kompresora 30 do 50 % manji. Zbog takve karakteristike radna tvar R410A se ne koristi kao zamjenska radna tvar za R22 u postojećim instalacijama. Naime, rashladni kapacitet postojećeg sustava bio bi prevelik zbog predimenzioniranog kompresora, te bi se takav sustav često uključivao i isključivao. Radna tvar R410A ima znatno više pripadne tlakove zasićenja u odnosu na ostale halokarbonate (freone) i ugljikovodike, pa je gustoća radne tvari na usisu u kompresor velika. Veća gustoća doprinosi većem volumetričkom rashladnom učinku. Odnosno, moglo bi se reći da viši tlak radne tvari pridonosi manjim dimenzijama kompresora. Navedene prednosti svrstavaju R410A u vodeću radnu tvar u split sustavima za hlađenje zraka. Kao nedostatak R410A svakako treba navesti nisku kritičnu temperaturu.



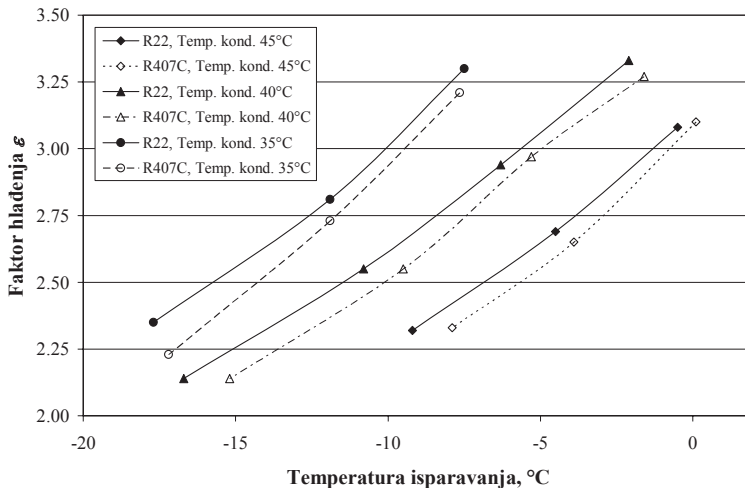
Ilustracija 4. Volumetrički rashladni učinak radnih tvari kao funkcija temperature isparavanja

Na masu radne tvari koja se puni u sustav najveći utjecaj ima gustoća kapljevitog radne tvari. Gustoća kapljevitog amonijaka je otprilike dva puta manja od gustoće halokarbonata, što za isti volumen sustava znači dvostruko manju masu punjenja. U sustavima gdje se radna tvar R12 zamjenjuje s R600a, punjenje se smanjuje do 65 %, jer su otprilike u tom odnosu gustoće kapljevitog izo-butana i freona R12. Gustoća R407C je nešto manja od gustoće kapljevitog radne tvari R22, pa je punjenje postojećeg sustava 5 % manje u usporedbi s R22.

Relativni odnosi rashladnog učinka i faktora hlađenja radnih tvari R407C, R404a, R417A i R134a u odnosu na radnu tvar R22 dani su na *ilustraciji 5.*, [5]. Rezultati su dobiveni mjerenjem i simulacijskim modelima za identične uvjete rada. Analiza pokazuje da je energijska učinkovitost rashladnog procesa sa zamjenskim radnim tvarima slabija nego kod procesa s radnom tvari R22 u postojećim sustavima. Navedenu prednost radne tvari R22 u odnosu na R407C pokazuju eksperimentalni rezultati prikazani ilustracijom 6., [6].



Ilustracija 5. Relativni odnos učinkovitosti radnih tvari u odnosu na radnu tvar R22, [5]



Ilustracija 6. Faktor hlađenja kao funkcija temperature isparavanja za radne tvari R22 i R407C, [6]

4. AMONIJAK I UGLJIČNI DIOKSID

4.1 Amonijak (R717)

O amonijaku (NH_3) kao zamjeni za radnu tvar R22 u postojećim sustavima ne može se govoriti. U prisustvu vlage amonijak je agresivan prema bakru koji je najčešće konstrukcijski materijal za freonske sustave. Također, primjena poluhermetičkih i hermetičkih kompresora otpada iz istih razloga.

Međutim, amonijak je još uvijek termodinamički gledano najbolja radna tvar i gotovo da je nezamjenjiva u industrijskim postrojenjima. Nezaobilazna je njegova primjena u

rashladnim sustavima za brzo hlađenje i skladištenje hrane (tuneli, rashladne komore), u industriji pića, kod sportskih ledenih terena. U tablici 4. dana su relativna svojstva amonijaka prema R22.

Tablica 4. Odnos termofizikalnih i transportnih svojstava radnih tvari R717 i R22, [7]

Svojstvo	R717/R22
Specifični toplinski kapacitet kapljevine i pare, $c_{p, R717}/c_{p, R22}$	4
Specifična toplina isparavanja, r_{R717}/r_{R22}	6
Toplinska vodljivost kapljevine, $\lambda_{R717}/\lambda_{R22}$	5,5
Dinamička viskoznost, η_{R717}/η_{R22}	0,8
Gustoća kapljevine, ρ_{R717}/ρ_{R22}	0.5

Za isti rashladni učinak, sustavi s amonijakom imaju manje dimenzije cjevovoda (otprilike šest puta manji maseni protok radne tvari), dvostruko manje punjenje sustava (manja gustoća). Zbog male gustoće parovite i kapljevine faze R717, padovi tlaka kroz sustav su znatno manji, što je posebno korisno u razgranatim sustavima s dugačkim cjevovodima. Zbog znatno boljih termodinamičkih i transportnih svojstava radne tvari, u procesu s amonijakom je prijelaz topline dva do tri puta bolji nego u procesu s R22 [7], te su izmjenjivači manjih dimenzija. Amonijak je manje osjetljiv na vlagu u sustavu, i ne miješa se uljem.

Sa stajališta zaštite okoliša R717 je najprihvatljivija radna tvar. Ispuštanjem u atmosferu nema utjecaja na razgradnju ozona (ODP = 0), niti na efekt staklenika (GWP = 0).

Kada se govori o amonijaku ne mogu se zaobići njegovi nedostaci koji mu uvelike ograničavaju primjenu, posebno u gusto naseljenim područjima, iako to nije uvijek slučaj. Budući da mu je stupanj štetnosti A2, amonijak je otrovan u smjesi sa zrakom u volumnom udjelu od 0.5 do 0.6 %. Spada u zapaljive i eksplozivne radne tvari. Temperatura zapaljena je 651 °C, a eksplozivan je kad volumni udio u zraku iznosi 15,3 – 27 %. Ograničena je primjena kod poluhermetičkih i hermetičkih kompresora jer uz najmanje prisustvo vlage R717 korozivno djeluje na bakar. Zbog strmo položenih izobara u pregrijanom području (T,s -dijagrama), temperatura na kraju kompresije često je previsoka, te se uvjetuje korištenje evaporativnih kondenzatora za kondenzaciju radne tvari (složeno održavanje sustava). Rijetko se koriste zrakom hlađeni kondenzatori.

Amonijak se koristi kao radna tvar i u apsorpcijskim rashladnim uređajima u kombinaciji s vodom. Mogućnost korištenja otpadnih toplina ističe opravdanost uporabe apsorpcijskih rashladnih uređaja, unatoč niskoj učinkovitosti takvih sustava.

4.2 Ugljični dioksid (R744)

CO₂ kao prirodna radna tvar ima dugu tradiciju u rashladnoj tehnici, te je u 50-tim godinama prošlog stoljeća često korišten u rashladnim sustavima na brodovima. Ugljični dioksid nema utjecaj na razgradnju ozona (ODP=0), dok ima neznatan utjecaj na efekt staklenika (GWP=1). Kemijski je stabilan, nije zapaljiv niti je toksičan, premda u većim količinama može biti opasan i izazvati gušenje.

Troškovi za ugljični dioksid su niski, pri čemu nema dodatnih troškova za njegovo zbrinjavanje. Volumetrički rashladni učinak mu je znatno veći nego kod radnih tvari R22 i NH₃ (približno 5 do 8 puta), što znatno smanjuje dimenzije uređaja. Premda CO₂ kao radna tvar ima dosta prednosti, glavni razlog zašto nema široku primjenu u praksi su nepovoljne

termodinamičke karakteristike za standardne aplikacije hlađenja, koje dovode do tehničkih problema pri izvedbi uređaja. Naime, ugljični dioksid ima izrazito nisku kritičnu temperaturu od samo 31,1 °C, uz izrazito visok kritični tlak od 74 bar. Za jednostupanjske sustave to zahtjeva transkritične radne parametre s tlakom kondenzacije većim od 100 bar.

Primjena ugljičnog dioksida prihvatljiva je u industriji i u većim komercijalnim rashladnim sustavima, pri čemu se CO₂ koristi kao radna tvar u donjoj kaskadi kaskadnih rashladnih uređaja (temperaturni režim od -10 do -50 °C). U tom su slučaju radni parametri ispod kritičnog područja, što garantira visoku učinkovitost sustava.

5. ZAKLJUČAK

U posljednjih desetak godina došlo je do ekspanzije rashladnih uređaja koji su punjeni zeotropskim smjesama (R407C, R404a), a koje se koriste za zamjenu radnih tvari koje narušavaju osnovna ekološka načela (R502, R22). Iako su teorijske pretpostavke ukazivale na znatno poboljšanje termodinamičke učinkovitosti rashladnog uređaja uporabom zeotropskih smjesa, eksperimentalni rezultati to nisu potvrdili. Razlozi leže u slabijem prijelazu topline u procesu sa zeotropskim smjesama. Odstupanja u odnosu na jednokomponentne radne tvari posljedica su promjene sastava dvofaznog toka radne tvari u isparivaču i kondenzatoru. Do slabijeg prijelaza topline dolazi uslijed povećanja sadržaja slabije isparive komponente uz grijane površine, manje pogodnih fizikalnih svojstava (vodljivosti i viskoznosti), otežanog mjehuričastog isparivanja, te prevelike topljivosti pojedinih komponenti smjese u esternom ulju. Izuzetak je radna tvar R410A s neznatnom temperaturom klizanja (0.1 °C), koja sve više zauzima svoje mjesto na tržištu. Zbog viših pripadnih tlakova zasićenja i dobrih transportnih svojstava, dimenzije komponenti su se smanjile.

Nakon što se u razvijenim europskim zemljama prešlo na radne tvari koje ispuštanjem u atmosferu nemaju štetan utjecaj na razgradnju ozonskog omotača, danas se od radnih tvari traži što manji utjecaj na zagrijavanje atmosfere (\ll GWP). Time prirodne radne tvari dobivaju sve više na važnosti. Amonijak i dalje zbog izvrsnih termofizikalnih i transportnih svojstava ostaje radna tvar broj jedan u području industrijskog hlađenja. Pojedini veći amonijačni sustavi, s velikom količinom punjenja, preinačuju se u kaskadne rashladne sustave, s ugljičnim dioksidom u donjoj kaskadi. U manjim rashladnim uređajima ugljikovodici (R600a, R290) zbog svojih dobrih svojstava i ekološke prihvatljivosti potiskuju freone iz rada.

POPIS OZNAKA

Latinička slova

c_p	- specifični toplinski kapacitet pri $p = \text{konst.}$	[J/(kgK)]
h	- specifična entalpija	[J/kg]
p	- tlak	[Pa]
P_{EL}	- električna snaga kompresora	[kW]
r	- specifična toplina isparavanja	[kJ/kg]
s	- specifična entropija	[kJ/(kgK)]
q_{mRT}	- maseni protok radne tvari	[kg/s]
q_{VRT}	- volumni protok radne tvari	[m ³ /s]
q_o	- specifični rashladni učinak	[kJ/kg]
q_{oV1}	- volumetrički rashladni učinak	[kJ/ m ³]

Grčka slova

$\varepsilon = \Phi_o/P_{EL}$	- faktor hlađenja	[-]
η	- dinamička viskoznost	[Pa s]
ϑ	- temperatura	[°C]
ϑ_i	- temperatura isparavanja	[°C]
ϑ_K	- temperatura kondenzacije	[°C]
ϑ_p	- temperatura pothlađenja	[°C]
λ	- koeficijent toplinske vodljivosti	[W/(m K)]
ρ	- gustoća	[kg/m ³]
ρ_l	- gustoća radne tvari na usisu u kompresor	[kg/m ³]
Φ_o	- učinak isparivača	[kW]
Φ_K	- učinak kondenzatora	[kW]

Skraćenice

CFC - klorofluorougljici (engl. *chlorofluorocarbons*) su potpuno halogenirani derivati zasićenih ugljikovodika (R11, R12)

HCFC - klorofluorougljikovodici (engl. *hydrochlorofluorocarbons*) su djelomično halogenirani derivati zasićenih ugljikovodika koji sadrže vodik i klor (R22)

HFC - fluorirani ugljikovodici (engl. *hydrofluorocarbons*) su djelomično halogenirani derivati zasićenih ugljikovodika koji sadrže vodik i ne sadrže klor (R134a, R152, ...)

ODP - Potencijal razgradnje ozona, (engl. *Ozone Depletion Potential*)

GWP - Potencijal globalnog zagrijavanja, (engl. *Global Warming Potential*)

LITERATURA

1. Didion, D.A., *The Application of HFCs as Refrigerants*, 20th International Congress of Refrigeration, IIR/IIF, Sydney, 1999.
2. Bitzer, *Refrigerant report*, 12th Edition, Sindelfingen, 2003.
3. Ghodbane, M., *An Investigation of R152a and Hydrocarbon Refrigerants in Mobile Air Conditioning*, International Congress and Exposition, Michigan, 1999.
4. Calm, J.M., Domanski, P.A., *R-22 Replacement Status*, ASHRAE Journal, 46 (8), 29-39, USA, 2004.
5. Johansson, A., Lundqvist, P., *Replacement of R22 in Existing Installations: Experiences from the Swedish Phase Out*, Royal Institute of Technology, Stockholm, 2003.
6. Soldo, V., Zanki, V., Čurko, T., *Mogućnost rada rashladnog uređaja po Lorenzovom procesu*, 16. međunarodni simpozij o grijanju, hlađenju i klimatizaciji – Interklima '01., Zbornik radova, str. 17-25, Zagreb, 2001.
7. Stoecker, W. F., *Industrial Refrigeration Handbook*, McGraw-Hill Professional, 1998.

**ANALIZA ISPLATIVOSTI UVOĐENJA NOVOG RASHLADNOG SISTEMA
S KASKADNIM CO₂/NH₃ UREĐAJEM UMJESTO POSTOJEĆEG
AMONIJAČNOG RASHLADNOG SISTEMA U TVRTKI GAVRILOVIĆ**

**ANALYSIS OF THE EFFICIENCY OF SUBSTITUTION OF THE EXISTING
AMMONIA REFRIGERATION SYSTEM WITH THE NEW CASCADE
CO₂/NH₃ REFRIGERATION SYSTEM IN GAVRILOVIC COMPANY**

Dennis Janković, dipl.ing.stroj.
Gavrilović d.o.o.
Gavrilovićevo trg 1, 44250 Petrinja
Tel: 044/811-178
Fax: 044/811-164
e-mail: dejankol@inet.hr

SAŽETAK

Cilj ove analize je mogućnost efikasne zamjene postojećeg amonijačnog rashladnog sistema novim rashladnim sistemom s kaskadnim CO₂/NH₃ uređajem unutar tvrtke Gavrilović. Glavni razlog moguće zamjene je izuzetno velika količina radnog rashladnog medija amonijaka (oko 74 tone), koji je opasan za čovjeka i sve vrste mesnih proizvoda u procesnoj prehrambenoj industriji. Za analizu je odabran postojeći rashladni krug temperature isparivanja amonijaka od - 30 °C, na kojem je izvedena usporedbena analiza između amonijačnog i CO₂/NH₃ kaskadnog rashladnog procesa. Analizirani proces hlađenja je proces s dvokratnom kompresijom i dvokratnim prigušivanjem. Numeričkom analizom je dokazano da je rashladni proces s dvokratnom kompresijom i dvokratnim prigušivanjem najbolji rashladni proces, jer pokazuje najbolje brojčane vrijednosti rashladnog učinka i stupnja (faktora) hlađenja.

KLJUČNE RIJEČI: amonijak, ugljični-dioksid, kaskadni uređaj, stupanj hlađenja, kompenzacijska energija

ABSTRACT

The object of this analysis is the possibility of the efficient substitution of the existing ammonia refrigeration system with the new cascade CO₂/NH₃ refrigeration system in Gavrilovic company. The main reason for the possible substitution is a very high rate of working refrigeration ammonia medium (approximately 74 tons), which is hazardous for men and all kinds of meat products in the food processing industry. The evaporating ammonia temperature of -30 °C in the existing refrigeration cycle is selected for the analysis. The comparison of refrigeration ammonia system and refrigeration cascade CO₂/NH₃ system is analysed. The analysed refrigeration process is a double compression and double throttling process. Numerical analysis has proved that the double compression and double throttling refrigeration process is the best refrigeration process because it has the best number values of cooling energy and cooling efficiency.

KEY WORDS: ammonia, carbon-dioxide, cascade device, cooling efficiency, compensating energy

1. UVOD

Danas je sve veći trend u svijetu uvođenje prirodnih alternativnih rashladnih medija, kao što su to npr. ugljični dioksid, amonijak, etilen-glikol i sl. zbog sve većih i ozbiljnijih problema glede “efekta staklenika“ i “efekta oštećenja ozonskog sloja”. Od svih tvari koje bi mogle poslužiti kao radne tvari u rashladnim agregatima u najuži izbor ulazi njih samo desetak. Za prehrambenu mesnu industriju Gavrilović od vitalne je važnosti upotreba radnih rashladnih tvari (medija), koje će prvenstveno biti bezopasne za zdravlje čovjeka, a potom i za sam mesni proizvod. Budući je u Gavriloviću nemoguće u potpunosti izostaviti rashladni medij amonijak, iz razloga specifičnosti tehnologije vođenja procesa proizvodnje, tehničke izvedbe samog rashladnog sistema i niske nabavne cijene rashladnog medija amonijaka, pristupilo se razmišljanju o uvođenju novog rashladnog sistema s kaskadnim CO₂/NH₃ uređajem, čijim bi se uvođenjem pridonijelo znatnom smanjenju sadašnje izuzetno velike količine amonijaka od 74 tone na zadovoljavajućih 5-6 tona.

2. KRITERIJI ZA IZBOR RADNE TVARI U MESNOJ PREHRAMBENOJ INDUSTRIJI

Kriteriji koje tvar mora zadovoljiti da bi se mogla djelotvorno koristiti u mesnoj prehrambenoj industriji su:

- Temperatura isparavanja rashladnog medija mora biti što niža pri tlaku zasićenja od 1 bar (zbog sigurnosti od propuštanja uzduha u rashladni uređaj)
- Pri temperaturi kondenzacije od približno 30°C, tlak kondenzacije treba biti u granicama od 15-20 bara
- Gustoća radne tvari mora biti što veća pri temperaturi isparavanja
- Kritična temperatura mora biti visoka da bi imali veću slobodu izbora radnih parametara
- Radna tvar ne smije biti korozivan i ne smije otapati materijale
- Želimo da je radna tvar stabilna u kemijskom smislu (raspad radne tvari u neke druge spojeve odmah za sobom povlači promjenu svih parametara)
- Želimo da je radna tvar nezapaljiva i da nije eksplozivna
- Želimo da radna tvar ne čini homogenu smjesu s mazivim uljem
- Želimo da se radna tvar lako otkriva prilikom puštanja

3. RADNE TVARI I EKOLOGIJA

Upotreba radnih tvari, posebno freona, u rashladnoj i klima-tehnici predmetom su obimnih rasprava iniciranih ekološkim problemima, uzrokovanim nepovoljnim efektima upotrebe freona na razaranje ozonskog zaštitnog sloja u gornjem sloju atmosfere, kao i utjecaj na povećanje tzv. učinka staklenika. Montrealski protokol (1987.), Londonska konferencija (1990.) i Kopenhagenski protokol (1992.) donijeli su programe i mjere kojima se upotreba nekih freona potpuno zabranjuje, a nekih vremenski i količinski ograničava do konačne zabrane. Upravo zbog tog razloga došlo je do ponovne primjene amonijaka i CO₂ unutar velikih procesnih industrijskih i posebno prehrambenih rashladnih sistema.

- Zbog uspoređivanja radnih tvari u odnosu na oštećenje ozonskog sloja uvedena je oznaka **ODP - Ozone Depletion Potential**, koja predstavlja relativni, u odnosu na R11 (ODP = 1), potencijal radne tvari za razgradnju ozonskog sloja.
- Kriterij za usporedbu utjecaja različitih rashladnih fluida na učinak staklenika označava se kao **GWP – Global Warming Potential**, koji predstavlja relativni, u odnosu na CO₂ (GWP = 1) potencijal zagrijavanja.

Tablica 1. Klasifikacija radnih tvari prema tehničkoj sigurnosti, utjecaju na ozon i efektu staklenika

Grupa L	T v a r		Relevantni podaci za atmosferu						Postojanost godina
	Oznaka	Kemijska formula	Utjecaj na ozon		Utjecaj na efekt staklenika				
			Grupa O	ODP	Grupa G	GW P prema proteklom vremenu			
					20	100	500 god.		
1	HFC 134a	CH ₂ FCF ₃	1	0	1	3200	1200	420	16
	HFC 134	C ₂ H ₂ F ₄				cca 3500 do 400			
	HFC 125	CHF ₂ CF ₃				2	4700	2500		860
	HFC 23	CHF ₃				....	....	....
	HCFC 123	CF ₃ CHCl ₂	2	0,02	1	310	85	29	1,6
	HCFC 22	CHClF ₂				4100	1500	510	15
	HCFC 124	CHClFCF ₃				1500	430	150	6,6
	CFC 11	CCl ₃ F		1		4500	3500	1500	60
	CFC 12	CCl ₂ F ₂		1		7100	7300	4500	130
	CFC 13	CClF ₃		0,45		....	....	....	400
	CFC 113	CCl ₂ FCF ₂	3	0,8	2	4500	4200	210	90
	CFC 114	CClF ₂ CClF ₂				6000	6000	5500	200
	CFC 115	CClF ₂ CF ₃				5500	6900	7500	400
	Halon 13B1	CBrF ₃		10...13		5800	5800	3200	110
	R 502			0,33		4800	4300	4000	do 400
2a	HFC 152a	CH ₃ CHF ₂	1	0	1	510	140	47	107
	HFC 143a	CH ₃ CF ₃				2	4500	2900	1000	41
	HFC 32	CH ₂ F ₂				cca 600	cca 450	cca 200	cca 6
	HCFC 141b	CH ₃ CCl ₂ F	2	0,08	1	1500	440	150	8
HCFC 142b	CH ₃ CClF ₂		0,05	2	3700	1600	540	19	
2b	R 717	NH ₃	1	0	1	0	0	0	....
3	Metan	CH ₄	1	0	....	....	....	....	....
	Etan	C ₂ H ₆				....	....	....	....
	Propan	C ₃ H ₈				....	....	....	....
	Butan	C ₄ H ₁₀				....	....	....	....

Osim štetnog djelovanja radne tvari na ozon, sve značajniji problem postaje učinak staklenika. Neki plinovi, ponajviše CO₂, djeluju kao staklena površina nekog staklenika, tako što propuštaju Sunčeve zrake prema Zemljinoj površini, ali djelomično umanjuju povratno toplinsko zračenje Zemlje prema svemiru. Zbog toga se povećava srednja temperatura zemljine površine. Industrijalizacijom, primjenom fosilnih goriva udjel CO₂ stalno raste. Radne tvari imaju također negativan utjecaj. Posebno su problematične zbog toga što je njihov utjecaj na učinak staklenika 10.000 puta veći u odnosu na CO₂.

4. OSNOVNA SVOJSTVA RADNIH TVARI AMONIJAKA I UGLJIČNOG-DIOKSIDA

4.1. Amonijak (R717)

Amonijak ima vrlo veliku latentnu toplinu isparavanja. Koristi se do temperatura isparavanja -50 °C. Ima vrlo visoku kritičnu temperaturu od 134,4 °C i daje visoke koeficijente prijelaza topline α zbog male kinematičke viskoznosti. Ima najveći specifični rashladni učinak q_0 (samo CO₂ ima veći). Vrlo je jeftin u proizvodnji (uglavnom se dobiva sintezom dušika i vodika). Najčešće se koristi u rashladnim sustavima s klipnim i vijčanim kompresorima. Kod turbokompresora se ne koristi previše zbog male gustoće, jer je kod male gustoće kompresijski omjer mali, što za sobom povlači potrebu za mnogo stupnjeva. Amonijak se lako detektira i lako se otkriva propusnost (pomoću fenol-ftaleinskog papira, koji poprima intenzivnu purpurnu boju). Koristi se za rashladne učine veće od 30 kW. Amonijak ima vrlo široko zasićeno područje. Zbog toga što razgrađuje obojene metale uz minimalno prisustvo vlage, ne može se koristiti s njima, tj. limitiran je na čelik i željezo. Koristi se samo kod kompresora otvorenog tipa jer su motori od bakra (amonijak ne smije strujati preko bakrenih namotaja elektromotora), pa ne možemo koristiti kompresore poluhermetičkog i hermetičkog tipa. Kao brtveni materijali slobodno se mogu koristiti klingerit, guma i buna. Amonijak se ne može nikako brtviti s gumom. Velika je prednost amonijaka što se uopće ne otapa i ne miješa s uljem u nikakvim omjerima, pa je vrlo jednostavno odrediti kontrolu cirkulacije ulja (ulje je teže pa se lako izdvaja i ispušta iz kartera i vraća u proces). Koristi se u svim tipovima rashladnih postrojenja, osim za klimatizaciju, jer se u slučaju propuštanja, vrlo brzo raširi u kondicionirane prostore. Štetan je za zdravlje čovjeka, jer mu je stupanj štetnosti 2, eksplozivan je (zapaljiv) u volumnom udjelu u smjesi s zrakom od 15,3 - 27 %. Za rukovanje amonijakom je uvijek potrebno stručno osoblje, zbog njegove otrovnosti i zapaljivosti. Amonijak je zastupljen s oko 85 % u svim svjetskim rashladnim instalacijama. Koristi se samo u industriji. Ukapljeni amonijak može izazvati smrzotine.

4.2. Ugljični dioksid (R744)

Ugljični–dioksid je jeftin i jako ga se lagano dobije. Ima vrlo veliku latentnu toplinu isparavanja r , ali nisku kritičnu temperaturu. Vrijednost kritične temperature mu je samo $+ 31\text{ }^{\circ}\text{C}$ (iznad te temperature kondenzator gubi svoj učinak jer je za $T > T_{\text{krit}} \Rightarrow r = 0$), što je red veličine temperature kondenzacije. Koristio se je prije, kada su se kondenzatori hladili bunarskom vodom, ali to se danas više ne prakticira.

CO_2 je slabo topljiv u vodi. Ukapljeni CO_2 može izazvati smrzotine. Pri radu s ukapljenim CO_2 treba zaštititi ruke, lice i oči zaštitnim sredstvima. Ugljični–dioksid nije zapaljiv niti podržava gorenje tj. stupanj zapaljivosti mu je 0. Stupanj štetnosti je 5. U slučaju oštećenja kože ukapljenim plinom, potrebno je pozvati liječnika, isto kao i pri jačim trovanjima udisajem.

⇒ Zašto koristiti radni medij poput ugljičnog dioksida (CO_2) ?

Glavni argumenti, tj. prednosti CO_2 u odnosu na druge radne tvari su sljedeći:

- 1) CO_2 je danas uz NH_3 i propan, prirodni RM, koji je u najvećoj ekspanziji.
- 2) Zaštita okoliša (ODP i GWP), tj. ne utječe na zagađenje okoliša.
- 3) Imamo izrazitu uštedu u potrošnji energije (LCC).
- 4) Nije agresivan u slučaju propuštanja i istjecanja, bez boje i mirisa je.
- 5) Netoksičan je.
- 6) Ima vrlo malen volumen kao rashladna radna tvar na “primarnoj strani”.
- 7) Efikasnost energijskog djelovanja je izvrsna.
- 8) Ima dobar koeficijent prijelaza topline α .
- 9) Niža je cijena održavanja rashladnih postrojenja s CO_2 .
- 10) Niska cijena proizvodnje CO_2 (0,75 $\text{\$/kg}$) naspram npr. R-404a (15 $\text{\$/kg}$) i sekundarnih rashladnih medija (2 $\text{\$/kg}$).
- 11) Nema oštećenja proizvoda u slučaju istjecanja (curenja) CO_2 , nije toksičan, bez boje i mirisa je.
- 12) Nakon postupka defrostacije (odleđivanja) vrlo brzo se uspostavlja traženi temperaturni rashladni režim unutar rashladnih komora.
- 13) Smanjene su dimenzije cjevovoda i popratne armature.

5. KASKADNI RASHLADNI UREĐAJ S RADNIM TVARIMA AMONIJAKOM (R717) I UGLJIČNIM-DIOKSIDOM (R744)

Kaskadni rashladni uređaji koriste se prvenstveno za postizanje ekstremno niskih temperatura od $- 80$ do $- 220\text{ }^{\circ}\text{C}$. Danas se tako ekstremno niske vrijednosti temperatura koriste za: laboratorijske svrhe, transplataciju tkiva u medicini, u biokemiji, u istraživanjima supravodljivosti (pri tako niskim temperaturama otpori vodiča su praktički jednaki nuli), za dobivanje ukapljenih plinova (dušik, helij), u procesnoj i prehrambenoj industriji itd.

⇒ Od izuzetne je važnosti pridržavati se sljedeća tri bitna pravila:

- 1) Potrebno je koristiti radnu tvar s velikom gustoćom, jer veća gustoća radnog medija daje i veći maseni protok, što uzrokuje pak povećanje rashladnog učinka.
- 2) Ne hladiti dublje nego što je neophodno potrebno, zbog porasta dovedene kompenzacijske topline u vidu utrošenog rada, te pada faktor hlađenja ε i specifičnog rashladnog učinka q_0
- 3) Ne grijati više nego što je neophodno potrebno, zbog porasta kompresijskog omjera i opadanja termodinamičke dobrote (koeficijenta, faktora) rashladnog procesa:

$$\varepsilon = \frac{Q_0}{P} = \frac{q_0}{w} \quad (1)$$

Kod ekstremno niskih vrijednosti temperatura ne možemo koristiti standardne radne tvari, jer one pri tim temperaturama imaju jako nisku vrijednost gustoće, tj. jako veliku vrijednost specifičnog volumena, pa bi tako npr. cilindri klipnih kompresora morali biti izuzetno velikih dimenzija.

Radni medij koji će biti radna tvar CO₂ na tako niskim temperaturama imat će $T_{krit} < T_{ok}$, pa iz tog razloga radni medij nemoguće ohladiti okolišnjim zrakom. Za postizanje izrazito niskih temperatura hlađenja (do -200 °C) koriste se kaskadni rashladni uređaj, tj. preko posebnog izmjenjivača topline međusobno spajamo dva nezavisna rashladna uređaja s dvokratnom kompresijom i dvokratnim prigušenjem. Izmjena topline u izmjenjivaču postiže se na takav način, da je rashladni učinak gornje kaskade jednak toplini kondenzacije donje kaskade, tj. mora vrijediti $T_{i,GK} < T_{k,DK}$, odnosno, $\Delta T = T_{k,DK} - T_{i,GK} = 7 - 10$ °C. Posljedica te razlike temperatura jest prijelaz topline unutar posebnog izmjenjivača topline, koji toplinski spaja gornju i donju kaskadu rashladnog kaskadnog uređaja. Ukupna toplina kondenzacije donje kaskade jednaka je ukupnom rashladnog učinku gornje kaskade: $Q_{0,GK} = Q_{K,DK}$. U donjoj kaskadi koristimo radnu tvar CO₂, koja će moći isparavati pri temperaturi $T_{i,DK} = -30$ °C i ostvariti traženi rashladni učinak $Q_{0,DK} = Q_{0,UREĐAJA}$, dok u gornjoj kaskadi koristimo NH₃, koji ima široko zasićeno područje, te za njega vrijedi: $T_{Krit} \geq T_{ok}$.

CO₂ radni medij ćemo dovesti u proces kondenzacije, pomoću dvokratne kompresije u donjoj kaskadi uređaja i to s temperature isparivanja $T_{i,DK} = -30$ °C na $T_{k,DK} = -2$ °C. U gornjoj kaskadi (tu je radni medij NH₃) moramo odabrati temperaturu isparavanja $T_{i,GK}$. Odabrana $T_{i,GK} = -10$ °C. Želja nam je da imamo $T_{i,DK} \Rightarrow p_{i,DK} \approx 1$ bar, kako bi dobili kompresore realnih radnih volumena. Korisne posljedice prethodno navedenih uvjeta su da će kompresijski omjer u obje kaskade biti manji od graničnog, tj. bit će $p_k / p_i \leq 12$, a maksimalna temperatura će zadovoljavati uvjet $T_{4,GK} \leq (T_{gran} = 140$ °C).

Uvjeti koji moraju biti zadovoljeni za ispravno funkcioniranje kaskadnog uređaja su:

1) Dovoljno niska temperatura hlađenja (u ovome radu je primaran cilj smanjiti količinu punjenja sustava s amonijakom, te se iz tog razloga koristi kaskadni rashladni uređaj)

2) Učinak kondenzatora donje kaskade jednaka je ukupnom rashladnom učinku gornje kaskade :
 $Q_{K,DK} = Q_{0,GK}$ (2)

3) Mora postojati razlika temperatura na novo - uvedenom izmjenjivaču topline, koji spaja gornju i donju kaskadu rashladnog kaskadnog uređaja, koja garantira izmjenu topline na principu prirodnog hlađenja (prijelaz topline sa spremnika više temperature na spremnik niže temperature) i ona iznosi od 7 do 10 °C :

$$\Delta T = T_{k,DK} - T_{i,GK} \quad (3)$$

4) Na okolinu se prenosi ukupna toplina kondenzacije gornje kaskade:

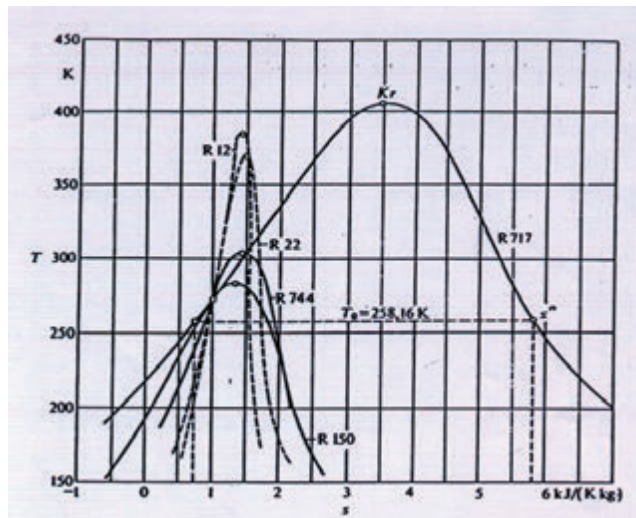
$$Q_{K,GK} = \frac{P_{1,DK}}{1} + \frac{P_{2,DK}}{1} + \frac{P_{1,GK}}{1} + \frac{P_{2,GK}}{1} + Q_{0,DK} \quad (4)$$

(ukupno dovedena snaga na svim kompresorima u obje kaskade uređaja) ($Q_{0,uredaja}$)

5) Ne treba biti $q_{0,GK} = q_{0,DK}$, budući protočne mase mogu biti različite

6) Maksimalna ušteda na radu (zbog toga je tlak za izobarno međuhlađenje jednak:

$$p_m = (p_k - p_i)^{1/2}), \text{ a u ovom kaskadnom uređaju dodatna nepovratnost je i } \Delta T = T_{k,DK} - T_{i,GK} = 8^\circ\text{C}$$



Slika 1. Područja zasićenja rashladnih radnih medija

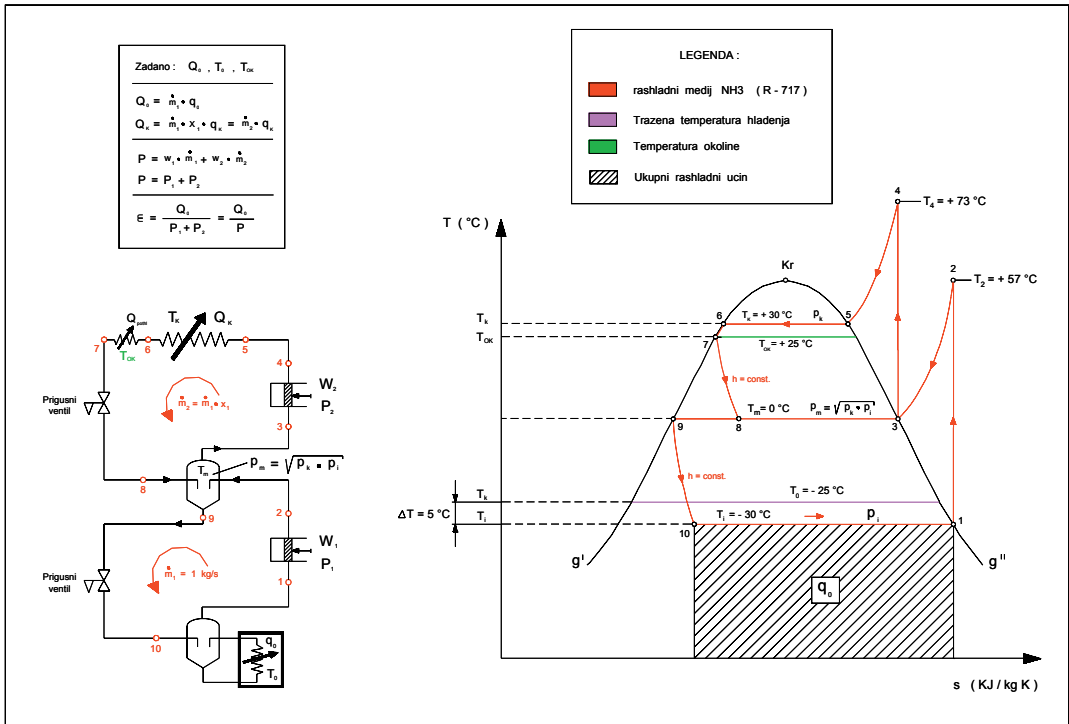
6. TERMODINAMIČKI PRORAČUN

6.1. Termodinamička analiza čistog rashladnog amonijačnog procesa

Odabrani rashladni amonijačni krug na kojem je izvršena usporedbeno analiza između amonijačnog i CO₂/NH₃ kaskadnog procesa, unutar Gavrilovićevo rashladnog postrojenja, jest amonijačni rashladni krug isparivanja od - 30 °C. Analizirani proces hlađenja je odabrani proces s dvokratnom kompresijom i dvokratnim prigušivanjem, na krugu isparivanja amonijaka od T_{i,DK} = - 30 °C. Numeričkom analizom je dokazano da je rashladni amonijačni proces s dvokratnom kompresijom i dvokratnim prigušivanjem najbolji proces, jer pokazuje najbolje vrijednosti rashladnog učinka i stupnja (faktora) hlađenja.

Tablica 2. Pregled stanja amonijaka po pojedinim točkama procesa za amonijačni rashladni ljevokretni proces

----	T [°C]	p [bar]	h [kJ / kg]	s [kJ / kgK]
1	- 30	1,1936	1343,023	3,62055
2	+ 57	4,3017	1515,793	3,62055
3	0	4,3017	1379,140	3,16631
4	+ 73	11,690	1518,616	3,16631
5	+ 30	11,690	1396,562	2,78910
6	+ 30	11,690	264,787	- 0,94428
7	+ 25	11,690	241,027	- 1,02240
8	0	4,3017	241,027	-----
9	0	4,3017	121,761	- 1,43695
10	- 30	1,1936	121,761	-----



Slika 2. Rashladni proces amonijalnog uređaja

$$\frac{p_K}{p_i} = \frac{11,690}{1,1936} = 9,794 \leq 12 \quad \Rightarrow \quad 1. \text{ kriterij (granični uvjet) je zadovoljen!}$$

$$T_4 = 73 \text{ } ^\circ\text{C} < (T_{gran} = 140 \text{ } ^\circ\text{C}) \quad \Rightarrow \quad 2. \text{ kriterij (granični uvjet) je zadovoljen!}$$

Zadano: $Q_0 = 2,3 \text{ MW} = 2300 \text{ kW}$... ukupni instalirani rashladni učin kruga $-30 \text{ } ^\circ\text{C}$
 $T_k = +30 \text{ } ^\circ\text{C}$ temperatura kondenzacije
 $T_{ok} = +25 \text{ } ^\circ\text{C}$ temperatura okoline
 $T_i = -30 \text{ } ^\circ\text{C}$ temperatura isparivanja kruga
 $p_m = (p_k \cdot p_i)^{1/2} = 3,735 \text{ bar}$.. izračunati tlak u međuhladnjaku, tako da imamo uštedeno Δw_{max}
 $p_m \approx 4,3017 \Rightarrow T_m = 0 \text{ } ^\circ\text{C}$... zaokružena vrijednost p_m na standardni tlak zasićenja pri $0 \text{ } ^\circ\text{C}$ (postojeći rashladni krug)

- **Specifični rashladni učinak:**
 $q_0 = h_1 - h_{10} = 1343,023 - 121,761 = 1221,262 \text{ kJ/kg}$
- **Specifični kondenzatorski učinak:**
 $q_k = h_4 - h_7 = 1518,616 - 241,027 = 1277,589 \text{ kJ/kg}$
- **Energetska bilanca oko međuhladnjaka (separatora):**
 $m_1 \cdot h_9 + m_1 \cdot x_1 \cdot h_3 = m_1 \cdot h_2 + m_1 \cdot x_1 \cdot h_8$

$$h_9 + x_1 \cdot h_3 = h_2 + x_1 \cdot h_8$$

$$h_9 - h_2 = x_1 \cdot (h_8 - h_3)$$

$$x_1 = \frac{h_9 - h_2}{h_8 - h_3} = \frac{121,761 - 1515,793}{241,027 - 1379,140} = 1,22486$$

- **Maseni protok prvog kompresijskog stupnja :**

$$m_1 = Q_0 / q_0 = 2300 / 1221,262 = 1,8833 \text{ kg/s}$$

- **Maseni protok drugog kompresijskog stupnja :**

$$m_2 = m_1 \cdot x_1 = 1,8833 \cdot 1,22486 = 2,3068 \text{ kg/s}$$

- **Specifični kompenzacijski rad prvog i drugog stupnja kompresije :**

$$w_1 = h_2 - h_1 = 1515,793 - 1343,023 = 172,770 \text{ kJ/kg}$$

$$w_2 = h_4 - h_3 = 1518,616 - 1379,140 = 139,476 \text{ kJ/kg}$$

- **Ukupni učinak kondenzatora :**

$$Q_K = m_2 \cdot q_k = 2,3068 \cdot 1277,589 = 2947,142 \text{ kW}$$

- **Ukupna kompenzacijska snaga prvog i drugog stupnja kompresije :**

$$P_1 = m_1 \cdot w_1 = 1,8833 \cdot 172,770 = 325,378 \text{ kW}$$

$$P_2 = m_2 \cdot w_2 = 2,3068 \cdot 139,476 = 321,743 \text{ kW}$$

- **Ukupna kompenzacijska snaga u oba stupnja kompresije :**

$$P = P_1 + P_2 = 325,378 + 321,743 = 647,121 \text{ kW}$$

- **Ukupni faktor hlađenja procesa :**

$$\varepsilon = \frac{Q_0}{P} = \frac{2300}{647,121} = 3,5542$$

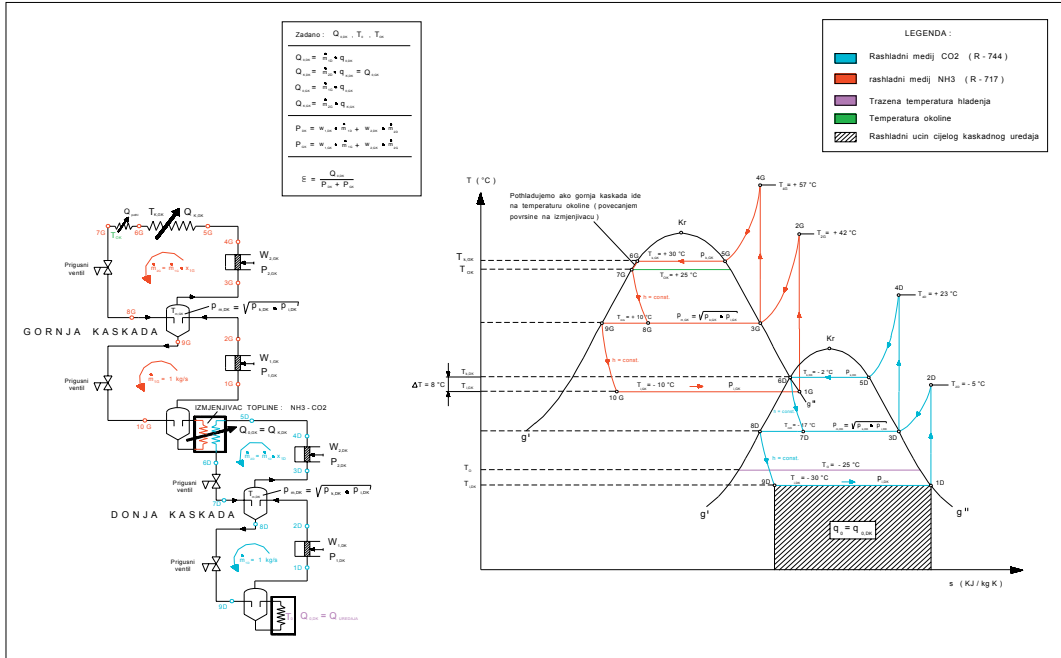
6.2. Termodinamička analiza rashladnog procesa odabranog kaskadnog uređaja

Analizirani proces hlađenja je rashladni proces kaskadnog rashladnog uređaja s dvokratnom kompresijom i dvokratnim prigušivanjem unutar obiju kaskada. U gornjoj kaskadi rashladnog uređaja nalazi se radna tvar amonijak, na krugu isparivanja od - 10 °C, dok se u donjoj kaskadi nalazi radna tvar CO₂, na krugu isparivanja od - 30 °C. Temperatura kondenzacije CO₂ unutar donje kaskade je -2 °C, dok je temperatura isparivanja NH₃ unutar gornje kaskade -10 °C. Razlika vrijednosti temperatura između temperature isparenja NH₃ u gornjoj kaskadi i temperature kondenzacije CO₂ u donjoj kaskadi jest 8 °C (preporuka je od 7 -10 °C). Numeričkom analizom je dokazano da je rashladni proces u kaskadnom rashladnom uređaju unutar obiju kaskada, proces s dvokratnom kompresijom i dvokratnim prigušivanjem onaj koji daje najbolje rezultate, jer pokazuje najbolje vrijednosti rashladnog učinka i stupnja (faktora) hlađenja.

6.3. Termodinamički proračun za donju kaskadu uređaja

Tablica 3. Pregled stanja CO₂ po pojedinim točkama procesa za donju kaskadu (DK) rashladnog ljevokretnog procesa

---	T [°C]	p [bar]	h [kJ / kg]	s [kJ / kgK]
1D	- 30	14,303	358,34	1,4837
2D	- 5	21,603	375,00	1,4837
3D	- 17	21,603	358,16	1,4198
4D	+ 23	33,050	393,00	1,4198
5D	- 2	33,050	353,74	1,3432
6D	- 2	33,050	116,86	0,4695
7D	- 17	21,603	116,86	-----
8D	- 17	21,603	83,06	0,3458
9D	- 30	14,303	83,06	-----



Slika 3. Rashladni proces CO₂/NH₃ - kaskadnog uređaja.

$$\frac{P_{K,DK}}{P_{i,DK}} = \frac{30,470}{14,303} = 2,130 \leq 12 \quad \Rightarrow \quad 1. \text{ kriterij (granični uvjet) je zadovoljen u DK !}$$

$$\frac{P_{K,GK}}{P_{i,GK}} = \frac{11,690}{2,9106} = 4,016 \leq 12 \quad \Rightarrow \quad 1. \text{ kriterij (granični uvjet) je zadovoljen u GK !}$$

$$T_{4,GK} = 57 \text{ } ^\circ\text{C} < (T_{gran} = 140 \text{ } ^\circ\text{C}) \quad \Rightarrow \quad 2. \text{ kriterij (granični uvjet) je zadovoljen !}$$

$p_{m,DK} = (p_{k,DK} \cdot p_{i,DK})^{1/2} = 21,742 \text{ bar}$ izračunati tlak u međuhladnjaku, ušteda na radu Δw_{max}
 $p_{m,DK} \approx 21,603 \Rightarrow T_{m,DK} = -17 \text{ } ^\circ\text{C}$ zaokružena vrijednost p_m na standardni tlak tlak zasićenja pri $-17 \text{ } ^\circ\text{C}$

Zadano: $Q_0 = Q_{0,DK} = 2,3 \text{ MW} = 2300 \text{ kW}$ ukupni rashladni učin kaskadnog uređaja
 $T_{K,DK} = -2 \text{ } ^\circ\text{C}$ temperatura kondenzacije u DK
 $T_0 = -25 \text{ } ^\circ\text{C}$ zadana temperatura hlađenja
 $T_{i,DK} = -30 \text{ } ^\circ\text{C}$ temperatura isparivanja CO₂ u DK

- **Specifični rashladni učin unutar DK :**

$$q_{0,DK} = h_{1D} - h_{9D} = 358,34 - 83,06 = 275,28 \text{ kJ/kg}$$

- **Specifični kondenzatorski učin unutar DK :**

$$q_{k,DK} = h_{4D} - h_{6D} = 393,00 - 116,86 = 276,14 \text{ kJ/kg}$$

- **Energetska bilanca oko međuhladnjaka (separatora) unutar DK :**

$$m_{1D} \cdot h_{8D} + m_{1D} \cdot x_{1D} \cdot h_{3D} = m_{1D} \cdot h_{2D} + m_{1D} \cdot x_{1D} \cdot h_{7D}$$

$$h_{8D} + x_{1D} \cdot h_{3D} = h_{2D} + x_{1D} \cdot h_{7D}$$

$$h_{8D} - h_{2D} = x_{1D} \cdot (h_{7D} - h_{3D})$$

$$x_{1D} = \frac{h_{8D} - h_{2D}}{h_{7D} - h_{3D}} = \frac{83,06 - 375,700}{116,86 - 358,16} = 1,20986$$

- **Maseni protok prvog kompresijskog stupnja unutar DK :**
 $m_{1D} = Q_{0,DK} / q_{0,DK} = 2300 / 275,28 = 8,3551 \text{ kg/s}$
- **Maseni protok drugog kompresijskog stupnja unutar DK :**
 $m_{2D} = m_{1D} \cdot x_{1D} = 8,3551 \cdot 1,20986 = 10,1085 \text{ kg/s}$
- **Specifični kompenzacijski rad prvog i drugog stupnja kompresije u DK :**
 $w_{1D} = h_{2D} - h_{1D} = 375,00 - 358,34 = 16,66 \text{ kJ/kg}$
 $w_{2D} = h_{4D} - h_{3D} = 393,00 - 358,16 = 34,84 \text{ kJ/kg}$
- **Ukupni učinak kondenzatora unutar DK :**
 $Q_{K,DK} = Q_{0,GK} = m_{2D} \cdot q_{k,DK} = 10,1085 \cdot 276,14 = 2791,361 \text{ kW}$
- **Ukupna kompenzacijska snaga prvog i drugog stupnja kompresije u DK :**
 $P_{1D} = m_{1D} \cdot w_{1D} = 8,3551 \cdot 16,66 = 139,196 \text{ kW}$
 $P_{2D} = m_{2D} \cdot w_{2D} = 10,1085 \cdot 34,84 = 352,180 \text{ kW}$
- **Ukupna kompenzacijska snaga u oba stupnja kompresije unutar DK :**
 $P_{DK} = P_{1D} + P_{2D} = 139,196 + 352,180 = 491,376 \text{ kW}$

6.4. Termodinamički proračun za gornju kaskadu uređaja

Tablica 4. Pregled stanja amonijaka po pojedinim točkama procesa za gornju kaskadu (GK) rashladnog ljevokretnog procesa

---	T [°C]	p [bar]	h [kJ/kg]	s [kJ/kgK]
1G	- 10	2,9106	1368,962	3,30670
2G	+ 42	6,1635	1468,674	3,30670
3G	+ 10	6,1635	1387,227	3,03428
4G	+ 57	11,690	1474,190	3,03428
5G	+ 30	11,690	1396,562	2,78910
6G	+ 30	11,690	264,787	- 0,94428
7G	+ 25	11,690	241,027	- 1,02240
8G	+ 10	6,1635	241,027	----
9G	+ 10	6,1635	169,431	- 1,26661
10G	- 10	2,9106	169,431	----

$$\frac{p_{K,DK}}{p_{i,DK}} = \frac{30,470}{14,303} = 2,130 \leq 12 \quad \Rightarrow \quad \text{1. kriterij (granični uvjet) je zadovoljen u DK !}$$

$$\frac{p_{K,GK}}{p_{i,GK}} = \frac{11,690}{2,9106} = 4,016 \leq 12 \quad \Rightarrow \quad \text{1. kriterij (granični uvjet) je zadovoljen u GK !}$$

$$T_{4,GK} = 57 \text{ °C} < (T_{gran} = 140 \text{ °C}) \quad \Rightarrow \quad \text{2. kriterij (granični uvjet) je zadovoljen !}$$

$$p_{m,GK} = (p_{k,GK} \cdot p_{i,GK})^{1/2} = 5,833 \text{ bar} \dots\dots\dots \text{izračunati tlak u međuhladnjaku, tako da imamo uštedeno } \Delta w_{max}$$

$$p_{m,GK} \approx 6,1635 \Rightarrow T_{m,GK} = + 10 \text{ °C} \dots\dots\dots \text{zaokružena vrijednost } p_m \text{ na standardni tlak zasićenja pri } + 10 \text{ °C}$$

Zadano : $Q_{0,GK} = Q_{K,DK} = 2791,361$ kW.....uvjet izmjenjivača kaskadnog uređaja
 $T_{K,GK} = + 30$ °C.....temperatura kondenzacije u GK
 $T_{ok} = + 25$ °C.....temperatura okoline
 $T_{i,GK} = - 10$ °C.....temperatura isparivanja NH₃ u GK

- **Specifični rashladni učinak unutar GK :**

$$q_{0,GK} = h_{1G} - h_{10G} = 1368,962 - 169,431 = 1199,531 \text{ kJ/kg}$$

- **Specifični kondenzatorski učinak unutar GK :**

$$q_{k,GK} = h_{4G} - h_{7G} = 1474,190 - 241,027 = 1233,163 \text{ kJ/kg}$$

- **Energetska bilanca oko međuhladnjaka (separatora) unutar GK :**

$$m_{1G} \cdot h_{9G} + m_{1G} \cdot x_{1G} \cdot h_{3G} = m_{1G} \cdot h_{2G} + m_{1G} \cdot x_{1G} \cdot h_{8G}$$

$$h_{9G} + x_{1G} \cdot h_{3G} = h_{2G} + x_{1G} \cdot h_{8G}$$

$$h_{9G} - h_{2G} = x_{1G} \cdot (h_{8G} - h_{3G})$$

$$x_{1G} = \frac{h_{9G} - h_{2G}}{h_{8G} - h_{3G}} = \frac{169,431 - 1468,674}{241,027 - 1387,227} = 1,13352$$

- **Maseni protok prvog kompresijskog stupnja unutar GK :**

$$m_{1G} = Q_{0,GK} / q_{0,GK} = Q_{K,DK} / q_{0,GK} = 2791,361 / 1199,531 = 2,3270 \text{ kg/s}$$

- **Maseni protok drugog kompresijskog stupnja unutar GK :**

$$m_{2G} = m_{1G} \cdot x_{1G} = 2,3270 \cdot 1,13352 = 2,6377 \text{ kg/s}$$

- **Specifični kompenzacijski rad prvog i drugog stupnja kompresije u DK :**

$$w_{1G} = h_{2G} - h_{1G} = 1468,674 - 1368,962 = 99,712 \text{ kJ/kg}$$

$$w_{2G} = h_{4G} - h_{3G} = 1474,190 - 1387,227 = 86,963 \text{ kJ/kg}$$

- **Ukupni učinak kondenzatora unutar GK :**

$$Q_{K,GK} = m_{2G} \cdot q_{k,GK} = 2,6377 \cdot 1233,163 = 3252,714 \text{ kW}$$

- **Ukupna kompenzacijska snaga prvog i drugog stupnja kompresije u GK :**

$$P_{1G} = m_{1G} \cdot w_{1G} = 2,3270 \cdot 99,712 = 232,030 \text{ kW}$$

$$P_{2G} = m_{2G} \cdot w_{2G} = 2,6377 \cdot 86,963 = 229,382 \text{ kW}$$

- **Ukupna kompenzacijska snaga u oba stupnja kompresije unutar GK :**

$$P_{GK} = P_{1G} + P_{2G} = 232,030 + 229,382 = 461,412 \text{ kW}$$

- **Ukupna kompenzacijska snaga cijelog kaskadnog uređaja :**

$$P_{UK} = P_{DK} + P_{GK} = 491,376 + 461,412 = 952,788 \text{ kW}$$

- **Ukupni faktor hlađenja procesa :**

$$\varepsilon = \frac{Q_0}{P_{UK}} = \frac{Q_{0,DK}}{P_{DK} + P_{GK}} = \frac{2300}{491,376 + 461,412} = 2,4139$$

7. ZAKLJUČAK

Jednostavnom usporedbom ovih dvaju rashladnih procesa, dolazi se do sljedećeg zaključka :

$$\varepsilon_{(amonijačno)} = 3,5542 > \varepsilon_{(kaskadno)} = 2,4139$$

koji nam govori da je ostvareni stupanj (faktor) hlađenja za čisti amonijačni rashladni proces veći i bolji od stupnja hlađenja za kaskadni rashladni proces i to za 32,09 %. Isto vrijedi i za uloženu kompenzacijsku energiju (snagu), koja je za 32,09 % veća u slučaju kaskadnog uređaja. Izbor kaskadnog uređaja je dakle skuplja varijanta hlađenja, jer je potrebno uložiti veću kompenzacijsku energiju, nego što je to slučaj za proces s čistim amonijačnim hlađenjem. Pored toga, potrebno je i čitavu donju kaskadu kaskadnog rashladnog uređaja izuzetno dobro izolirati, tj. izgradnja takvog uređaja bit će vrlo skupa. Međutim, velika prednost može biti uvođenja kaskadnog procesa s CO₂ jest u tome, što bi se izuzetno velike količine NH₃ (oko 74 tone) u sklopu Gavrilovićevo rashladnog postrojenja, smanjile na 5–6 tona NH₃ i to samo unutar tzv. “izmjenjivačkih kaskadnih prostora“, koji bi se nalazili u sklopu nove buduće strojarnice. Time bi se postigla velika sigurnost glede moguće havarije s radnim medijem kao što je NH₃, tj. mogućnost propuštanja i zagađenja radnih i rashladnih prostorija unutar odjela “Proizvodnja“ u potpunosti bi bila isključena.

8. OZNAKE I MJERNE JEDINICE FIZIKALNIH VELIČINA

Q ₀	- ukupni rashladni učinak	kW
Q _{0, UREĐAJA}	- ukupni rashladni učinak kaskadnog uređaja	kW
Q _k	- učinak kondenzatora	kW
DK	- donja kaskada kaskadnog uređaja	—
GK	- gornja kaskada kaskadnog uređaja	—
q ₀	- specifični rashladni učinak	kJ/kg
q _k	- specifičan kondenzatorski učinak	kJ/kg
T ₀	- temperatura hlađenja prostorije	°C
T _k	- temperatura kondenzacije	°C
T _i	- temperatura isparivanja	°C
T _{ok}	- temperatura okoline	°C
T _{KRIT}	- kritična temperatura	°C
p _k	- tlak kondenzacije	bar
p _i	- tlak isparavanja	bar
p _m	- tlak izobarnog međuhlađenja	bar
x	- udio radne tvari u kompresijskom stupnju	—
h	- entalpija	kJ/kg
s	- entropija	kJ/(kgK)
m	- maseni protok radnog medija	kg/s
w	- specifični kompenzacijski rad (energija)	kJ/kg
P	- ukupna kompenzacijska snaga	kW
ε	- koeficijent (faktor) hlađenja	—

9. LITERATURA

1. Ćurko T., Osnove tehnike hlađenja, Radna skripta, FSB, 1996.
2. ASHRAE Handbook of HVAC Systems and Equipment , American Society of Heating , Refrigerating and Air-Conditioning Engineers Inc. , Atlanta , SAD , 1997.
3. Brlek V., Rashladna tehnika, Tehnička enciklopedija, Svezak 7, Leksikog. zavod, Zagreb, 1985.
4. Donjerković P., Osnove i regulacija sustava grijanja, ventilacije i klimatizacije, II-dio, Alfa, Zagreb, 1996.
5. Recknagel / Sprenger, Priručnik za grijanje i klimatizaciju, Građevinska knjiga, Beograd, 1982.
6. Galović A., Nauka o toplini II, Sveučilišna naklada, Zagreb, 1990.
7. Kancir, Švaić, Uhlik, Monografije radnih tvari u tehnici hlađenja: Amonijak R-717, Zavod za nakladničku djelatnost iz sigurnosti na radu, Zagreb, 1981.
8. Kancir, Švaić, Uhlik, Monografije radnih tvari u tehnici hlađenja: Ugljični-dioksid R-744, Zavod za nakladničku djelatnost iz sigurnosti na radu, Zagreb, 1984.

Sistemi distribucije zraka u čistim prostorima s posebnim osvrtom na realizaciju projekta „PLIVA – Biotehnologija“

SAŽETAK

Osiguranje apsolutno čistih sterilnih uvjeta (**cleanroom**) , potrebnih za osjetljive procese u farmaceutskoj, elektroničkoj i inim industrijama, predstavlja kompleksan, multidisciplinarni zadatak. Njegovo rješavanje obuhvaća arhitektonski, HVAC i BMS (Building Management System) aspekt, s posebnim akcentom na sisteme distribucije zraka. Optimalni odabir i implementacija ovih sistema ne samo da su odlučujući pri ocjeni zadovoljenja radnih uvjeta, nego i pri ocjeni energetske – troškovne učinkovitosti postrojenja.

U ovom članku biti će izloženi principi rješavanja distribucije zraka u Tehnici čistih prostora, s posebnim osvrtom na realizaciju projekta „PLIVA – BIOTEHNOLOGIJA“

Ključne riječi

čisti prostori, sistemi distribucije zraka, energetske – troškovna učinkovitost

AIR DISTRIBUTION SYSTEMS IN CLEANROOMS WITH SPECIAL ATTENTION PAID TO THE “PLIVA – BIOTECHNOLOGY” PROJECT

SUMMARY

Securing of absolutely clean sterile conditions (**cleanroom**) , needed for sensitive processes in pharmaceutical, electronic and number of other industries, represents complex, multidisciplinary task. Finding of solution entails architectural, HVAC and BMS (Building Management System) aspect, with special emphasis on air distribution systems. Optimal choice and implementation of these systems are not only decisive when judging fulfillment of working conditions, but also when judging power – cost efficiency of facility.

Further in this article, shall be exposed principles of air distribution solving in Cleanroom technology, with special attention paid to realization of the “PLIVA – BIOTECHNOLOGY” project.

Keywords

cleanroom technology, air distribution systems, power – cost efficiency

Autor:

Dražen Zadro, dipl. ing. stroj.
Klimaoprema d.d.
K. Krešimira IV bb
10430 Samobor
tel: 01 3362513
fax: 01 3362905
mob: 091 5001938

ŠTO SU TO „ČISTI PROSTORI“?

Posve je jasno da je pojam „čisti prostori“ samoobjašnjavajući. Ipak, ovaj pojam ima vrlo precizno značenje definirano u ISO 14644 – 1 standardu:

„Prostor u kojem je koncentracija lebdećih čestica kontrolirana i koji je konstruiran i korišten na način da minimizira unos, generaciju i zadržavanje čestica unutar prostora i u kojem su drugi relevantni parametri kao što su temperatura, vlaga i tlak, ako je potrebno, kontrolirani.

KLASIFIKACIJA ČISTIH PROSTORA

Čisti prostori su klasificirani prema stupnju čistoće zraka. Metod koji je najlakše razumjeti i koji se univerzalno koristi je onaj izložen u verzijama američkog federlanog standarda 209 (U.S. Federal Standard) do izdanja „D“ u kojima se broj čestica jednak ili veći od 0.5 µm mjeri u jednoj kubnoj stopi zraka i rezultat ovog mjerenja se koristi za klasifikaciju prostora. Klasifikacija čistih prostora prema starijem Federal Standardu 209D je data u pojednostavljenom obliku u tablici.

Klasifikacija po Federal Standardu 209	1	10	100	1000	10 000	100 000
Broj čestica/ft ³ >= 0,5 µm	1	10	100	1000	10 000	100 000

Ova klasifikacija je zamjenjena metričkom verzijom izloženom u U.S. Federal Standardu 209 E, koji je publiciran 1992. godine. Danas je za klasifikaciju čistog prostora mjerodavan ISO 14644 – 1 standard.

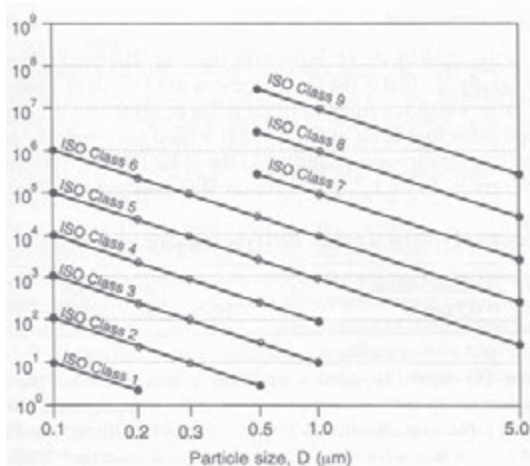
ISO klasifikacija je bazirana na sljedećoj jednadžbi:

$$C_n = 10^N \times (0,1/D)^{2,08}$$

Gdje su:

- C_n – maksimalno dozvoljena koncentracija (u česticama/m³ zraka) lebdećih čestica koja je jednaka ili veća od razmatrane veličine čestica; C_n je zaokružena na najbliži cijeli broj
- N – ISO klasifikacijski broj, koji ne prelazi vrijednost 9. Intermedijarni ISO klasifikacijski brojevi mogu biti specificirani, s tim da je 0,1 najmanji dozvoljeni inkrement broja N
- D – razmatrana veličina čestice u µm
- 0.1 – konstanta dimenzionirana u µm

Gornja formula izabrana je tako da se granice klase definirane u Federal Standardu kod standardne referentne veličine od 0,5 µm približno poklapaju s onim definiranim u ISO standardu.



il.1 Granice klasa po ISO standardu

Također treba uzeti u obzir da razina kontaminacije čistog prostora ovisi o aktivnostima koje pridonose pojavi čestica. Ako je prostor prazan, može biti postignuta vrlo niska razina koncentracije. Ako je u prostor ugrađena proizvodna oprema koja radi, u njemu će se biti prisutna veća koncentracija čestica.

Stoga pri klasifikaciji čistih prostora, treba uzeti u obzir i stanje prostora koji se klasificira i koje može biti:

- **As built:** instalacija je kompletirana, a svi priključci su spojeni, ali prostor je ispražnjen od materijala, opreme i osoblja
- **At rest:** instalacija je kompletirana, sa opremom instaliranom koja radi na način dogovoren između kupca i dobavljača, ali bez nazočnosti osoblja
- **Operational:** instalacija radi kako je i predviđeno, sa opremom, osobljem i materijalom

KLASE ČISTIH PROSTORA ZAHTJEVANE OD RAZLIČITIH INDUSTRIJA

Zahtjevani standard čistoće prostora ovisi o procesu koji se u njemu izvodi, što je proizvod osjetljiviji na kontaminaciju, to je standard čistoće viši.

Tablica 1: Procesi i klase čistoće koje oni zahtjevaju za njihovo uspješno izvođenje

Klasa 3	Ovi prostori se koriste u mikroelektronici kod submikronskih geometrija
Klasa 4	Ovi prostori se koriste u proizvodnji integriranih krugova sa linijama širine ispod 2µm
Klasa 5	Koristi se kad je potrebno osigurati prostor bez bakterija ili čestica u aseptičnoj proizvodnji injekcija, pri implantacijskim ili transplatacijskim operacijama ili pri izolaciji imunološki deficijantnih pacijenata
Klasa 6	Proizvodnja visoko kvalitetnih optičkih instrumenata, sastavljanje i testiranje preciznih žiroskopa i mikro ležajeva
Klasa 7	Montaža hidrauličke ili pneumatske opreme, servo ventila, uređaja za precizno mjerenje vremena
Klasa 8	Manje osjetljiv rad na optičkoj, pneumatskoj, hidrauličkoj i elektroničkoj

TIPOVI ČISTIH PROSTORA

Čisti prostori mogu biti podjeljeni u 4 glavna tipa:

1. Konvencionalni: Ovi prostori su također poznati kao turbulentno ventilirani i jasno su prepoznatljivi po metodi dobave zraka
2. Prostori sa jednosmjernim strujanjem: Prije poznati kao prostori sa laminarnim strujanjem
3. Prostori sa mješanim strujanjem: Ovi prostori su konvencionalno ventilirani, ali na mjestima gdje je proizvod izložen kontaminaciji koristi se kabine(ti) s jednosmjernim strujanjem
4. Zaštitni kabineti i izolatori: Oni se koriste unutar čistih prostora gdje je potreban najviši stupanj zaštite od kontaminacije

konvencionalno ventilirani čisti prostori

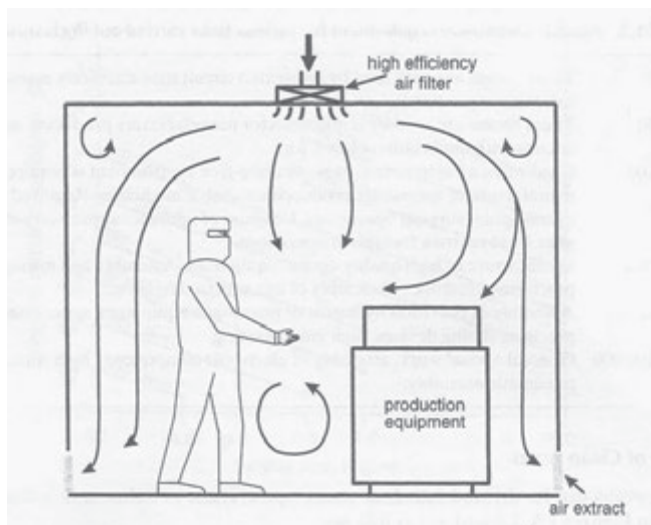
Metoda ventilacije koja se koristi kod ovog tipa prostora je slična onoj koja se koristi kod ventiliranja ureda, trgovina itd. U kojima se zrak dobavlja preko klima komora kroz elemente za distribuciju zraka smještene u stropu. Međutim ventilacija čistog prostora u odnosu na ventilaciju „običnog“ prostora razlikuje se na više načina:

1. Povećana dobava zraka: Da bi se u uredu ili trgovini postigao osjećaj komfornosti dovoljno je osigurati 2 – 10 izmjena zraka po satu. Tipični konvencionalni čisti prostor ima između 20 i 60 izmjena zraka po satu. Ova dodatna količina zraka osigurava se radi razblaživanja kontaminacije prostora do prihvatljive razine.
2. Visoko efikasni filteri: Kod čistog prostora primjenjuju se filteri mnogo efikasniji od konvencionalnih. Cleanroom filteri obično imaju efikasnost veću od 99,97% kod filtriranja čestica većih od 0,3 μm pri dobavi zraka. Ovi filteri su poznati kao HEPA (High Efficiency Particle Air) filteri. U mikroelektronici koriste se ULPA (Ultra Low Particle Air) filteri koji imaju još veću efikasnost.
3. Terminalni zračni filteri: Visoko efikasni filteri u čistim prostorima instaliraju se na točki ispuštanja zraka u prostor. Kod konvencionalnih HVAC sustava filteri se instaliraju na klima komorama, što znači da čestice sa stijenki kanala mogu biti inducirane u prostor.
4. Pretlačnost prostora: Da bi osigurali da zrak ne prolazi iz prljavijeg prostora u čistiji , cleanroom je u pretlaku u odnosu na prostor niže klase čistoće. Radi osiguranja ispravnog rasporeda tlakova i predviđenog kretanja zraka ugrađuju se regulatori tlaka, protoka, stabilizatori tlaka, te rešetke za prestrujavanje.

Sljedeći indikator da se radi o čistom prostoru je tip površinskog finiša na zidovima i stropu soba. Prostor se konstruira iz materijala koji ne generiraju čestice i koji se lagano čiste. Glatke površine na kojima ne može doći do skupljanja prašine i koje su lako dostupne pri čišćenju neophodne su kod ovakvog tipa soba. Zbog toga se ugrađuje pod sa izvedenim radiusima na spoju sa zidovima, te lampe potpuno poravnate sa stropom. Razina čistoće kod ovog tipa čistog prostora ovisi o količini i kvaliteti zraka dobavljenog u prostor, te o efikasnosti mješanja.

Čistoća je također ovisna o izvorima kontaminacije unutar prostora, odnosno o opremi i ljudima koji unutra rade. Što je više ljudi u prostoru, što je veća njihova aktivnost i što je lošija cleanroom odjeća koju nose, to je veća kontaminacija.

Čisti prostori ventilirani na ovaj konvencionalni način mogu maksimalno postići klasu čistoće 6 po ISO standardu (1000 po U.S. Federal Standardu), ali je mnogo vjerojatnije da će klasa čistoće biti 7 (10 000).



il.2 Shema strujanja u konvencionalno ventiliranom čistom prostoru

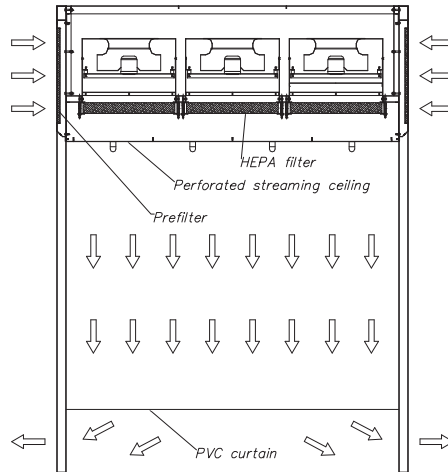
čisti prostori s jednosmjernim strujanjem

Jednosmjerno strujanje zraka se koristi kad je potrebno osigurati nisku koncentraciju čestica bakterija u prostoru. Ovaj tip čistog prostora prije je bio poznat kao „laminar flow“, obično horizontalni ili vertikalni, kod jednolične brzine između 0,3 i 0,45 m/s kroz cijeli prostor. Ova brzina strujanja smatra se dovoljnom za uklanjanje relativno velikih čestica, prije nego što se „priljepe“ za površinu. Bilo koji kontaminant stoga može biti odmah uklonjen pomoću zračne struje, dok se konvencionalni sistem oslanja na mješanje i razblaživanje radi uklanjanja kontaminacije. Teoretski, u praznoj sobi bez smetnji strujanju zraka, kontaminacija može biti brzo uklonjena pri brzinama mnogo nižim od gore spomenutih. Međutim, u praksi, opstrukcije strujanja uzrokuju pretvaranje jednosmjernog zračnog toka u turbulentni. Viša razina kontaminacije uspostavlja se u ovim turbulentnim područjima. Zbog toga je neophodno imati brzinu strujanja između 0,3 i 0,45 m/s da bi se poremećeno strujanje brzo nanovo uspostavilo, te da bi kontaminacija oko uzroka poremećaja bila adekvatno razblažena.

Jednosmjerno strujanje je korektno definirano u pojmovima brzine strujanja, čistoća prostora direktno je proporcionalna brzini strujanja. Broj izmjena zraka ne bi se smio koristiti pošto je u korelaciji sa zapreminom prostora, što nema utjecaja na performanse sustava.

Zračni volumeni koji se dobavljaju u sobu su mnogo puta (10 – 100) veći od onih kod konvencionalno ventiliranih prostora. Stoga je trošak investicije i pogona mnogo veći!

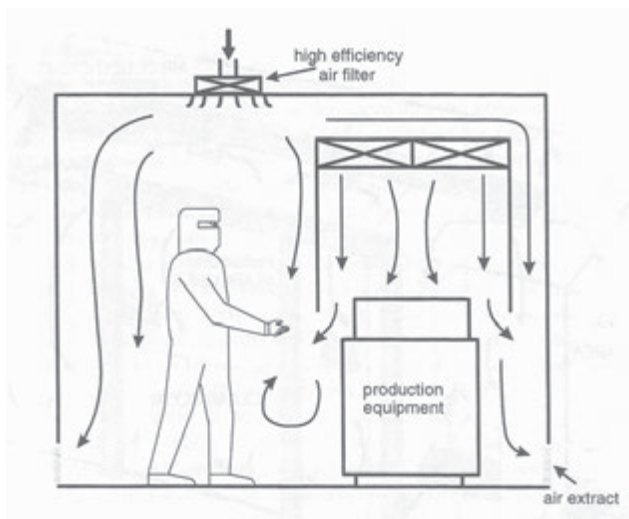
Praktična izvedba ovakvog tipa čistog prostora obično se izvodi preko „Laminar flow“ kabina.



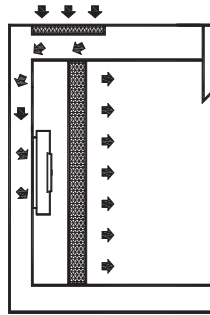
Il. 3 shema strujanja „laminar flow“ kabine

čisti prostori s mješovitim strujanjem

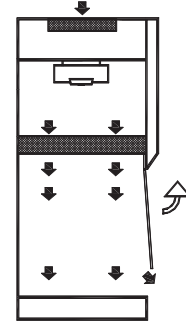
Ovaj tip prostora je zapravo konvencionalno ventiliran, ali se u njemu kritične operacije izvode u uređajima koji osiguravaju jednosmjerni tok zraka, to jest u kabinama ili kabinetima. Ovaj mješani sistem je vrlo popularan jer se najbolji uvjeti osiguravaju samo tamo gdje su neophodni, pri čemu se ostvaruju vrlo značajne uštede. Kabineti mogu biti s horizontalnim ili vertikalnim „laminarnim“ strujanjem, kao što je prikazano na slikama.



il. 4 shema strujanja u čistom prostoru s mješanim strujanjem



il. 5 Shema strujanja horizontalnog kabineta

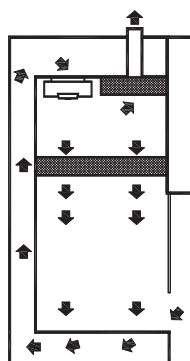


il. 6 shema strujanja vertikalnog kabineta

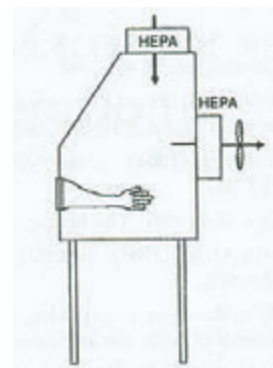
zaštitni kabineti i izolatori

Čisti prostori se koriste za sprečavanje kontaminacije produkata u sobi. Međutim prilično je uobičajeno da se pri određenim procesima oslobađaju toksične kemikalije ili opasne bakterije i da one moraju biti zadržane. Ovakvi primjeri mogu se pronaći u biotehnološkoj industriji gdje se zahtjeva zadržavanje genetski inženjiranih mikroorganizama. Ovaj problem se rješava pomoću mikrobioloških zaštitnih kabineta, koji pored zaštite produkta osiguravaju i zaštitu osoblja, te okoline.

U visokorizičnim laboratorijima koriste se izolatori. Ovi sistemi za zadržavanje ili isključivanje kontaminacije u principu ne ovise o zračnoj struji radi ispunjenja svoje funkcije, već o zidovima od metala i plastike. Ovaj princip izolacije očito ima izvrsne karakteristike i razvije je za upotrebu u modernoj cleanroom tehnologiji.



il. 7 shema strujanja zaštitnog kabineta (klasa II)



il. 8 Shema strujanja izolatora (klasa III)

ZAKLJUČAK

Ostvarivanje određene, tražene razine čistoće u čistim prostorima indirektno je vezano za različite parametre o kojima se treba voditi računa pri izboru sistema distribucije zraka, te HVAC sustava. U dolje priloženoj tablici dat je prikaz ovih parametara, s obzirom na zadanu klasu čistoće prostora. Podaci u njoj izloženi rezultat su dugogodišnjeg iskustva pri projektiranju čistih prostora. Dijapazoni izloženih parametara rezultat su različitih procesa koji se odvijaju u čistim prostorima, koji, zbog svoje prirode, različito utječu na kontaminaciju prostora.

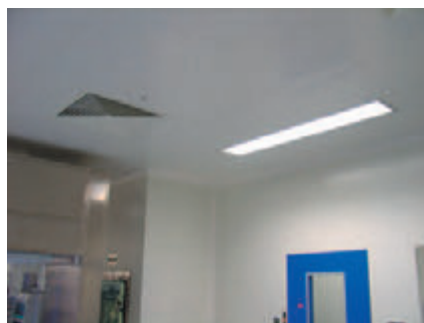
Tablica 2. Usporedba različitih klasa čistoće po različitim standardima

Klase čistoće po ISO 14644-1 standardu	8	7	6	5	4	3	
Klase čistoće po U.S. Federal standardu 209 E	100 000	10 000	1000	100	10	1	
Klasifikacija čistoće po EU GMP	D	C		A (B)			
Maksimalan dozvoljen broj čestica (čestica/m ³) jednak ili veći od	5.0 μm	29 300	2930	293	29	-	-
	1.0 μm	832 000	83 200	8320	832	83	8
	0.5 μm	3 520 000	352 000	35 200	3520	352	35
	0.3 μm	-	-	102 000	10 200	1020	102
	0.2 μm	-	-	237 000	23 700	2370	237
	0.1 μm	-	-	1 000 000	100 000	10 000	1000
Tip strujanja	turbulentno	turbulentno	prijelazno	jednosmjerno	jednosmjerno	jednosmjerno	
Minimalan broj izmjena zraka (i/h)	10 - 20	30 - 70	70 - 160	-	-	-	
Minimalna brzina strujanja (m/s) @ istrujne ravnine	0.08 – 0.10	0.10 – 0.15	0.15 – 0.25	0.26 – 0.36	0.36 – 0.41	0.38 – 0.46	
Minimalna pokrivenost stropa filterima (%)	15	30	40	75	100	100	
Tip filtera	H 12	H 12	H14	H 14	U 16	U 16	
Otvori za ubacivanje zraka	Stropni zakretni distributeri	Stropni zakretni distributeri	Filterski istrujni strop	Filterski istrujni strop	Filterski istrujni strop	Filterski istrujni strop	
Otvori za odsis zraka	Postranični zidni	Nisko postavljeni postranični zidni	Nisko postavljeni postranični	Podni ili nisko postavljeni postranični	podni	podni	
Nadtlak čistog prostora (Pa)	10-15	10-15	10-15	10-15	1.5	1.5	
Temperatura (°C)	22°C±1.0°C, ne više od 2°C varijacije tijekom 4 sata	22°C±1.0°C, ne više od 2°C varijacije tijekom 4 sata	22°C±1.0°C, ne više od 2°C varijacije tijekom 4 sata	22°C±0.5°C, ne više od 1°C varijacije tijekom 4 sata	22°C±0.25°C, ne više od 0.5°C varijacije tijekom 4 sata	22°C±0.25°C, ne više od 0.5°C varijacije tijekom 4 sata	
Vlažnost (%)	45 % RH ± 5 %, ne više od 5 % varijacije tijekom 4 sata	45 % RH ± 5 %, ne više od 5 % varijacije tijekom 4 sata	45 % RH ± 5 %, ne više od 5 % varijacije tijekom 4 sata	45 % RH ± 5 %, ne više od 3 % varijacije tijekom 4 sata	45 % RH ± 2 %, ne više od 3 % varijacije tijekom 4 sata	45 % RH ± 2 %, ne više od 3 % varijacije tijekom 4 sata	

OSVRT NA REALIZACIJU PROJEKTA PLIVA BIOTEHNOLOGIJA

Realizacija projekta PLIVA – Biotehnologija vođena je prethodno izloženim principima. Prostor tlocrtno površine cca. 300 m² podjeljen je na dvije zone klasa 7 i 8 po ISO 14644 – 1 standardu. Uvjeti čistoće prostora ostvareni su konvencionalno vodenom klimatizacijom prostora. Osjetljive faze biotehnološkog procesa (bioreaktor – faza uzimanja uzoraka) osigurane su kabinama sa „laminarnim“ tipom strujanja. Tamo gdje se radi s produktima opasnim po zdravlje operatera, a istodobno je potrebno osigurati uzorak, primjenjeni su mikrobiološki zaštitni kabineti (klasa II). Primjenom mješanog tipa strujanja u čistom prostoru biti će ostvarene značajne energetske uštede (pogonski troškovi), a i trošak investicije (kapitalni trošak)je značajno smanjen.

Nekoliko slika sa projekta PLIVA – Biotehnologija kao ilustracija u članku iznesenih teza i stavova.



BIBLIOGRAFIJA

1. ISO 14644 – 1 standard
2. ISO 14644 – 4 standard (Appendix B)
3. Cleanroom Design, Second Edition, Edited by W. Whyte, John Wiley & Sons Ltd., April 2001, str. 7 - 20

4. Cleanroom airflow measurement: Velocity, air changes per hour or percent filter coverage, Mike Fitzpatrick and Ken Goldstein, Ph. D, CleanRooms, Volume 16, No. 5, May 2002
5. 15 factors that influence cleanroom design and construction cost, Richard V. Pavlowsky PH.D, P.E., CleanRooms, Volume 18, No. 07, July 2004.

MOGUĆNOSTI PRIMJENE ZRAČNIH ZAVJESA U KOMERCIJALNIM I INDUSTRIJSKIM OBJEKTIMA

Siniša Galušić, dipl.ing.

KLIMAOPREMA d.d.
Gradna 78A, 10430 SAMOBOR, Hrvatska
email: sgalusic@klimaoprema.hr

SAŽETAK

Rješavanje problema energetske gubitaka i postizanje maksimalne ugodnosti u komercijalnim i industrijskim objektima postali su vrlo odgovorne zadaće u projektiranju sustava za grijanje i klimatizaciju. Pitanje uštede energije je jedan od temeljnih zadataka koji se postavljaju pred inženjere u današnjem potrošačkom dobu. Gubitak skupo tretiranog zraka iz klimatiziranih objekata, pojavu propuha, miješanje različitih para i plinova i sl. je moguće spriječiti primjenom uređaja – zračne zavjese.

Iako, primarno namijenjena smanjenju energetske gubitaka, zračna zavjesa je stekla široku primjenu kako u komfornoj klimatizaciji, tako i u različitim industrijama i proizvodnim procesima.

Ovaj članak daje kratak osvrt na mogućnosti primjene zračnih zavjesa uz pojašnjenje osnovnih funkcionalnih principa.

Ključne riječi:

Zračna zavjesa, zračni mlaz, energetska ušteda

POSSIBILITIES OF APPLYING AIR CURTAIN IN COMMERCIAL AND INDUSTRIAL BUILDINGS

SUMMARY

Solving of energy losses problem and achieving of maximal comfort in commercial and industrial buildings have become a very responsible tasks in design of HVAC systems. Question of energy saving is one of essential missions which stand in front of engineers in today consumers age. Prevention of lost of expensive treated air from air conditioned buildings, prevention of draft, prevention of mixing of different vapors and gases, etc. is possible by use of device called – air curtain.

Although basically assigned for energy losses reduction, air curtain has obtained wide application as in comfort air conditioning, so to different industries and product processes.

This article gives short review on possibilities of applying air curtain with explanation of basic functional principles.

Keywords:

Air curtain, air jet, energy saving

UVOD

Zračna zavjesa je uređaj namijenjen sprečavanju prodora zraka, nečistoća i štetnih čestica kroz vrata i prolaze komercijalnih i industrijskih objekata, pomoću zračnog mlaza u ravnini otvora. Zračni mlaz odlikuje visoko laminarno strujanje i mogućnost podešavanja kuta strujanja s ciljem što bolje prevencije prodora zraka i formiranja uniformne prepreke.

Zračne zavjese su stekle široku primjenu u poslovnim zgradama, restoranima, bolnicama, kazalištima, školama, procesnoj industriji i ostalim objektima gdje je bitno ostvariti ugodnu sredinu uz smanjenje energetske troškova ili spriječiti miješanje plinova i para koji se razvijaju kao produkti različitih proizvodnih procesa.

TIPOVI ZRAČNIH ZAVJESA

Postoje dva osnovna tipa zračnih zavjesa:

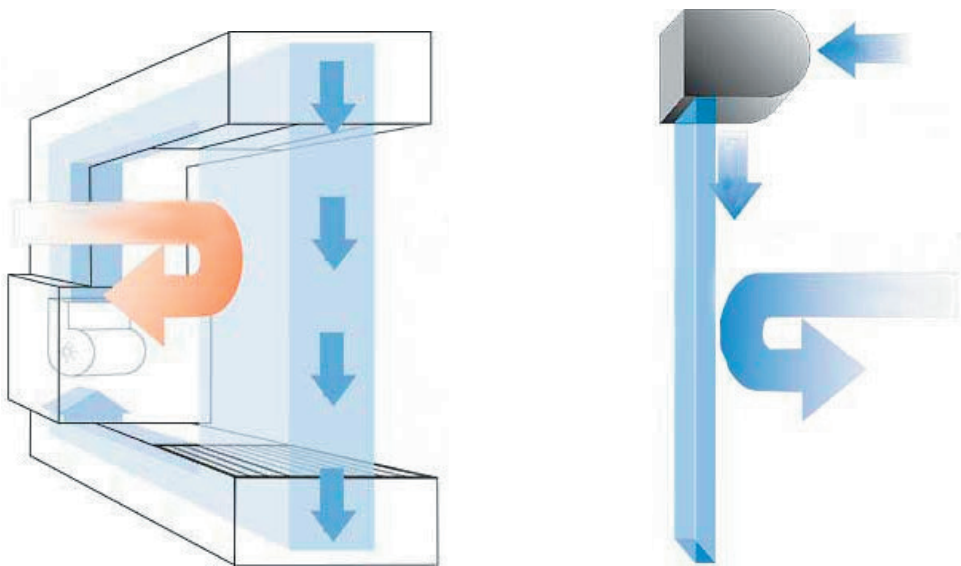
- recirkulirajuće zračne zavjese,
- nercirkulirajuće zračne zavjese.

Recirkulirajuće zračne zavjese ispuhuju zrak kroz istrujnu mlaznicu na jednoj strani vrata (obično na vrhu), a usisavaju ga na drugoj strani (u ravnini poda) kroz tlačnu rešetku. Taj usisani zrak se potom filtrira, po potrebi dogrijava i ponovno ispuhuje kroz istrujnu mlaznicu. U osnovi ovakve jedinice su modificirani sustavi grijanja i odlikuje ih velika protočna količina zraka što izravno utječe na visoke početne i operacijske troškove. Ujedno, kako zrak treba biti filtriran povećavaju se i troškovi održavanja ovakvog sustava.

Recirkulirajuće zračne zavjese se najčešće primjenjuju na ulazima komercijalnih objekata, kao što su supermarketi i trgovački centri.

Nercirkulirajuće zračne zavjese imaju mnogo veću primjenu. Odlikuju ih manji početni i operacijski troškovi, jer kako ne koriste cirkulirajući zrak mogu se instalirati bez ugradnje filtera što ih čini i jeftinijim za održavanje.

Ovakve zračne zavjese ispuhuju zrak velike brzine kroz konvergentnu isturjnu mlaznicu, a za najveću učinkovitost treba ostvariti laminarno strujanje mlaza uz kut strujanja obično od 20 stupnjeva prema tlačnoj strani.

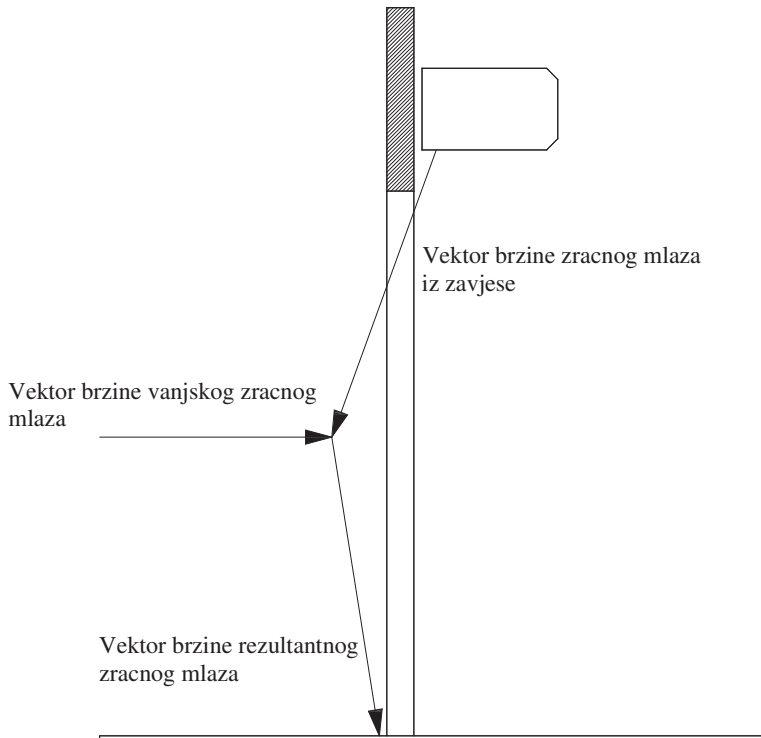


Ilustracija 1. Recirkulirajući i nerekulirajući tip zračne zavjese

FIZIKALNI PRINCIP DJELOVANJA ZRAČNE ZAVJESE

Fizikalno objašnjenje efekta zračne zavjese proizilazi iz činjenice da zrak kao fizikalni medij ima određenu masu i brzinu gibanja, te po 1. Newton-ovom stavku mijenja smjer i brzinu gibanja uslijed djelovanja neke druge sile.

Kada se zračni mlaz iz mlaznice zračne zavjese, kojeg odlikuje velika brzina i smjer gibanja prema dolje, sudari sa horizontalnom strujom zraka na ulaznom otvoru, formira se rezultatni mlaz koji skreće prema dolje, ispred ravnine ulaznog otvora. Na taj način je spriječen prodor vanjskog zraka u unutrašnjost prostorije i stanje zraka same prostorije ostaje nepromijenjeno.



Ilustracija 2. Efekt zračne zavjese

U idealnom slučaju strujanje vanjskog zraka prema unutrašnjosti prostorije bilo bi potpuno zaustavljeno kada bi se horizontalna komponenta brzine zračnog mlaza iz zavjese izjednačila sa brzinom vanjskog zraka uz jednaki maseni protok. Fizikalno se ovaj granični uvjet može izraziti preko zakona održanja energije, tj. preko jednakosti kinetičkih energija mlazova:

$$E_{KM_1} = E_{KM_2}, \text{ odnosno}$$

$$m_{M_1} \cdot v_{M_1}^2 = m_{M_2} \cdot v_{M_2}^2, \text{ gdje su:}$$

E_{KM_1} – kinetička energija vanjskog zračnog mlaza,

E_{KM_2} – kinetička energija horizontalne komponente zračnog mlaza iz zavjese,

m_{M_1} – maseni protok vanjskog zračnog mlaza,

m_{M_2} – maseni protok zračnog mlaza iz zavjese,

v_{M_1} – brzina vanjskog mlaza,

v_{M_2} – brzina horizontalne komponente zračnog mlaza iz zavjese.

Uz pretpostavku jednakosti masenih protoka mlazova, $m_{M_1} = m_{M_2}$, slijedi da je efekt zračne zavjese ostvaren uz $v_{M_1} = v_{M_2}$.

UGRADNJA ZRAČNIH ZAVJESA

Zračna zavjesa može biti ugrađena iznad ulaznih vrata, sa jedne strane ili sa obje strane vrata. Najčešći način ugradnje je horizontalna ugradnja iznad vrata jer se tako izbjegavaju oštećenja zavjese koja mogu nastati prolazom ljudi i robe kroz vrata. Ujedno, prodor vanjskog zraka u prostoriju je ograničen na malu količinu koja može ući na razini poda, ukoliko je zavjesa ugrađena na veću visinu, pa brzina mlaza pri podu nije dovoljna da zaustavi prodor vanjskog zraka.



Ilustracija 3. Horizontalna ugradnja zračne zavjese

Kod vertikalne ugradnje veća je mogućnost oštećenja zračne zavjese, a na učinkovitost takve zavjese značajno utječe veličina i brzina objekta koji kraj nje prolazi. Kada se radi o vertikalnoj ugradnji zračne zavjese u industrijskim objektima, npr. uz skladišna vrata, viličar koji prolazi kroz otvor zaustavit će zračni mlaz na svojoj bočnoj površini tako da će dio vrata ostati nezaštićen i doći će do miješanja vanjskog zraka sa zrakom u prostoriji. Učinkovitiji način vertikalne ugradnje je ugradnja zavjese sa obje strane vrata gdje zračni mlazovi struje jedan prema drugom, te se sudaraju na polovici širine vrata. Tako su vrata u potpunosti pokrivena zračnom zavjesom i pri prolazu objekata kroz nju. Nedostatci ovakvog načina ugradnje su podložnost oštećenjima, te veća cijena ugradnje ovakvog sustava zbog potrebe za dvije jedinice.



Ilustracija 4. Vertikalna ugradnja zračnih zavjesa

Prilikom ugradnje zračne zavjese potrebno je voditi računa o nekoliko čimbenika koji utječu na ispravno i učinkovito funkcioniranje zračne zavjese, a to su:

- dimenzije otvora (visina i širina) koji se štiti zračnom zavjesom, te raspoloživi prostor za ugradnju,
- klimatski parametri područja u kojem se zaštićeni objekt nalazi (brzina vjetera, zimske i ljetne temperature i sl.),
- postojanje podtlaka u objektu, koji može biti uzrokovan odsisnim ventilatorima, jer tada zračni mlaz biva uvučen u prostoriji,
- potreba za dogrijavanjem zračnog mlaza (hladnozračna ili toplozračna zavjesa).

PREDNOSTI ZRAČNIH ZAVJESA

Zračne zavjese odlikuje raznolikost primjene i njihove prednosti su brojne, a ogledaju se u:

- upravljanju energetske troškovima,
- upravljanju gibanjem zraka unutar objekta,
- regulaciji stanja zraka,
- kontroli čistoće zraka,
- sprečavanju temperaturne stratifikacije,
- sprečavanju prodora insekata, nečistoća i sl.

Sve navedene prednosti zračnih zavjesa utječu na povećanje ugodnosti, kvalitete rada djelatnika, povećanje produktivnosti i korisnog radnog prostora, čime se smanjuju odsutnost djelatnika s posla, potreba za održavanjem vrata itd.

PRIMJENA ZRAČNIH ZAVJESA

Primjena zračnih zavjesa u industrijskim objektima

Osnovna zadaća zračnih zavjesa u industrijskim objektima je prevencija prodora vanjskog zraka kroz otvore u grijane ili hladne prostorije. Tipični otvori gdje se primjenjuju zračne zavjese su ulazna/izlazna vrata na postrojenjima ili skladištima, te unutarnja vrata između prostorija različitih temperatura. Također postoje i određene specijalne primjene zračnih zavjesa u upravljanju temperaturom (ljevaonice, autoklave), vlažnosti, prašinom ili svježim zrakom.

Većina industrijskih objekata izvedena je sa visokim stropom, te prilikom grijanja takvih objekata dolazi do izražaja temperaturna stratifikacija. To je pojava kada se topli zrak uslijed uzgona podiže u više slojeve prostorije, a hladniji zrak pada dolje, tako da je unatoč grijanju, u zoni boravka ljudi, prisutan osjećaj hladnoće. Pri tome se neće dobiti željena temperatura ako se pojača snaga grijanja.

Ova pojava se otklanja primjenom zračne zavjese čiji je usisni otvor spojen na vertikalni kanal koji se proteže do stropa, tako da zavjesa usisava topli zrak ispod stropa i ispuhuje ga u niže slojeve prostorije pri čemu se formira makrovtlog koji mješanjem toplijeg i hladnijeg zraka ujednačava temperaturu u prostoriji.

Primjena zračnih zavjesa u klimatiziranim prostorijama

Klimatizirane prostorije su, u pravilu, dobro izbalansirane i rijetko izvedene u podtlaku. Zapravo, u takvim prostorijama je često prisutan mali predtlak jer se sustavom klimatizacije u prostoriju ubacuje svjež zrak.

U mnogim objektima takve klimatizirane prostorije su povezane prolazom sa neklimatiziranim prostorijama, te je potrebno odvojiti ove dvije cjeline radi zadržavanja željenih parametara u prostorijama.

Zračne zavjese koje se primjenjuju u ovakve svrhe trebaju biti dimenzionirane samo za propuh koji se javlja uslijed razlike temperatura dvaju strana. U takvim primjenama zračna zavjesa treba biti ugrađena na neklimatiziranoj strani, a zračni mlaz usmjeren od klimatizirane strane, kako bi se svela na minimum količina zraka zračnog mlaza koja ulazi u klimatiziranu prostoriju.

Kada se radi o ulaznim vratima u klimatiziranu prostoriju iz vana, potrebno je zračnu zavjesu dimenzionirati za veću brzinu propuha. U takvim primjerima zračna zavjesa treba biti instalirana iznad vrata sa unutrašnje strane, a zračni mlaz treba prilagoditi tako da se gubitak klimatiziranog zraka svede na najmanju količinu. Ovakva unutarnja ugradnja zavjese je korisna i u zimskom razdoblju kada zavjesa obavlja funkciju sprečavanja prodora hladnog vanjskog zraka.

Primjena zračnih zavjesa u komorama visoke temperature

Primjena zračnih zavjesa u komorama visoke temperature rezultira ukupnom uštedom energetske potrošnje komore do 40%. Obično se zračne zavjese u komorama ugrađuju

horizontalno, iznad ulaza u komoru, a zračni mlaz je blago usmjeren prema unutrašnjosti komore, te sadržava vrući zrak koji se uslijed uzgona podiže u više slojeve komore. Mnoge zračne zavjese normalno funkcioniraju i u komorama sa temperaturama do 250 °C, s tim da elektromotor ventilatora treba biti postavljen izvan komore i zaštićen od utjecaja vrućeg zraka.

Primjena zračnih zavjesa za kontrolu vlažnosti i prodora prašine

U ovakvim primjenama zračna zavjesa treba biti ugrađena u prostoriji u kojoj je kontrolirana čistoća i vlažnost, a zračni mlaz se usmjerava prema nekontroliranoj strani, kako bi se spriječio prodor prašine, nečistoća i vlažnog zraka iz vana. Učinkovitost zračnih zavjesa u kontroli prašine i vlažnosti je otprilike 70%, dok je 30% neučinkovitosti uzrokovano česticama koje se iz vana probiju kroz zračnu zavjesu, zbog nedovoljne jakosti mlaza ili nedovoljne pokrivenosti vrata zračnom zavjesom.

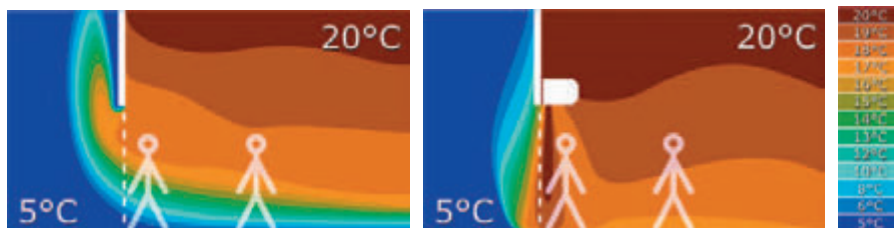
Primjena zračnih zavjesa u rudnicima

Zračne zavjese se koriste u rudnicima na dubinama do 350 m za upravljanje strujanjem svježeg zraka koji se dovodi u okno. Ugrađuju se na nekoliko točaka duž glavne linije za dobavu zraka, kako bi obavljale usmjeravanje zraka u željenom pravcu.

Primjena zračnih zavjesa u komercijalnim objektima

Zračne zavjese su našle veliku primjenu na ulazima komercijalnih objekata u smislu redukcije energetske potrošnje i povećanja ugodnosti boravka. U zimskom razdoblju zavjese omogućuju zadržavanje grijanog zraka unutar objekta, a istovremeno sprečavajući prodor hladnog zraka iz vana. Mogu biti izvedene sa električnim, vodenim ili parnim izmjenjivačima, osiguravajući tako topli zračni mlaz u ravnini ulaznih vrata. Tijekom ljetnog razdoblja zavjese sprečavaju prodor toplog i vlažnog vanjskog zraka u objekt, dok zadržavaju u objektu skupo tretirani klimatizirani zrak.

Ove zračne zavjese, za razliku od zavjesa koje se primjenjuju u drugim objektima, trebaju zadovoljiti zahtjev funkcionalnosti u kompromisu sa zahtjevom ugodnosti. To znači da zavjesa treba osigurati dovoljno jaku uniformnu zračnu prepreku na ulaznim vratima, a istovremeno ne smije prejako puhati po ljudima koji prolaze kroz vrata. Tako da je odabir snage ventilatora u zavjesi i oblika istrujnog otvora vrlo osjetljivo pitanje koje traži stručnost i iskustvo inženjera koji se bave konstruiranjem ovakvih uređaja.



Ilustracija 5. Sprečavanje prodora hladnog vanjskog zraka i poništavanje temperaturne stratifikacije

U mnogim slučajevima kada je projektom komercijalnog objekta predviđena izgradnja ulaznog preprostora, ugradnja zračne zavjese je često funkcionalnije i ekonomičnije rješenje. To je posebice učinkovito kod prolaza sa velikim prometom ljudi kada su često oboja vrata otvorena, te preprostor tada gubi svoju svrhu. Tada je zračna zavjesa mnogo učinkovitije rješenje jer omogućuje veliku uštedu, kako u početnim tako i u operacijskim troškovima, uz povećanje korisnog prostora.

Ovakve zračne zavjese se uglavnom ugrađuju horizontalno iznad vrata i prolaza čime je praktički otklonjena mogućnost oštećenja zavjese ili nezgode. Pri ugradnji zavjese treba voditi računa o tome da zračni mlaz ne udara u neku prepreku (mehanizam kliznih vrata, senzori i sl.), jer razbijanjem mlaza smanjuje se njegova učinkovitost u zaštiti prostorije. Također je preporučljiva ugradnja termostata, u zavjesu ili u samu prostoriju, putem kojeg se upravlja snagom grijača u grijanim jedinicama, tako da se temperatura u ulaznom području prostorije održava konstantnom.

Još neke prednosti primjene zračnih zavjesa u komercijalnim objektima su smanjenje troškova održavanja vrata obzirom da se ne moraju često otvarati i zatvarati, te uklanjanje temperaturne stratifikacije u prostorijama sa visokim stropom.

Zračne zavjese u komercijalnim objektima su tihe, kompaktne i isplative u vrlo kratkom roku. Većina jedinica se može koristiti tijekom cijele godine i mogu se prilagođavati sezonskim uvjetima primjenom prigušivača ili višebrzinskih motora.

Primjena zračnih zavjesa u hladnjačama

Otvaranjem vrata hladnjače prilikom unosa ili iznosa robe dolazi do značajnog gubitka ohlađenog zraka uz istovremeni prodor toplog zraka iz vana u hladnjaču. To rezultira velikim energetske gubicima i smanjenjem radne sigurnosti u smislu kondenzacije i ledenja pada, te pojavom magle u radnom prostoru uz povećanu mogućnost kvarenja hrane. Različiti oblici zastora koji se koriste za reduciranje ovih efekata smanjuju vidljivost i neugodni su za prolaz zbog kondenziranja i ledenja, a potencijalno mogu skupljati nečistoće i bakterije.

Istraživanja su pokazala da zračne zavjese, kada su pravilno dimenzionirane i postavljene, ostvaruju učinkovitost od 85% u upravljanju protokom zraka kroz prolaze ledenjača i hladnjača. Također je dokazano da ugradnja zračne zavjese počinje biti isplativa već kod hladnjača kojima se vrata otvaraju ukupno jedan sat tijekom dana.

Zračna zavjesa se ugrađuje na nehladenoj strani prolaza i ispuhuje zračni mlaz koji pod kutem udara u pod i razbija se na dva dijela. Pravilnim podešavanjem količine zraka i kuta istrujne mlaznice, jedan dio mlaza se suprotstavlja hladnom zraku koji nastoji izaći iz hladnjače, dok drugi dio mlaza spriječava prodor vanjskog zraka u hladnjaču.

Za maksimalnu učinkovitost ovakve zavjese trebaju biti izvedena sa varijabilnim protokom zraka i usmjerivim krilcima istrujne mlaznice kako bi se zračni mlaz prilagodio uz minimalnu turbulenciju, što povećava iskoristivost jedinice.

ZAKLJUČAK

Primjena zračnih zavjesa nudi mnoštvo prednosti i pogodnosti u objektima u kojima su ugrađene. Uz dugi vijek trajanja, jednostavno održavanje i malu potrošnju energije te prednosti se ogledaju u:

- Povećanju potrebnih uvjeta za rad djelatnika,
- Energetskoj uštedi kroz upravljanje strujanjem zraka,
- Bržim i sigurnijim prometom ljudi i roba, te povećanom produktivnosti zbog otvorenih prolaza,
- Smanjenoj potrebi za održavanjem vrata radi smanjenog broja otvaranja/zatvaranja,
- Povećanju korisnog prostora u blizini vrata,
- Sprečavanju pojave leda i magle u hladnjačama,
- Povećanju radne sigurnosti u blizini vrata i prolaza radi bolje vidljivosti.

NAZIVLJE

E_{KM_1} – kinetička energija vanjskog zračnog mlaza,

E_{KM_2} – kinetička energija horizontalne komponente zračnog mlaza iz zavjese,

m_{M_1} – maseni protok vanjskog zračnog mlaza,

m_{M_2} – maseni protok zračnog mlaza iz zavjese,

v_{M_1} – brzina vanjskog mlaza,

v_{M_2} – brzina horizontalne komponente zračnog mlaza iz zavjese.

BIBLIOGRAFIJA

1. Recknagel, Sprenger, Schramek, Čeperković: Grejanje i klimatizacija 2002, Interklima, Vrnjačka banja, 2002.,
2. Inženjerski priručnik IP1, Školska knjiga Zagreb, 1996.,
3. Priručnik za ventilaciju i klimatizaciju 2. izdanje, Energetika marketing, Zagreb, 2003.,
4. Tehnička enciklopedija, Svezak 6, Jugoslavenski leksikografski zavod, 1979.

Prof. dr. sc. Petar Donjerković dipl.ing.stroj. (1)

Stela Pekas dipl.ing.stroj. (2)

(1) Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu

(2) «G.D.-ARH», Zagreb

PROJEKT TERMOTEHNIČKIH INSTALACIJA KLIMATIZACIJE MUZEJA SUVREMENE UMJETNOSTI U ZAGREBU

1.UVOD

Muzej suvremene umjetnosti (u daljnjem tekstu MSU) je jedno od kapitalnih zdanja u Hrvatskoj te je izazov kako u arhitekturi tako i u svim drugim djelatnostima koje prate izgradnju i funkciju građevine.

MSU je smješten na sjeveroistočnom uglu križanja Avenije Dubrovnik i Avenije Večeslava Holjevca u Zagrebu.

Površina građevine je cca 15000m² i ima ukupno pet etaža i to : podrum, prizemlje i tri kata. U podrumu su smještene radionice , čuvaonice za fundus muzeja i pristupni hodnici. Na nivou prizemlja je glavni ulaz u muzej. Na prvoj razini je stalni postav , muzejski dućan te vrlo zahtjevna polivalentna dvorana sa 215 mjesta i biblioteka sa arhivom . Polivalentna dvorana se proteže kroz etaže podruma i prizemlja .Biblioteka se proteže kroz dvije etaže prizemlje i prvi kat .Unutar tih visina se pojavljuju i galerije koje međusobno dijele etaže. Na katovima su izložbeni prostori ,restoran, kafić i drugi prateći sadržaji. Kroz sve etaže u istočnom dijelu objekta protežu se uredi za zaposlenike i dva apartmana za goste muzeja. U cijelom objektu se pojavljuju tri visine etaže i to od 5,10 i 15 m što uvjetuje specifičnost i složenost rješenja razdiobe zraka. Toplinska i akustička svojstva građevine određena su prema važećim standardima. Uviđajući zahtjev gospodarenja energijom , s arhitektom i ostalim sudionicima projekta postignut je postavljeni gospodarski zahtjev i osiguran odgovarajući stupanj ugone pojedinog sadržaja sukladno njegovoj tehnološkoj namjeni.

Arhitektonsko i tehnološko rješenje određuju podjelu građevine u funkcionalne cjeline-zone koje određuju izbor sustava klimatizacije,

Slika 1 Tloct građevine – s osnovnim prikazom sustava klimatizacije



2.OSNOVNI ZAHTJEVI IZ PROJEKTOG ZADATKA

Uvažavajući zahtjeve dobivene projektnim zadatkom postavljena je rješenja klimatizacije građevine. Građevina se kondicionira sustavima niskotlačne klimatizacije. Sustavi su projektirani za slijedeće projektne uvjete

$$\text{ZIMA: } \vartheta_v = -18^{\circ}C \quad \varphi = 90\% \\ \vartheta_p = 21^{\circ}C \quad \varphi = 50\%$$

$$\text{LJETO: } \vartheta_v = 32^{\circ}C \quad \varphi = 50\% \\ \vartheta_p = 24^{\circ}C \quad \varphi = 50\%$$

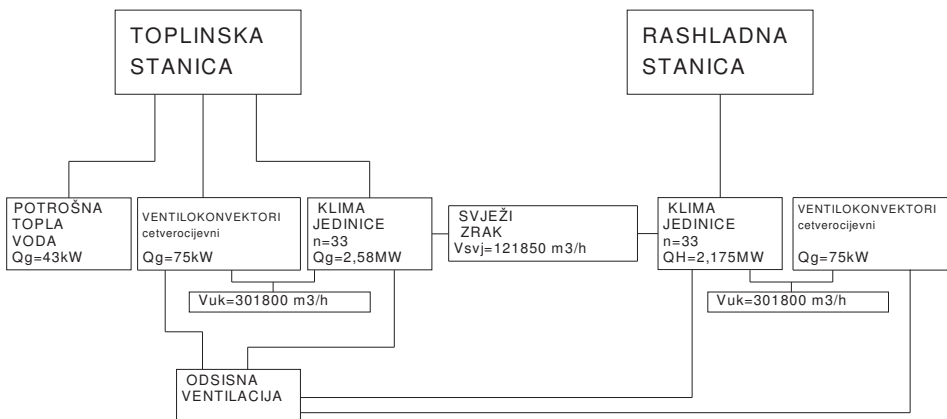
Pored temperature i vlage za ugodnost boravka i odgovarajuće zahtjeve čuvanja fundusa potrebno je postići visoku čistoću zraka, kako mehaničku tako i kemijsku, sukladno tehnološkim zahtjevima pojedine zone objekta. Radi zaštite fundusa, razvod ogrijevnog i rashladnog medija postavljen je tako da osigurava objekt od plavljenja usljed eventualnog propuštanja odnosno puknuća cijevnog razvoda. Stoga je razvod medija-vode izvan izložbenih prostora i čuvaonica umjetnina. Za građevinu se postavljaju strogi zahtjevi razine buke sukladno zahtjevu namjene prostora (zone). Ostali utjecajni zahtjevi, temeljem kojih je postavljeno rješenje termotehničkih sustava kondicioniranja građevine sadržani su u tehnološkom projektu na kojem se temelje rješenja u projektu.

3.OPIS RJEŠENJA TERMOTEHNIČKIH SUSTAVA GRIJANJA, VENTILACIJE I KLIMATIZACIJE

Temeljem proračuna toplinskih gubitaka ukupni potrebiti toplinski učin građevine za zimsko razdoblje iznosi $Q=2,7\text{MW}$, a za ljetno razdoblje potrebiti rashladni učin iznosi $Q=2,25\text{ MW}$. Uvažavajući tehnološki projekt namjene te zahtjevnost građevine postavljeno je rješenje termotehničkih sustava klimatizacije obuhvaćeno slijedećim podsustavima

- Toplinska stanica
- Rashladna stanica
- Sustavi niskotlačne klimatizacije
- Sustav ventilokonvektora
- Sustavi ventilacije sanitarnih prostora
- Sustav potrošne tople vode

Osnovni pregled sustava termotehničkih postrojenja u građevini MSU-a prikazan je na slici 2.



Slika 2:Prikaz termotehničkih sustava u građevini MSU

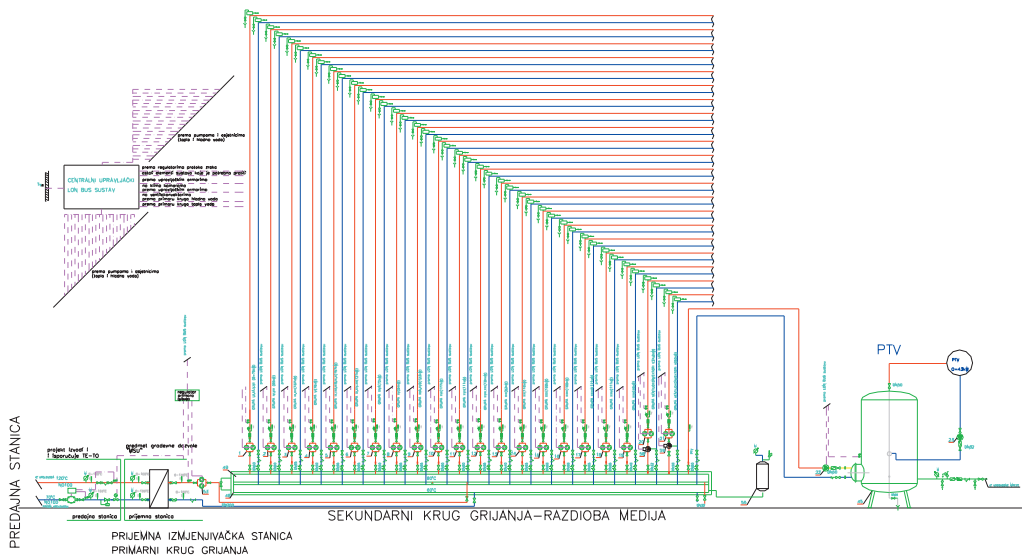
Na parceli gdje je smještena građevina prolazi gradski magistralni vrelovod , pa je opskrba građevine toplinom riješena priključenjem toplinske stanice na gradski magistralni vrelovodni sustav režima 120/70°C.

Toplinska stanica

Toplinska stanica je smještena u podrumskoj etaži građevine-razina zemlje .

U istom se prostoru nalaze rashladna stanica i četiri sustava klima komora . Učin toplinske stanice je 2,7MW. Ovaj učin zasniva se na ukupnoj toplinskoj bilanci građevine dobivene proračunom toplinskih gubitaka i topline ventilacije. Ovako relativno mali učin objekta rezultat je primjene sustava povrata topline iz istrošenog zraka sa stupnjem djelovanja $\eta_{min}=0,6$ te usvojenog odgovarajućeg omjera miješanja svježeg i optočne struje zraka. Rješenje priključenja na magistralni vrelovodni sustav je indirektno preko izmjenjivača topline . Režim rada toplinske stanice je : primar 120/70°C-sekundar 80/60°C (vrela voda-topla voda).

Iz toplinske stanice preko razdjelnika i sabirnika razvodi se ogrijevni medij za sustav ventilokonvektora i klima komore razmještenih po zonama objekta. Za četverocijevni ventilokonvektorski sustav priprema se ogrijevni medij za pogonske uvjete 55/45°C putem miješajućih regulacijskih ventila .Razdioba toplinske energije po sustavima osigurana je ugradnjom granskih regulacijskih ventila za uravnoteženje sustava toplinskih trošila po granama i sustavima. Rad toplinske stanice nadzire se i upravlja sustavom automatske regulacije putem priključenja CNUS-a. Osnovni prikaz rješenja toplinske stanice dan je slikom 3.

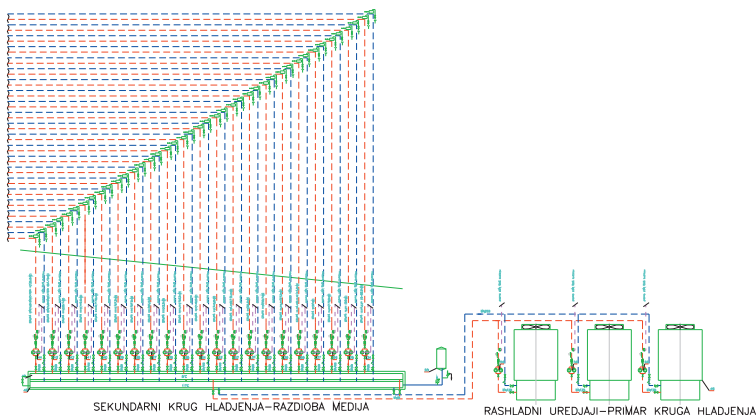


Slika 3-Shematski prikaz toplinske stanice

Rashladna stanica

Rashladni učin potrebit za sustave klimatizacije i ventilokonvektora dobiven je temeljem proračuna toplinskih opterećenja. Proračun sadrži upade topline sunčevog zračenja po programu opterećenja , opterećenje unutarnjim toplinskim izvorima i stupanj istovremenosti opterećenja po sustavima i vremenu . Primjenom sustava povrata energije iz istrošenog zraka sa $\eta_{min}=0,6$ (stupanj djelovanja) i usvojenog omjera miješanja ukupni rashladni učin iznosi $Q=2,25MW$. Ovaj rashladni učin osiguravaju tri rashladna agregata sa zrakom hlađenim kondenzatorom smještenim sjeverno od građevine u zelenom pojasu. Rashladni agregati su punjeni sa ekološki prihvatljivom rashladnom tvari R407C .Agregati su odabrani posebno tihe izvedbe (82 dB(A) na udaljenosti od 1m).Režim hlađenja za sve sustave i klima komore i ventilokonvektore je $5/12^{\circ}C$.

Od rashladnih agregata do rashladne stanice pothlađena voda vodi se u podnom kanalu. Rashladna stanica u objektu je u sklopu toplinske i klima stanice u podrumskoj etaži. Razvod hladne vode $5/12^{\circ}C$ do trošila razvodi se cijevnim razvodom u koridorima koji osiguravaju izložbene prostore od plavljenja u slučaju puknuća elemenata cjevovodnog razvoda .Cijevni razvod je izoliran paronepropusnim i negorivim materijalom . Rad rashladne stanice je programirano vođen sustavom automatske regulacije povezane na CNUS preko kojeg se upravlja svim energetskim i sigurnosnim sustavima u građevini. Razdiobu rashladne energije po sustavima osigurana je ugradnjom granskih ventila za uravnoteženje sustava trošila rashladne energije. Osnovni prikaz rashladne stanice dan je na slici 4.



Slika 4-Shematski prikaz rashladne stanice

Sustavi niskotlačne klimatizacije

Kondicioniranje objekta u svrhu cjelogodišnjeg održavanja traženog stupnja ugone opisanog parametrima temperaturom, relativnom vlagom, čistoćom zraka, razinom tlaka prostora, brzine strujanja zraka u bio zoni te visokog zahtjeva održavanja razine buke u objektu, riješeno je sustavima niskotlačne klimatizacije. Pri donošenju odluke raspodjele i položaja sustava respektirani su zahtjevi navedeni u tehnološkom elaboratu i u projektnom zadatku. Zahtjevi da u izložbenim prostorima kao i u prostorima čuvaonica umjetnina nema razvoda energetskih medija (tople i hladne vode) radi zaštite fundusa bio je respektirajuće utjecajan na postavljanje rješenja razvoda medija. Broj i položaj termotehničkih sustava klimatizacije odredili su razvod medija , namjena i položaj prostora (zona).Ispunjavanje navedenih zahtjeva rezultiralo je podjelom formiranja termotehničkih sustava kondicioniranja zraka prema prikazu sustava kondicioniranja zraka u tabeli 1.

Bitno je istaknuti da je na postavljanje broja i položaja sustava klimatizacije utjecao i plan požarnih zona u objektu. Za svaki sustav potrebna količina svježeg i ukupna količina zraka određena je prema namjeni prostora, odnosno prema broju ljudi koji u njemu borave te zahtjevom toplinskog i rashladnog učina. Količina zraka za kondicioniranje objekta prikazana je u tabeli 1 i iznosi 301800 m³/h.

Među sustavima dominiraju sustavi za kondicioniranje izložbenih prostora.U radu će biti dano rješenje jednog sustava izložbenog prostora s prikazom procesa pripreme zraka u h-x dijagramu

grupa	naziv prostorije	temperatura		vлага	Vuk(m3/h)	Vsvi(m3/h)
		ljeto	zima	ljeto/zima		
I	sklonište tj. radionica	24C	21C	50%	2000	500
II	restauracija skulptura, prateći prostori	24C	21C	50%	3000	750
IIA	restauracija slika,prateći prostori	24C	21C	50%	4800	1200
III	karantena ,čuvaonica1,čuvaonica2,čuvaonica 3	24C	21C	50%	15000	3750
IV	čuvaonica4,studijska čuvaonica,čuvaonica5,pripremaizložbi	24C	21C	50%	8000	2000
V	AV studio,fotolab.,režija,montaža,spremište,predprostori	24C	21C	50%	3000	750
VI	polivalentna dvorana	24C	21C	50%	15000	10500
VII	uredi,prateći prostori	24C	21C	50%	3000	3000
VIII	istovarno dvorište	24C	21C	50%	9000	2250
IX	spremište restorana i kuhinja	24C	21C	50%	1000	250
IXA	restoran	24C	21C	50%	5000	2500
IXB	kafić	24C	21C	50%	4000	2400
X	kafić	24C	21C	50%	3000	2000
XI	muzejski dućan	24C	21C	50%	5000	1250
XII	uredi,prateći prostori	24C	21C	50%	3000	3000
XIII	ulazni hol,garderoba,predprostor	24C	21C	50%	18000	4500
XIV	privremene izložbe	24C	21C	50%	5500	2750
XIVA	biblioteka	24C	21C	50%	5000	5000
XV	izložbeni prostor	24C	21C	50%	20000	4000
XVA	izložbeni prostor	24C	21C	50%	8000	3500
XVB	izložbeni prostor	24C	21C	50%	10000	4000
XVI	izložbeni prostor	24C	21C	50%	22000	11000
XVII	izložbeni prostor	24C	21C	50%	15000	4000
XVIII	izložbeni prostor	24C	21C	50%	12000	3500
XIX	uredi,prateći prostori	24C	21C	50%	4000	4000
XX	izložbeni prostor	24C	21C	50%	15000	7000
XXI	izložbeni prostor	24C	21C	50%	15000	6500
XXII	izložbeni prostor	24C	21C	50%	20000	7000
XXIII	izložbeni prostor	24C	21C	50%	20000	6500
XXIII A	izložbeni prostor	24C	21C	50%	20000	6500
XXIV	izložbeni prostor-MOST	24C	21C	50%	5000	2500
XXV	uredi,prateći prostori	24C	21C	50%	3500	3500
UKUPNA KOLIČINA ZRAKA U GRAĐEVINI					301800	

Tabela 1:Prikaz sustava po zonama i njihov količinski učin

SUSTAV XXIII-niskotlačna klimatizacija

Sustavom XXIII se kondicionira izložbeni prostor koji prolazi trećim i drugim katom građevine. Visina prostora je dijelom 5m (2/3 sustava), a dijelom 10m (1/3 sustava). Ukupna potrebna količina zraka $V=20000\text{m}^3/\text{h}$. Ovaj učin osigurava klima komora sa tlačnom i odsisnom sekcijom. Sekcije su međusobno povezane preko pločastog rekuperatora topline i miješajuće komore. Komora je za vanjsku ugradnju, katne izvedbe, smještena na krovu objekta. Tlačna strana komore sadrži grijač, hladnjak i elektroparni ovlaživač. Grijač i hladnjak se toplom i hladnom vodom opskrbljuju iz TRS-a. Ventilatori postavljeni na tlačnoj i na odsisnoj strani su sa frekventnom regulacijom broja okretaja , tihe izvedbe te zadovoljavaju postavljeni zahtjev potrebite razine buke. Ispred i iza ventilatora se postavljaju odgovarajući prigušivači buke ,a njihova akustička karakteristika je određen proračunom buke prikazanog u tabeli 2.

SUSTAV XXIII TLAK

PRIGUŠIVAČ TIP: TROX	KOLIČINA ZRAKA (m ³ /h)	PAD TLAKA (Pa)	TEŽINA (kg)	VLASTITA BUKA dB(A)
MSA100-50-10-WF/1500X1500X2000	20000	30	420	37

	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz
Izvor buke dB=	76	62	49	43	39	44	51	47
Prigušivač dB=	7	17	35	39	49	50	43	37
Izvor-Prigušivač dB=	69	45	14	4	-10	-6	8	10
L(A) oktavno=	42,8 dB(A)	28,9 dB(A)	5,4 dB(A)	0,8 dB(A)	-10,0 dB(A)	-4,8 dB(A)	9,0 dB(A)	8,9 dB(A)
L spektralno=	69,0 dB							
L(A) spektralno=	43,0 dB(A)							

SUSTAV XXIII ODSIS

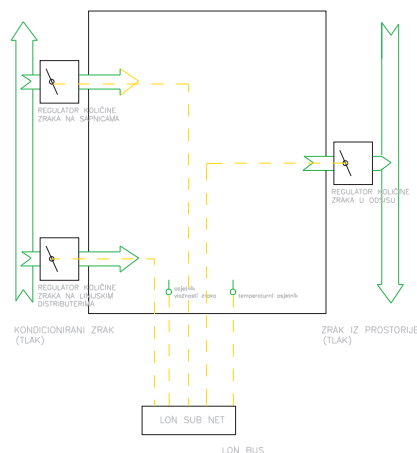
PRIGUŠIVAČ TIP: TROX	KOLIČINA ZRAKA (m ³ /h)	PAD TLAKA (Pa)	TEŽINA (kg)	VLASTITA BUKA dB(A)
MSA200-100-5-PF/1500X1500X1500	20000	22	237	37

	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz
Izvor buke dB=	71	61	46	38	34	41	47	45
Prigušivač dB=	5	15	32	33	36	25	16	14
Izvor-Prigušivač dB=	66	46	14	5	-2	16	31	31
L(A) oktavno=	39,8 dB(A)	29,9 dB(A)	5,4 dB(A)	1,8 dB(A)	-2,0 dB(A)	17,2 dB(A)	32,0 dB(A)	29,9 dB(A)
L spektralno=	66,0 dB							
L(A) spektralno=	41,2 dB(A)							

Tabela 2:Prikaz proračuna prigušivača buke

Komore su opremljene filtrima zraka. Za izložbene prostore pored standardnih filtera visokog stupnja filtracije postavlja se adsorpcioni filter od aktivnog ugljena koji upija plinove i mirise. Filter od aktivnog ugljena postavlja se iza mješačke komore a ispred grijača zraka. S ovakvom filtracijom zraka osigurana je visoka čistoća zraka što je ujedno i jedan od bitnijih zahtjeva čuvanja umjetnina u građevini.

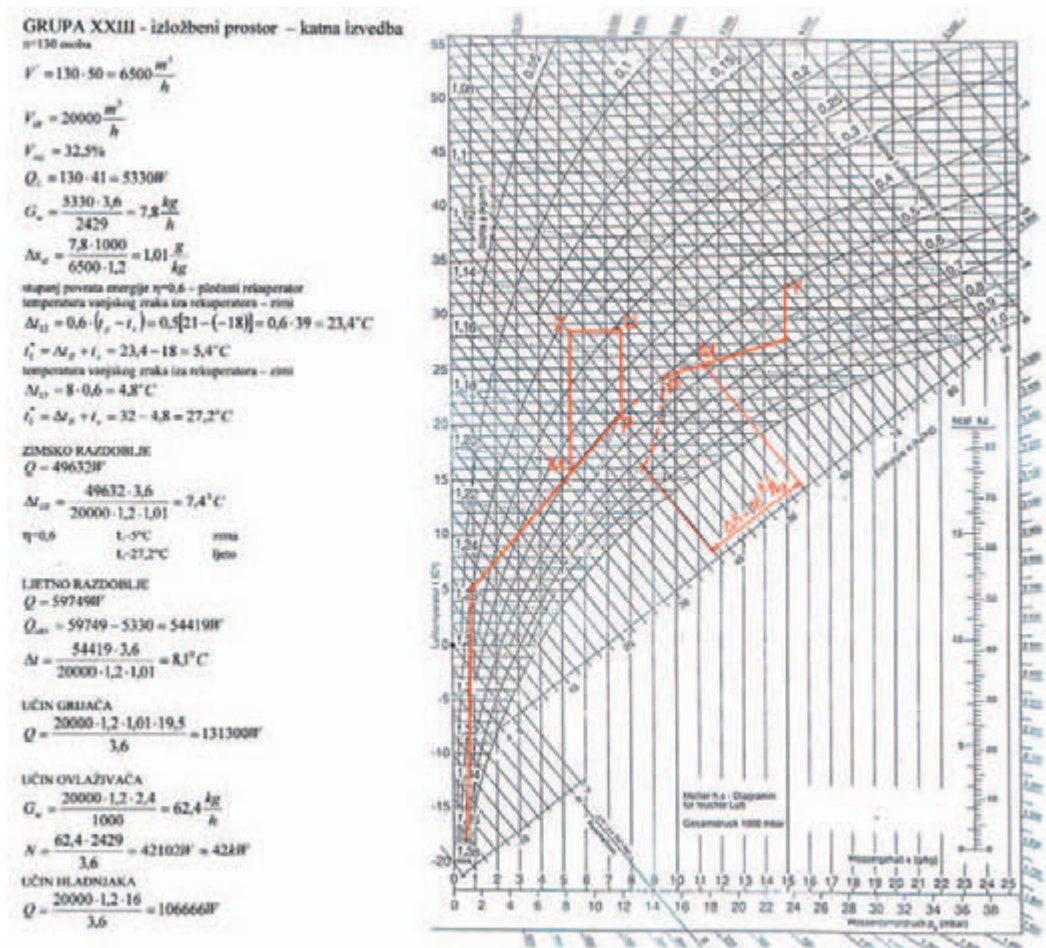
Iz komore se pomoću zračnih kanala zrak razvodi po prostoru. Kanali su smješteni u spuštenom stropu i povezuju se sa linijskim difuzorima i sapnicama pomoću kojih zrak istrujava u prostoriju. Linijski difuzori su sa priključnim kutijama . Količinski mogu pokriti cijeli prostor, međutim kao problem kod ovog sustava i njemu sličnih javlja se utjecaj visine prostora (10m) koja zbog uzgonskog efekta ne garantira ostvarivanje željenih stanja u biozoni u režimu grijanja. U ljetnom periodu ovaj problem nije prisutan jer hladni zrak «pada» pa će se difuzorima osigurati željena stanja u bio zoni opisana temperaturom i vlagom. U zimskom periodu ,da bi se osigurala dobava zraka do zone boravka, razdioba zraka rješena je sa dvije grane na tlačnoj strani. Na tim granama ugrađene su sapnice takvih hidrauličkih karakteristika da osiguravaju domet toplog zraka u zonu boravka. Ova razdioba zraka zahtjeva i odgovarajuće rješenje regulacije bez kojeg ne bi bilo moguće osigurati željena stanja zraka u biozoni ,u procesu grijanja. Na svakoj grani je postavljen varijabilni regulator protoka zraka koji preko LON-BUS sustava omogućava upravljanje razdiobe zraka za pogon zima/ljeto odnosno grijanje/hlađenje. U ljetnom periodu regulator na ogranku linijskih difuzora otvoren je 100% , a na ogranku sa sapnicama je zatvorena i sav zrak istrujava preko difuzora. U zimskom periodu varijabilni regulatori i na jednom i na drugom ogranku se postavljaju u položaj 50%-tne otvorenosti, pa se na taj način ostvaruje potrebnu razdiobu zraka sa sigurnim dometom u zonu boravka (vidi sliku 5).



Slika br.5-Principijelna shema regulacije tlaka prostorije –zone

Količina zraka na odsisnom sustavu je tijekom cijele godine konstantna. Odvod zraka je pomoću linijskih difuzora koji imaju hidrauličku karakteristiku za odsisi zraka. Svi difuzori na tlačnoj i odsisnoj strani imaju priključnu kutiju sa akustičkom izolacijom koja sprječava prijenos buke iz kanala u prostor i obratno. Priključne kutije se na kanal priključuju preko regulatora konstantne količine zraka. Regulatorom se uravnotežava sustav razdiobe i odsisa zraka te osigurava željeni tlak. Radi sprječavanja nekontroliranog dotoka zraka iz okoline u prostoru se putem regulatora količine osigurava odgovarajući pretlak. Razina pretlaka se automatski postavlja (vidi sl. 5)

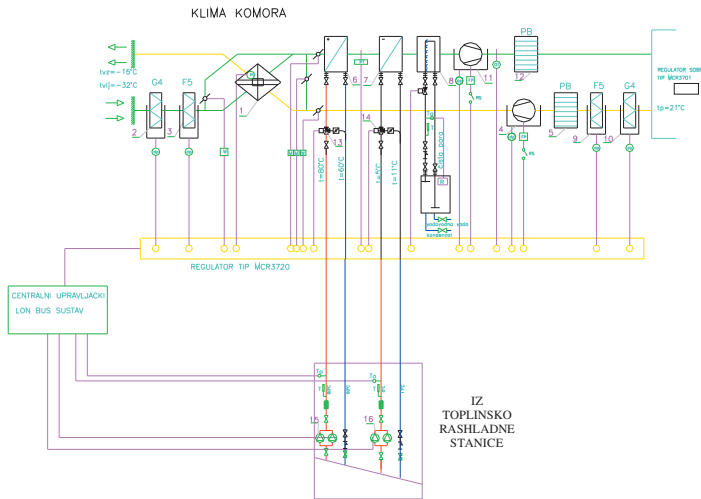
Prikaz procesa pripreme zraka dan je u h-x dijagramu (vidi dijagram 1). Uz dijagram je dan prikaz bilance elementarnih procesa pripreme zraka.



Dijagram 1

Prikaz procesa u h-x dijagramu s bilancom elementarnih procesa

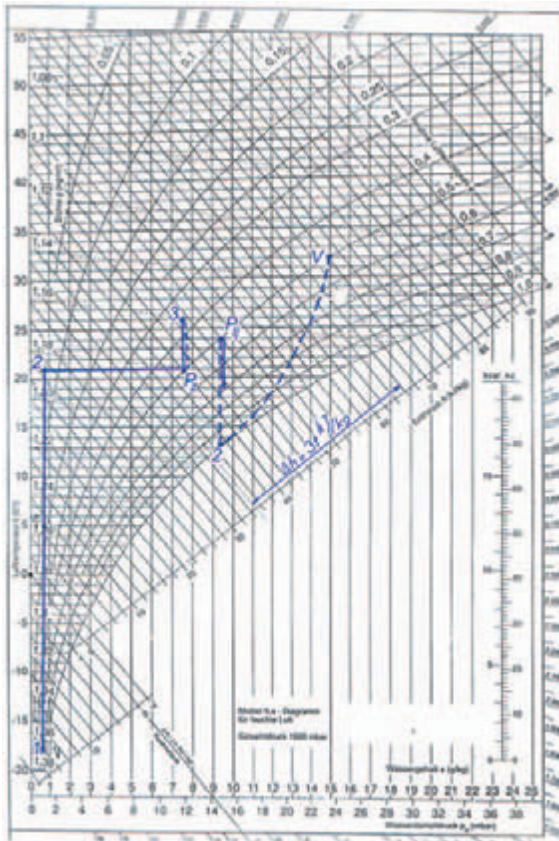
Na slici 6 dana je principijelna shema automatske regulacije opisanog sustava klimatizacije s povezivanjem na CNUS-a



Slika br.6-Principijelna shema regulacije klima komore

Sustavi ventilokonvektora u sprezi sa sustavom niskotlačne klimatizacije

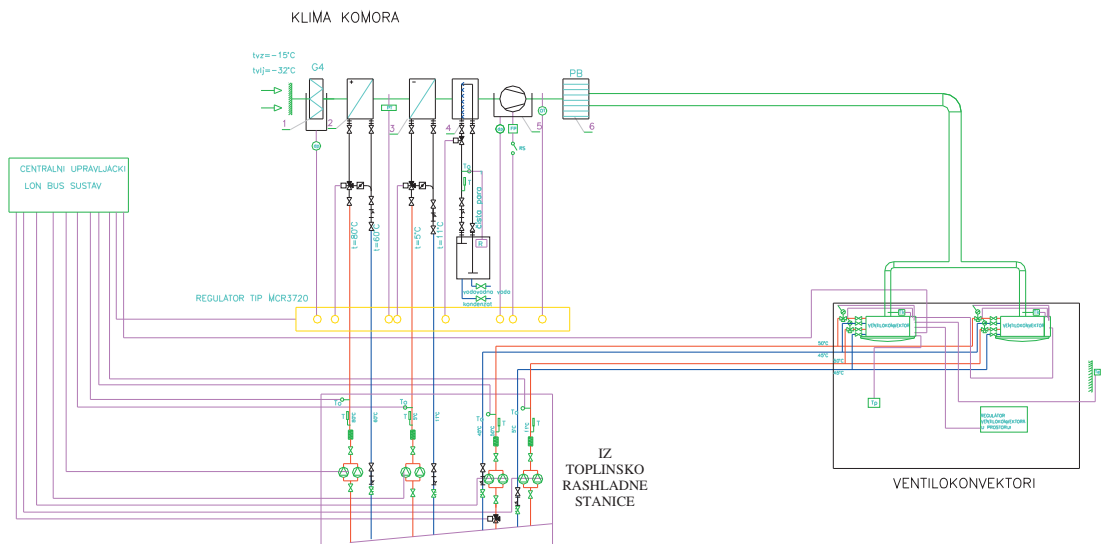
U poslovnom dijelu građevine (uredi-uprava) klimatizacija je riješena kombiniranim sustavom niskotlačne klimatizacije i četverocijevnog sustava ventilokonvektora . Na taj način je osigurana autonomnost svakog pojedinačnog ureda u pogledu cijelogodišnjeg održavanja željene temperature po zahtjevu korisnika. Uredski prostori u objektu kondicionirani se sa četiri stropne klima komore ugrađene u međustropu po katovima .Položaj klima jedinica zahtjeva visoku kvalitetu akustičkih karakteristika uređaja. Buku u zoni boravka određuje kriterij od 30dB(A). Klima komorama se osigurava prvenstveno higijenski propisana količina svježeg zraka, dok se ventilokonvektorima regulira stanje zraka prostora-vidi prikaz u h-x dijagramu (Dijagram 2)



Dijagram 2

Prikaz kombiniranog procesa pripreme zraka u h-x dijagrami

Na slici 7 dana je principijelna shema automatske regulacije kombiniranog sustava četverocijevnih ventilokonvektora sa sustavom niskotlačne klimatizacije povezanih CNUS-om.



Slika 7-Principijelna shema regulacije ventilokonvektora i klima komore

Sustav ventilacije sanitarnih čvorova

Sanitarni čvorovi se u objektu rješavaju sustavom upojne (potlačne) ventilacije. Usljed stvorenog potlaka u ovim prostorima kondicionirani zrak presturjava u sanitarne prostore preko prestrujnih rešetki u vratima. Na taj se način osigurava i temperiranje prostora s izdašnom potlačnom ventilacijom. Svaki sanitarni čvor objekta ima posebni ventilacijski sustav (kanalni razvod u kojem se postavlja odsisni ventilator) sa izbacivanjem istrošenog zraka na krovu objekta, a akustika je riješena ugradnjom prigušivača buke.

Rad ventilatora se prati preko CNUS-a.

Novosti iz proizvodnog programa tvrtke -Weishaupt-

Manfred STURY
Max Weishaupt GmbH
Max-Weishaupt-Strasse 14
D-88 475 Schwendi, Deutschland
tel: 00/ 49/ 7353/ 830
faks: 00/ 49/ 7353/ 83 358

SAŽETAK

Potvrđena pouzdanost digitalne tehnologije, mikroprocesorski pouzdani programatori i servo motori uz podešavanje preko zaslonskih komandi na najjednostavniji mogući način omogućili su još racionalnije iskorištenje goriva u procesu pridobivanja topline izgaranjem fosilnih goriva: nafte i plina.

Najnoviji serijski proizvod tvrtke -Weishaupt- plamenik WM10 zbir je primjene svih navedenih odlika. Novo rješenje o smanjenju buke značajno smanjuje potrebu za dodatnim prigušivačem buke. Primjenjeni koračajni motori kao izvršni organi pojedinih sklopova omogućavaju postavljanje preciznih omjera zraka i goriva, dok kontrola uspješnosti izgaranja preko sonde za O₂ ima ulogu nadzora izvršenih podešavanja. U jednom kućištu je sada plamenik velikih raspona toplinske snage sa programskim sklopom koji na zaslonu daje podatke na jeziku korisnika o trenutnom radnom stanju, razlogu eventualnog zastoja i stupnju korisnosti izgaranja sa O₂-regulacijom. Kontrola nepropusnosti magnetnih ventila (plin) sastavni je dio programskog sklopa, dok je regulacija broja okretaja u cilju smanjenja potrošnje elektro energije i smanjenja buke jedna od opcija dodatne opremljenosti plamenika. I ne manje važno cijena je za istu razinu opremljenosti niža od dosadašnje dok je kvaliteta tipično -Weishaupt-ova.



Upotreba sistema nadzora i automatizacije u kombinaciji sa suvremenim individualnim sustavima regulacije različitih komponenata većih kotlovnica

Application of Central building control systems in combination with modern individual control systems for various components of larger boiler houses

Marko KLANČIŠAR, univ.dipl.ing.
Weishaupt d.o.o.
Teharje 1, 3000 Celje
SLOVENIJA

SAŽETAK

U današnje vrijeme postavlja se pitanje koliko mogućnosti ima još tehnika kod sniženja troškova kod proizvodnje i distribucije toplinske energije. Konstrukcijski su naprave kao kotlovi, plamenici i ostale naprave blizu svog maksimuma. Ali postoji mogućnost, da se trenutna konstrukcijska rješenja optimiraju sustavima elektronske regulacije. Već kod plamenika je to moguće upotrijebiti kod više ključnih potrošača energije kao na primjer motor ventilatora. Kod polovnog prosječnog opterećenja može, da bude ušteda električne energije i do tri četvrtine niža od običajno potrošene. Drugi dio optimizacije, je eliminacija upliva atmosferskih parametara, (pritisak, temperature, vlaga, ...) na kvalitetu sagorijevanja sa sistemom O₂ regulacije. Naravno u kotlovnici postoje još naprave, koje reguliraju i sustave pripreme vode, distribuciju energije, ...

Za pravilnu optimizaciju, kotlovnica odnosno svi objekti za proizvodnju i distribuciju energije, treba da se vodi kao cjelina. To znači, da pojedinačne naprave u objektima moraju, da znaju jedna za drugo i tako se u smislu maksimalnog učina objekta odnose na regulaciju koju izvode. Sustav koji sve to omogućava je Centralni nadzorni sustav i uz garanciju maksimuma regulacije i nadzora daje i široku paletu mogućnosti snižavanja troškova.

KLJUČNE RIJEČI

ušteda, proizvodnja energije, kvaliteta sagorijevanja, automatizacija, Centralni nadzorni sustav



ABSTRACT

At present time there stands an open question, where are limits for currently applied technical products for production and distribution of energy in order to decrease costs. From construction point of view are plant elements like boilers, burners, etc. near their technological maximum. But there is possibility for increasing construction efficiency with applying of systems for electronic regulation. Example, burner running costs can be severely decreased with use of frequency control on burner fan. If we look on example of average electrical load, the result is that used energy amount can be down to one quarter of needed. The other key element is influence elimination of atmospheric parameters (pressure, temperature, humidity, ...) on combustion quality with electronic O₂ regulation.

Off course, in boiler plants there are also other key elements which with combination of burner and boiler make the system work.

In order to apply optimal running, whole boiler plant and all objects for production and distribution of heat energy, must be applied as one unit. That is, all plant components have to communicate with each other in order to provide maximal efficiency. System which is capable of doing so is Central Building Control System which provides optimized regulation and severely decreases running costs in rank of whole building.

KEY WORDS

Costs saving, energy production, combustion quality, automation, Central Building Control Systems



–weishaupt–

Weishaupt Vam nudi više ...



S Vama pri izboru sustava grijanja ...

... od plamenika do solarnog kolektora.

Weishauptovi sustavi grijanja kao što su Thermo Unit, Thermo Gas i Thermo Condens predstavljaju izvanredna rješenja za grijanje manjih i većih obiteljskih kuća. Weishauptov proizvodni program obuhvaća plinske, uljne i kombinirane plamenike s jednostupanjskom, dvostupanjskom, kliznom dvostupanjskom i modulirajućom regulacijom. Kao gorivo mogu se koristiti sve vrste plinova ali i lako, srednje teško i teško loživo ulje.

Za dodatne informacije :

WEISHAUPT - ZAGREB
plamenici i sustavi grijanja d.o.o.

HR-10000 Zagreb, Drvinje 61

tel: 01/365 50 73, 01/ 365 50 74

faks: 01/ 365 50 75

e-mail: weishaupt-zg@zg.htnet.hr

www.weishaupt.hr





D

7. KONFERENCIJA O TERMOGRAFIJI, ISPITIVANJA, MJERENJA

D1

S. ŠVAIĆ, I. BORAS, M. SUŠA - Infracrvena termografija
i numeričke metode u zgradarstvu 175

D2

Ž. HRS BORKOVIĆ, M. SUŠA - Primjena IC termografije u
zgradarstvu 183

D3

S. ŠVAIĆ, D. DOVIĆ, M. SUŠA - Primjena termografije
kod analize strujanja vode u toplovodnim kotlovima 193

D4

G. TRAXLER - Practical Experience with Square Puls
Thermography for Finding Inclusions in Stainless Steel 203

D5

J. STEPANIĆ, S. ŠVAIĆ, V. KRSTELJ, I. BORAS,
M. MALINOVEC PUČEK - Mjeriteljski elementi
u termografiji ukopanih objekata 213

D5a

D. SHEJBAL, P. DRVIŠ, S. ŠVAIĆ, I. BORAS, M. SUŠA,
B. PEGAN, L. KALOGJERA - Procjena preživljenja kožnih
režnjeva pomoću IR termografije 218

D6

F. MENDEL - The Austrian Society for Thermography 225



interklima 2005

INFRACRVENA TERMOGRAFIJA I NUMERIČKE METODE U ZGRADARSTVU

Srećko Švaić, prof.dr.sc., Ivanka Boras, doc.dr.sc., Mirela Suša
Fakultet strojarstva i brodogradnje
Ivana Lučića 5, 10 000 Zagreb
01-6168-146

srecko.svaic@fsb.hr, ivanka.boras@fsb.hr, mirela.susa@fsb.hr

SAŽETAK

Infracrvena termografija se kao metoda beskontaktnoga mjerenja temperature i njezine raspodjele na površini promatranog objekta danas široko primjenjuje u građevinarstvu. Osim što se nametnula kao pouzdana metoda za ocjenu kvalitete izvedbe i utvrđivanja trenutnog stanja objekata u smislu toplinske izolacije, infracrvena termografija se može uspješno primjeniti i za ocjenu trenutnog stanja fasada građevine. Odvajanje žbuke od podloge, prisustvo zraka ili vlage u pojedinim slojevima se manifestira u razlikama u površinskoj temperaturnoj raspodjeli.

U ovom je radu dat opis i rezultati termografskog ispitivanja koje je provedeno tijekom veljače i svibnja 2004. godine na upravnoj zgradi tvrtke Jadrolinija Rijeka. Cilj je provedenog mjerenja bilo utvrđivanje trenutnog stanja fasade i sukladno tomu davanje procjene o potrebi njezine sanacije.

Analiza je mjernih rezultata provedena dijelom kvantitativno (za karakteristične dijelove fasada s greškama) dok je ostatak termograma interpretiran kvalitativno na temelju prethodnih rezultata kvantitativne analize. Provedena je i numerička analiza transporta topline za karakteristične dijelove fasade sa i bez grešaka te su rezultati uspoređeni s rezultatima mjerenja. U radu je data i usporedba termograma snimljenih na istim dijelovima fasade u veljači i u svibnju.

KLJUČNE RIJEČI

Infracrvena termografija, kontrola bez razaranja, nehomogenosti, stanje fasade, zgradarstvo

1. UVOD

Infracrvena termografija se danas široko primjenjuje u gotovo svim granama ljudske djelatnosti. Svugdje, gdje je iznos temperature ili njezina raspodjela pokazatelj određenog stanja ili možebitnih neočekivanih promjena u strukturi objekta, infracrvena termografija se zbog svojih karakteristika pokazala kao idealna metoda.

U građevinarstvu se infracrvena termografija posebno afirmirala u zgradarstvu, gdje se njenom primjenom vrlo jednostavno uočavaju propusti u izolaciji objekata, procjenjuje kvaliteta ugrađene izolacije ili ispituje trenutno stanje fasade objekta. Prednost je infracrvene termografije u tome što je to metoda čijom se primjenom ni na koji način ne remeti trenutno stanje objekta, a veličine pojedinih segmenata površine mogu se birati po volji operatera, ovisno o geometriji građevine ili očekivanim poremećajima u strukturi građevine.

Rezultati termografskog snimanja - termogrami mogu se spremirati u memoriju kamere i naknadno analizirati sa širokim spektrom alata: analiza vrijednosti temperatura na odabranim točkama, analiza temperatura za različite geometrijske likove ili linije definirane na

termogramu, izračun emisijskih faktora na odabranim dijelovima termograma itd. Rezultate je analize moguće dobiti kao vrijednosti temperatura - tablično, linijskih temperaturnih raspodjela ili kao histogramski prikaz udjela pojedinih temperaturnih intervala na definiranom dijelu termograma u postotcima.

Osim kvantitativne analize termograma moguće je provesti i kvalitativnu analizu. Ona se provodi ukoliko korisniku nisu bitni točni brojčani iznosi temperatura na pojedinim segmentima promatranog objekta nego interpretacija tih rezultata. Tako će toplija ili hladnija mjesta jednostavno upućivati na nehomogenosti koje su ih i izazvale. Kod ovakvih je analiza nužno ili veliko iskustvo operatera ili djelomična kvantitativna analiza koja prethodi kvalitativnoj analizi.

2. OPIS OBJEKTA I KORIŠTENE MJERNE OPREME

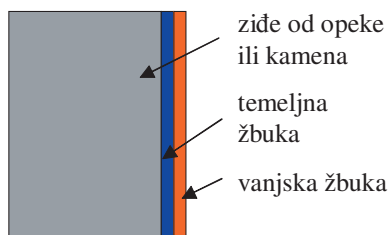
Upravna zgrada tvrtke Jadrolinija Rijeka nalazi se na lokaciji Riva 16, Rijeka. Predstavlja samostojeći objekt, tlocrtnih gabarita 58,3 x 39,9 m i visine 28,65 m.



Ilustracija 1. Fotografije fasade i tijekom snimanja zgrade Jadrolinije u Rijeci

Struktura zidova građevine

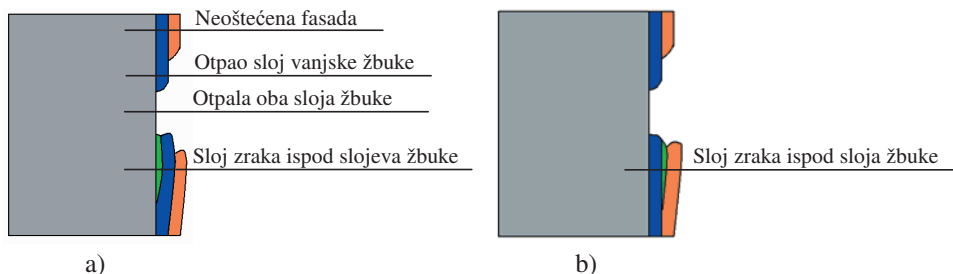
Objekt je građen iz opeke i kamena, koji su obloženi temeljnom i vanjskom žbukom u svrhu dobivanja reljefa na fasadi, te od elemenata iz kamena kao što su stupovi, okviri prozora, vijenci i ukrasi.



Ilustracija 2. Struktura zida građevine

Tipovi oštećenja fasade. Djelovanje atmosferilija uzrokuje nekoliko osnovnih tipova oštećenja fasade građevine. Najveći se broj oštećenja očituje u obliku potpuno otpalog prvog i drugog sloja žbuke, odnosno samo prvog sloja. Druga, okom nevidljiva oštećenja sastoje se u odvajanju prvog sloja žbuke od temeljnog sloja stvarajući tako sloj zraka među njima (ilustracija 3a) ili pak odvajanja oba sloja žbuke od osnove (cigla ili kamen), ilustracija 3b.

Također se javljaju i mjesta povećane poroznosti žbuke uslijed djelovanja vlage ili pak penetracija vlage u pojedinu dijelove fasade.



Ilustracija 3. Primjeri oštećenja stijenki zidova: a) ispod sloja temeljne žbuke sloj zraka, b) ispod sloja vanjske žbuke sloj zraka

Opis korištene mjerne opreme

Mjerenja su provedena termografskim sustavom ThermaCAM SC2000. Osnovni tehnički podaci za ovaj sustav su: točnost +/- 2 %, osjetljivost < 0,08 °C kod 30 °C, vidno polje kamere 24 ° x 18 ° / 0,5 m, detektor FPA 320 x 240 piksela (nehlađeni bolometar), mjerno područje u kojem je obavljeno mjerenje - 40 °C do 120 °C.

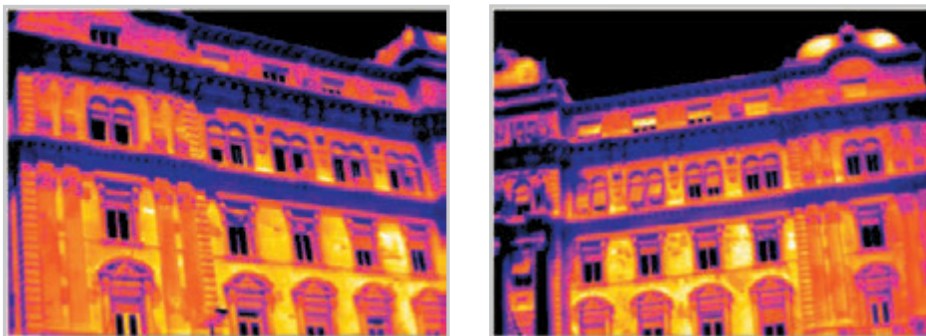
Softver ugrađen u kameru nudi niz mogućnosti rada i trenutnu analizu termograma. Naknadno su svi termogrami razvrstani i obrađeni u softveru ThermaCAM Researcher 2002 na osobnom računalu.

3. TERMOGRAFSKO MJERENJE

Termografska su snimanja obavljena u dva navrata. Predmjerenja za postavljanje metode i dobivanje potrebnih parametara obavljena su u veljači 2004. godine na južnoj fasadi i dijelu istočne fasade. Snimanje je obavljeno u fazi prirodnog zagrijavanja objekta (sunce).

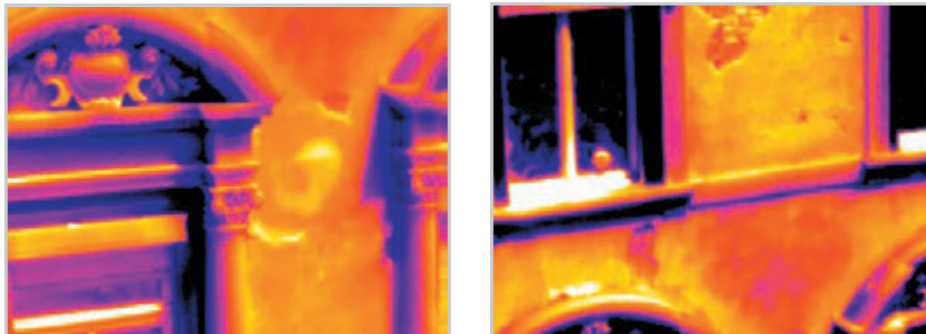
Glavna termografska mjerenja obavljena su u svibnju 2004. godine kad su sustavno snimljeni: krov, južna, istočna, sjeverna i zapadna fasada i to u fazi prirodnog zagrijavanja objekta. Ostali postavni parametri za kameru, temperatura ambijenta i relativna vlaga, unošeni su u svakom satu mjerenja.

Udaljenosti s kojih su snimani termogrami odabrane su prema situaciji i mogućnostima koje je pružala košara čija je visina dizanja bila do 21 m. One su iznosile 3 do 10 m za termograme segmenata površine, pa do 50 m za panoramske termograme.



Ilustracija 4. Panoramski termogrami južne fasade

Ilustracija 4 prikazuje panoramske termograme južne fasade snimljene s udaljenosti od oko 50 m. Ilustracija 5 prikazuje termograme karakterističnih oštećenja na fasadi: otpali slojevi žbuke i prisustvo zračnih jastuka.



Ilustracija 5. Termografski prikaz karakterističnih oštećenja na fasadi

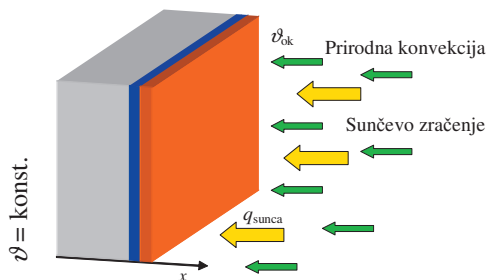
4. NUMERIČKA SIMULACIJA

Numerička je simulacija provedena pomoću metode kontrolnih volumena za jednodimenzijnski nestacionarni transport topline. Broj kontrolnih volumena za stijenku zida ovisi o promatranom tipu oštećenja fasade i kreće se do 112.

Diskretizacijom se diferencijalne jednačbe nestacionarnog prijenosa topline u pravokutnim koordinatama dobiva sustav algebarskih jednačbi čijim se iterativnim rješavanjem dolazi do vremenskog razvoja temperaturne raspodjele u promatranom segmentu zida. Toplinska su svojstva materijala, korištena u postupku numeričke simulacije, prikazana u tablici 1.

Početni je uvjet jednoliko protemperirana stijenka ($\vartheta_{\text{poc}} \text{ } ^\circ\text{C}$), vremenski je korak 4 sekunde, a ukupno je vrijeme trajanja procesa ovisno o promatranom slučaju.

Rubni su uvjeti definirani prema ilustraciji 6. S lijeve strane promatrane strukture (unutrašnja ploha zida) pretpostavljena je konstantna temperatura $\vartheta_{\text{unutr.}} \text{ } ^\circ\text{C}$. S vanjske strane se izmjena topline odvija: slobodnom konvekcijom s okolišnjim zrakom poznate temperature (koeficijent konvektivnog prijelaza topline je konstantnog iznosa, $\alpha = 4 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$) i zračenjem - toplinsko opterećenje od sunca, preuzeto iz literature za pripadajuće doba godine, zemljopisni položaj i orijentaciju plohe prema suncu.

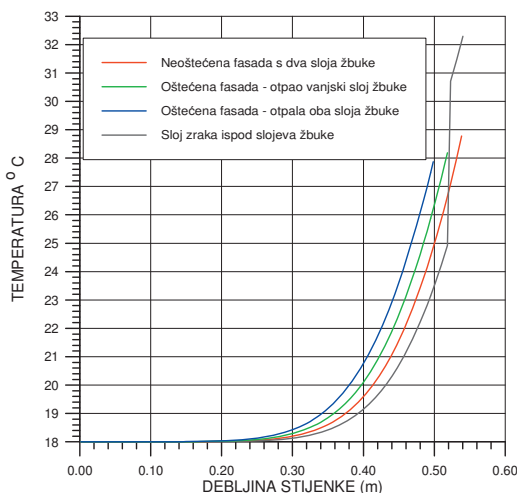


Ilustracija 6. Rubni uvjeti u postupku numeričke simulacije transporta topline

Tablica 1 Toplinska svojstva pojedinih slojeva u strukturi zida građevine

Naziv materijala	Gustoća ρ kg/m ³	Koeficijent toplinske vodljivosti λ W/(mK)	Specifični toplinski kapacitet c_p J/(kgK)	Emisijski faktor ϵ
Zide od opeke	1800	0,872	1047	0,911
Kamen	2300	2,908	879	0,88
Osnovna žbuka	1800	0,861	837	0,92
Vanjska žbuka	1800	0,814	837	0,95
Zrak	1,164	0,0251	1012	-
Voda	995,7	0,616	4176	-

Ilustracija 7 prikazuje rezultate numeričke simulacije za južnu fasadu, pri čemu je temperatura okolišnjeg zraka (mjerena) bila 19 °C, početna temperatura stijenke 18 °C, a toplinsko opterećenje od sunca (podaci iz literature) 137,43 W/m². Numerička je simulacija provedena za vremenski period od 4 sata.



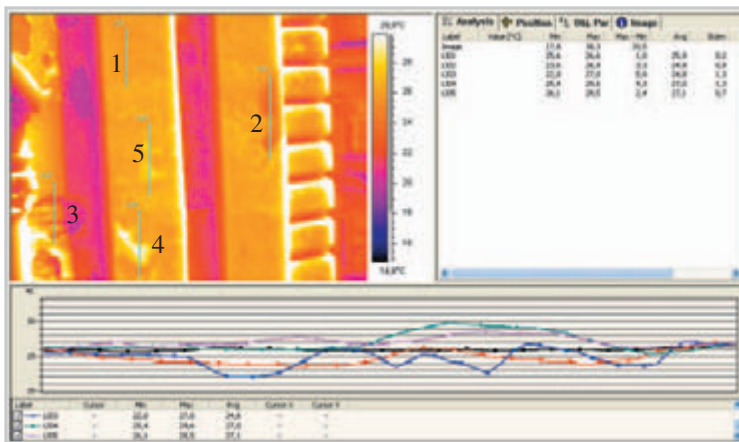
Ilustracija 7. Numerički dobivene temperaturne raspodjele kroz stijenkju južne fasade za različite tipove oštećenja

5. USPOREDBA REZULTATA TERMOGRAFSKOG MJERENJA I NUMERIČKE SIMULACIJE

Za kvalitetnu je termografsku analizu neophodno poznavati odziv svake pojedine nehomogenosti strukture na termogramu. Za utvrđivanje ovih odziva vrlo je korisna numerička analiza, opisana u prethodnom poglavlju. U nastavku su usporedo prikazani rezultati dobiveni postupkom kvantitativne analize termograma (linijske temperaturne raspodjele preko područja na termogramu koja su označena kao karakteristična oštećenja fasade) i rezultati dobiveni postupkom numeričke simulacije jednodimenzijskog transporta topline kroz strukturu fasade.

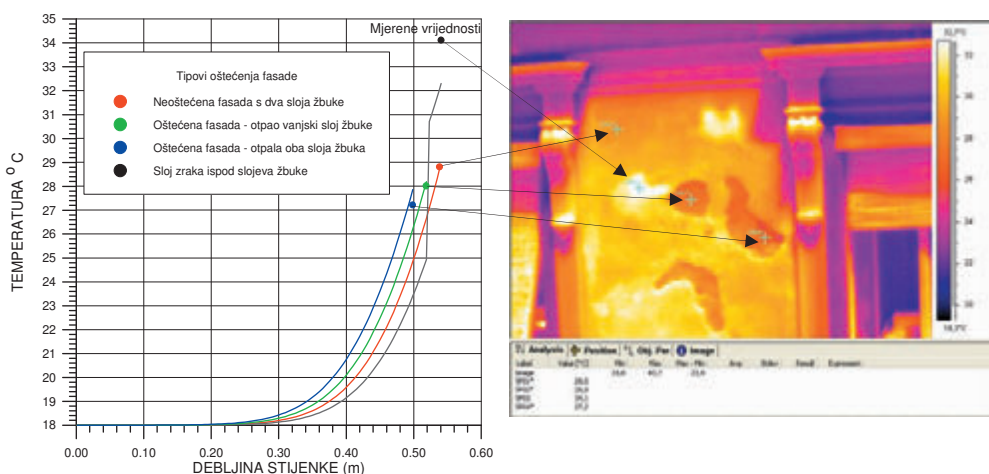
Ilustracija 8 prikazuje termogram s linijskim temperaturnim raspodjelama za slučaj oštećenja južne fasade (otpala vanjska žbuka, odnosno otpala oba sloja žbuke).

Crna krivulja (linija 1) pokazuje temperaturnu raspodjelu preko područja na kojem fasada nije oštećena. Crvena krivulja (linija 2) prikazuje temperaturnu raspodjelu preko područja s kojeg je otpao sloj vanjske žbuke. Uočava se pad temperature. Plava krivulja (linija 3) predstavlja temperaturnu raspodjelu preko područja gdje su otpala oba sloja žbuke. Pad je temperature još izraženiji. Zelena krivulja (linija 4) predstavlja temperaturnu raspodjelu preko područja na kojem se ispod sloja žbuke nalazi deblji sloj zraka, vidljivo je jače odvajanje sloja vanjske žbuke i veći temperaturni porast na tom dijelu. Ljubičasta krivulja (linija 5) predstavlja temperaturnu raspodjelu preko područja na kojem je tek započelo odvajanje sloja vanjske žbuke od podloge. Uočava se porast temperature, kao indikator početka odvajanja vanjske žbuke. Oštećenja fasade na tom mjestu nisu bila vidljiva golim okom.



Ilustracija 8. Termogram južne fasade s linijskim temperaturnim raspodjelama

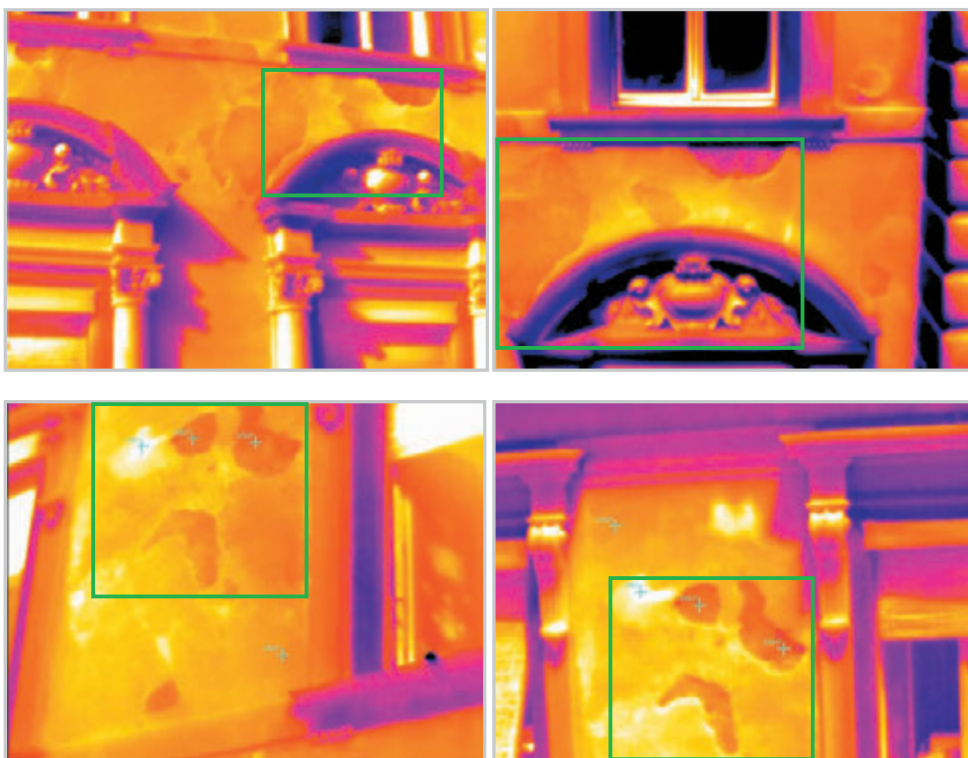
Ilustracija 9 prikazuje usporedbu numeričkih rezultata i rezultata mjerenja za stijenku južne fasade za prethodno opisane početne i rubne uvjete.



Ilustracija 9. Usporedba rezultata numeričke analize i termografskog mjerenja, južna fasada, svibanj 2004.

Usporedbom temperaturnih vrijednosti na termogramu i u dijagramima uočava se kvalitativno isti odziv za isti tip nehomogenosti. Temeljem rezultata numeričke simulacije (ali i fizičkom provjerom na mjestu mjerenja) tako je bilo moguće na termogramima točno prepoznati svaki pojedini tip nehomogenosti, te provesti dobru kvalitativnu analizu snimljenih termograma.

6. USPOREDBA TERMOGRAFSKIH PRIKAZA SNIMLJENIH U VELJAČI I U SVIBNJU



Ilustracija 10. Termogrami oštećenja na fasadi snimljeni: lijevo - u veljači, desno - u svibnju

Usporedba termografskih prikaza istih oštećenja na južnoj fasadi, snimljenih u veljači i u svibnju, pokazuje da nema nekih velikih razlika u vidljivosti oštećenja, premda se generalno može reći da su kontrasti na termogramima snimljenim u svibnju nešto izraženiji (što se može objasniti boljom toplinskom stimulacijom), te su rubovi grešaka uočljiviji.

7. ZAKLJUČAK

U radu su prikazani rezultati termografskog snimanja upravne zgrade tvrtke Jadrolinija Rijeka, provedenog u veljači i u svibnju 2004. godine. Termografsko je mjerenje obavljeno radi procjene stanja fasade, a za potrebe rekonstrukcije zgrade. Na termogramima se jasno uočavaju nehomogenosti na fasadama: vidljiva oštećenja - otpali slojevi žbuke, ali i oštećenja nevidljiva golim okom - prisustvo sloja zraka ispod sloja/slojeva žbuke i prisustvo vlage.

U radu je prikazana i usporedba rezultata mjerenja i rezultata numeričke simulacije. Dobro slaganje rezultata pokazuje da se numerička analiza može iskoristiti kao pouzdan alat pri

obradi termograma. Usporedba termograma snimljenih u veljači i u svibnju pokazuje sličan odziv nehomogenosti na fasadi, ali nešto izražajnije rubove grešaka i općenito jače kontraste na termogramima snimljenim u svibnju.

Iz prikazanih je rezultata razvidno da se termografija kao jedna od metoda toplinske kontrole bez razaranja nametnula kao standardna metoda u zgradarstvu. Osim procjene stanja fasada termografija se danas u zgradarstvu izuzetno cijeni kao pouzdan alat za ocjenu kvalitete izvedbe toplinske izolacije zgrade.

NAZIVLJE

ϑ	- temperatura	$^{\circ}\text{C}$
α	- koeficijent prijelaza topline	$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$
ρ	- gustoća	kg/m^3
λ	- koeficijent toplinske vodljivosti	$\text{W}/(\text{mK})$
c_p	- specifični toplinski kapacitet	$\text{J}/(\text{kgK})$
ε	- emisijski faktor	-

BIBLIOGRAFIJA

1. Maldague, X. P. V., Theory and practice of infrared technology for nondestructive testing, *John Wiley & Sons Inc.*, New York, 2001.
2. Boras, I. and Švaić, S., Determination of the Defect Parameters in Specimen by Means of Thermography and Numerical Methods, *Proceeding of The International Society for Optical Engineering*, San Antonio, Texas, USA, Vol. 3396, pp. 271-281, 1998.
3. Boras, I., Švaić, S. and Galović A., Mathematical model for simulation of defects under material surface applied to thermographic measurements, *Quantitative Infrared Thermography*, QIRT 98, Lodz, Poland, pp. 53-58, 1998.
4. Boras, I., Švaić, S. and Galović A., Thermal non-destructive testing (TNDT) quantification of subsurface defects, *11th International conference on Thermal Engineering and Thermogrammetry*, Budapest, Hungary, pp. 220-225, 1999.

Primjena IC termografije u zgradarstvu

Željka Hrs Borković, dipl.ing.arh.
Energetski institut Hrvoje Požar
Savska 163, Zagreb
01 6326138, 01 6040599
e-mail: zhhs@eihp.hr

Mirela Suša, dipl.ing.str.
Fakultet strojarstva i brodogradnje
I. Lučića 5, Zagreb
01 6168510, 01 6156940
e-mail: mirela.susa@fsb.hr

SAŽETAK

Primjena suvremenih mjera energetske efikasnosti u zgradarstvu ima kao glavni cilj trajno smanjenje energetske potrebe pri projektiranju, izgradnji i korištenju novih zgrada, te sanaciji i rekonstrukciji postojećih. Infracrvena termografija pokazala se kao izuzetno korisna metoda za vizualizaciju toplinskih gubitaka kroz elemente konstrukcije kod istraživanja potencijala povećanja energetske efikasnosti zgrada. Termografskim snimanjem zgrada, te kasnijom stručnom interpretacijom moguće je locirati nedostatke konstrukcije i usmjeriti zahvate na sanaciji prema optimalnom poboljšanju energetske efikasnosti sustava zgrade.

Dakle, široko područje koje uspješno kontrolira i nadzire termografija, danas se sve više širi i na područje zgradarstva. Ispitivanje kvalitete izolacije vanjske ovojnice zgrade i lociranje mjesta s najvećim gubicima topline, utvrđivanje mjesta s povećanom vlagom, analiza objekata pod zaštitom, sve se to uspješno provodi metodom termografije, bez razaranja konstrukcije. Termografskim snimanjem mjeri se postojanje tzv. toplih mjesta tj. mjesta rasipanja energije i hladnih mjesta, područja vlaženja. Pored detekcije gubitaka topline, IC termografija koristi se i kao kvalitativna metoda kontrole građenja kod novih objekata.

Energetski institut *Hrvoje Požar* u suradnji sa *Fakultetom strojarstva i brodogradnje*, u sklopu Nacionalnog energetskeg programa povećanja energetske efikasnosti u zgradarstvu – KUENzgrada, proveo je energetske analizu uz korištenje IC termografije na nekoliko objekata u svrhu vizualizacije toplinskih gubitaka, izrade varijanti optimizacije potrošnje energije, te prijedloga sanacije objekata po principima energetske efikasnosti.

KLJUČNE RIJEČI

Energetska efikasnost u zgradarstvu, infracrvena termografija, vizualizacija toplinskih gubitaka

UVOD

Stambeni i nestambeni sektor zgradarstva u Hrvatskoj zajedno troše preko 40 posto ukupne potrošnje energije, više od transporta i više od industrije. Energetska potrošnja namijenjena za grijanje i kondicioniranje zraka predstavlja najznačajniji dio energetske potrošnje u zgradama. Čak 83 posto postojećih zgrada u Hrvatskoj ne zadovoljava niti trenutno važeće Propise o toplinskoj zaštiti i uštedi energije iz 1987. godine. Zgrade su najveći pojedinačni potrošač energije i veliki izvor štetnih emisija stakleničkih plinova, posebno CO₂. Povećanje energetske efikasnosti u zgradama je jedan od najisplativijih načina smanjenja štetnih emisija u okoliš, kao i smanjenja troškova za energiju.

Infracrvena termografija je izuzetno korisna metoda za vizualizaciju toplinskih gubitaka kroz elemente konstrukcije kod istraživanja i unapređivanja energetske efikasnosti zgrada. Pomoću termografskih snimaka elemenata građevne konstrukcije moguće je u njima, neagresivnom metodom prepoznati nedostatke vezane uz toplinske karakteristike. Sposobnost termografskog uređaja da brzo i efikasno registrira male razlike temperature čine ga pogodnim za određivanje diskontinuiteta temperaturne razdiobe na površini građevinske opne. Termografskim snimanjem zgrada, te kasnijom stručnom interpretacijom moguće je locirati nedostatke konstrukcije i usmjeriti zahvate na sanaciji prema optimalnom poboljšanju energetske efikasnosti sustava zgrade.

PRIMJENA IC TERMOGRAFIJE NA PILOT PROJEKTIMA POVEĆANJA ENERGETSKE EFIKASNOSTI U ZGRADARSTVU

Energetski institut *Hrvoje Požar* u suradnji s *Fakultetom strojarstva i brodogradnje*, u sklopu Nacionalnog energetskeg programa povećanja energetske efikasnosti u zgradarstvu – KUENZgrada, proveo je energetske analize, uz korištenje IC termografije, na dvije karakteristične zgrade, u svrhu vizualizacije toplinskih gubitaka, prijedloga sanacije po principima energetske efikasnosti, te provjere toplinske kvalitete nakon sanacije.

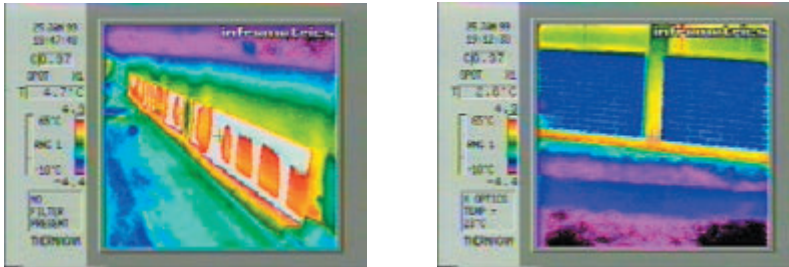
Sanacija zgrade Dječjih jaslica *Ivančica* u Osijeku provedena je s ciljem povećanja energetske efikasnosti, na zgradi, koja je nužno morala u rekonstrukciju zbog izuzetno lošeg stanja vanjske ovojnice. Sanacija je započela krajem 2003. godine i završila 2004. godine. Postojeća zgrada jaslica sagrađena je 1974. godine, bez toplinske zaštite. Analizom postojećeg stanja ustanovljeno je vrlo loše stanje vanjske ovojnice zidova, prozora i ravnog krova, s potpuno propalom fasadnom oblogom, neizoliranim zidovima, termički nekvalitetnim prozorima, te ravnim krovom koji na više mjesta propušta vodu. Rezultati termografskog snimanja i termografske analize zgrade pokazali su velike gubitke topline kroz prozore i vanjski zid. Bilo je jasno da je zgradu nužno obnoviti i zaštititi od daljnjeg propadanja.



Slike 1 i 2: Dječje jaslice prije rekonstrukcije i simulacija mogućeg izgleda nakon rekonstrukcije

Pilot projekt Dječjih jaslica *Ivančica* u Osijeku termografski je snimljen još 1999. godine, i napravljena je analiza toplinskih gubitaka. Kako dobra termografska snimka zahtjeva što je moguće više temperaturne razlike između mjernog objekta i okoline, uz što manji utjecaj sunčevih zraka i drugih izvora svjetla i topline, snimanje je provedeno noću, 25. siječnja 1999. od 18:00 do 19:45 sati. U vrijeme mjerenja, nebo je bilo vedro uz

malo magle. Vanjska temperatura iznosila je od $-1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $-3.0\text{ }^{\circ}\text{C}$, a vlažnost zraka 83 posto .



Slike 3 i 4: Termografske snimke vanjske ovojnice prije rekonstrukcije

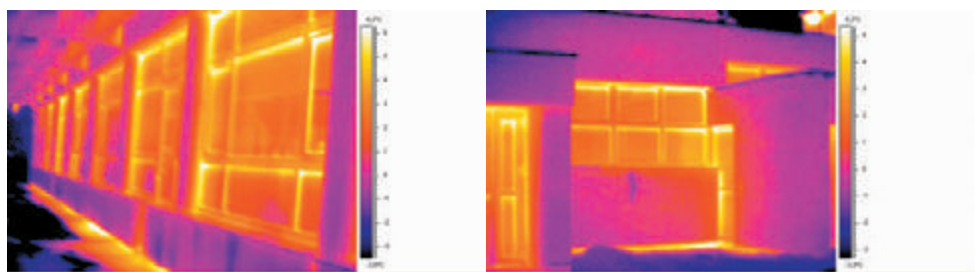
Rekonstrukcija je obuhvatila zamjenu prozora, izvedbu toplinske izolacije i završne obrade fasade, toplinsku i hidroizolaciju ravnog krova, te manje zahvate na povećanju energetske efikasnosti sustava grijanja i rasvjete. Zidovi su obloženi sa 10 cm toplinske izolacije i završno obrađeni tankoslojnom silikatnom žbukom. Postojeći prozori zamijenjeni su PVC prozorima znatno boljih termičkih karakteristika, sa $k=1,1-1,4\text{ W/m}^2\text{K}$, ravni krov se sanirao postavom parne brane, 12 cm toplinske izolacije i nove PVC hidroizolacije. Sanacija poda nije obuhvaćena projektom, iako koeficijent prolaza topline za pod toplinski ne zadovoljava, ali zbog odnosa gubitaka topline kroz pod koji su mali i velikih troškova sanacije poda, ona nije ekonomski isplativa.



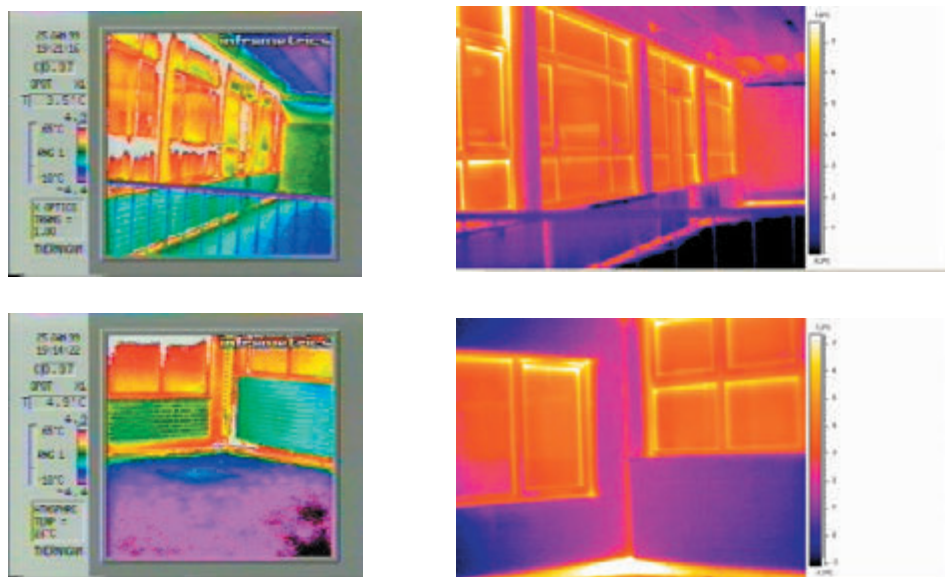
Slike 5 i 6: Dječje jaslice nakon rekonstrukcije

Energetska analiza popraćena termografskim snimanjem pokazala je da možemo očekivati smanjenje toplinskih potreba zgrade u odnosu na postojeće sa 238.000 kWh na 62.000 kWh odnosno za 74 posto, a toplinskog opterećenja objekta sa 134.000 W na 37.000 W odnosno za 72 posto godišnje.

Termografsko mjerenje ovojnice zgrade nakon rekonstrukcije, provedeno je 01. veljače 2005. godine u razdoblju od 16:45 do 18:45 sati. Mjerenje je provedeno s ciljem određivanja temperaturne razdiobe na vanjskim ploham objekta i potvrđivanja kvalitete toplinske zaštite nakon rekonstrukcije. Vanjska temperatura iznosila je u vrijeme mjerenja od +4,7 °C do +3.0 °C, a vlažnost zraka 51-66 posto. Emisijski faktor snimanih površina fasade iznosio je 0.97. Mjerenje je vršeno uz pomoć termografskog sustava ThermoCAM SC2000.



Slike 7 i 8: Termografske snimke vanjske ovojnice zgrade nakon rekonstrukcije



Slike 9-12: Usporedba termograma prije(lijevo) i nakon rekonstrukcije(desno)

Temperaturna skala primijenjena tijekom obrade termograma je linearna i okvirne temperature pojedinih površina moguće je očitati uz pomoć temperaturne skale koja se nalazi pored svakog termograma. Na snimljenim termogramima nakon rekonstrukcije nema naznaka vidljivih mjesta slabije izolacije, niti propuštanja na spojevima prozora i vrata. Možemo primijetiti jedino nešto veće propuštanje topline uz liniju poda na tlu, do čega dolazi dijelom zbog neizoliranog poda, a dijelom zbog toga što toplinska izolacija zida nije postavljena i ispod nivoa terena, već je završena nekoliko centimetara prije terena.

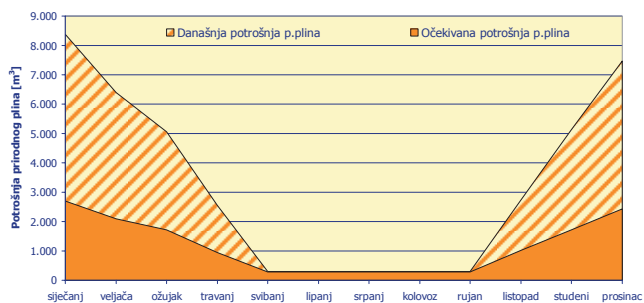
Poslovna zgrada „HEP“ D.P. „ELEKTRA“ Koprivnica drugi je realizirani pilot projekt energetske efikasnosti u zgradarstvu, i jedan je od brojnih primjera postojeće arhitekture, izgrađen bez toplinske zaštite. Zgrada je građena 1968. godine, dakle prije usvajanja prvih hrvatskih propisa o toplinskoj zaštiti i uštedi energije 1970. godine. Potrošnja energije za grijanje kod ovakve gradnje kreće se između 200 i 300 kWh/m². Analizirana zgrada građena je u kombinaciji pune opeke i armiranog betona. Nosivu konstrukciju čine armiranobetonski stupovi i zidovi međusobno povezani armiranobetonskim gredama. Postojeći stropovi su armiranobetonski rebričasti. Vanjski zidovi zidani su punom opekam, u debljini 25 ili 38 cm, a dijelom su armiranobetonski debljine 30 cm, bez toplinske zaštite. Prozori su većim dijelom drveni, ostakljeni jednostrukim ili s dva jednostruka stakla, vrlo loših toplinskih karakteristika.



Slike 13 i 14: Poslovna zgrada prije rekonstrukcije i simulacija mogućeg izgleda nakon rekonstrukcije

Sanacija vanjske ovojnice zgrade obuhvatila je: sanaciju fasade izvedbom dodatne toplinske izolacije vanjskog zida u debljini 10 cm i sloja završne tankoslojne žbuke; promjenu prozora i ugradnju visokokvalitetnih plastificiranih aluminijskih prozorskih okvira s prekinutim toplinskim

mostom i ugrađenim izo staklom 4+16argon+6mm, sa $k=1,1-1,4 \text{ W/m}^2\text{K}$, i sanaciju ravnog krova izvedbom kosog krova blagog nagiba, te dodatnom toplinskom izolacijom stropa zadnje etaže prema negrijanom tavanu u debljini 14 cm. Prilikom ugradnje novih prozora ugrađeni su i prozorski mikro-prekidači kojima se isključuje grijanje/hlađenje pojedine prostorije prilikom provjetravanja iste. Ovakvom sanacijom vanjske ovojnice zgrade očekuju se uštede u potrošnji energije za grijanje 60 do 70 posto, odnosno sa prosječnih 240kWh/m^2 na oko $60-70 \text{ kWh/m}^2$.



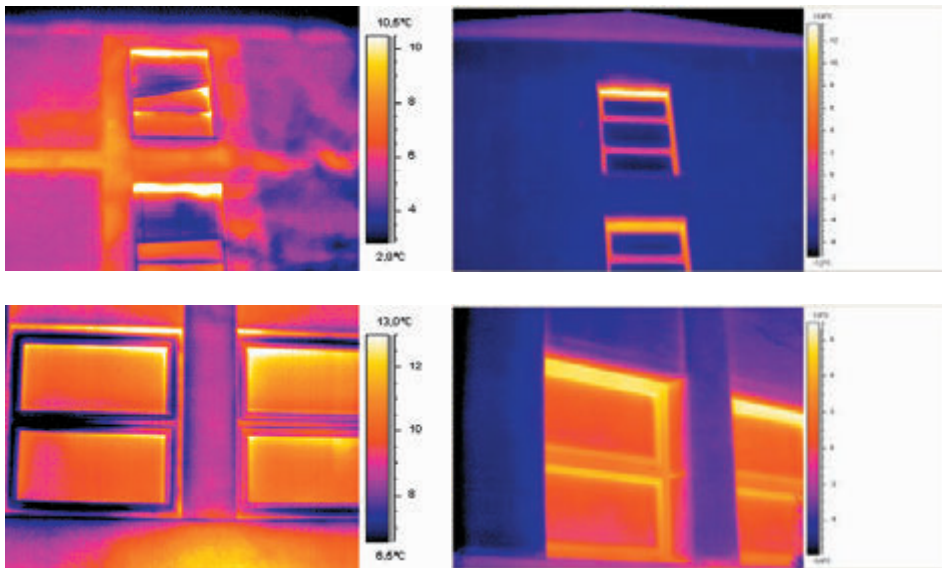
Slika 15: Usporedba potrošnje goriva prije i nakon rekonstrukcije

Prosječna godišnja količina potrebnog prirodnog plina za podmirivanje energetske potrebe poslovne zgrade prije rekonstrukcije iznosila je 39.199 m^3 , dok je nakon rekonstrukcije 64 posto manja i iznosi 14.112 m^3 . Razmatrajući emisije CO_2 pri sagorijevanju prirodnog plina, na razlici od 25.087 m^3 , primjena projekta povećanja energetske efikasnosti poslovne zgrade "HEP D.P. Elektra Koprivnica" smanjuje štetne emisije stakleničkih plinova za 48 tona godišnje. U razmatranom vijeku trajanja projekta od 25 godina, smanjenje emisija CO_2 iznosi 1.200 tona.



Slike 16 i 17: Izgled zgrade pri kraju rekonstrukcije (prosinač 2004.)

Termografsko snimanje postojećeg stanja vanjskog pročelja zgrade obavljeno je 08. travnja 2004. u vremenu od 05:00 sati do 09:00 sati. Vanjska temperatura bila je oko -1°C , unutarnji prostor bio je zagrijan na 21°C . Termografsko snimanje provedeno je u svrhu vizualizacije toplinskih gubitaka i izrade varijanti optimizacije potrošnje energije. Izvršeno termografsko snimanje vrlo nam lijepo pokazuje kako zgrada građena bez toplinske izolacije ima izuzetno nehomogenu površinu što se tiče toplinskih gubitaka, zbog različitih toplinskih karakteristika materijala od kojih je građena. Tako jedan armirano betonski zid sa koeficijentom prolaska topline od čak $k=2,71 \text{ W/m}^2\text{K}$ ima gotovo dvostruko veće toplinske gubitke od zida od opeke 38 cm sa $k=1,40 \text{ W/m}^2\text{K}$. Također se lijepo vide toplinski mostovi i loša kvaliteta prozora i brtvljenja, te veliko propuštanje kroz neizolirane kutije za rolete. Problem nehomogene površine vanjskog zida, dodatnom toplinskom izolacijom u potpunosti se rješava, jer se postižu gotovo identični koeficijenti prolaska topline kod različitih sastava zidova. Na osnovu rezultata utvrđenih termografijom i proračunom toplinskih potreba objekta, te stanja objekta, planiran je optimalni zahvat na postojećem objektu u svrhu obnove i maksimalne uštede energije.



Slike 18-21: Usporedba termograma prije(lijevo) i nakon rekonstrukcije (desno) vanjske ovojnice zgrade.

Termografsko mjerenje ovojnice zgrade nakon rekonstrukcije, provedeno je 24. veljače 2005. godine u razdoblju od 21:45 do 23:15 sati. Mjerenje je provedeno s ciljem određivanja temperaturne razdiobe na vanjskim plohama objekta i potvrđivanja kvalitete toplinske zaštite nakon rekonstrukcije. Nebo je bilo vedro, temperatura zraka između -1.0 i +2.3°C, a vlažnost zraka 79 do 81 posto. Termografske snimke nakon rekonstrukcije potvrdile su očekivanu toplinsku kvalitetu zgrade.

ZAKLJUČAK

Primjena suvremenih mjera energetske efikasnosti u zgradarstvu ima kao glavni cilj trajno smanjenje energetske potreba pri projektiranju, izgradnji i korištenju novih zgrada, te sanaciji i rekonstrukciji postojećih. IC termografija danas se pokazuje kao izuzetno korisna metoda u istraživanju i unapređivanju energetske efikasnosti u zgradarstvu. Pomoću termografskih snimaka dijelova konstrukcije moguće je vrlo brzo prepoznati nedostatke povezane s toplinskim karakteristikama, otkriti uzroke i predložiti sanaciju. Mogućnost beskontaktnog i daljinskog snimanja ukupnog temperaturnog polja površine promatranog objekta daje velike prednosti u odnosu na klasične analize konstrukcije. Primjena je podjednako korisna na postojećim objektima, objektima pod zaštitom kao i novim objektima. U razvijenim zemljama se metoda termografije sve više uvodi kao obavezna metoda kod kontrole pri primopredaji objekata, te u redovitom nadzoru i održavanju objekata, posebno objekata javne namjene. Istraživanja pokazuju da među troškovima gradnje i pogona zgrade na prvom mjestu često stoje troškovi održavanja. Stoga primjena termografije može donijeti značajne uštede bilo putem kratkoročnog spriječavanja ozbiljne degradacije sustava konstrukcije ili pak dugoročnog podizanja energetske efikasnosti zgrade.

Analize pokazuju da uvođenje suvremenih principa energetske efikasnosti u zgradarstvu omogućuje energetske uštede 50-80%. Dugoročno gledano, s očekivanim poskupljenjem energenata, te razvojem svijesti o uštedi energije i zaštiti okoliša, metoda IC termografije svakako će naći svoju veliku primjenu u zgradarstvu i održivoj gradnji, kao i u suvremenom gospodarenju energijom u cijeloj zemlji.

ABSTRACT

Application of contemporary energy efficiency measurements in buildings has set as its main goal permanent decrease in energy needs in design, building and use of new buildings, as well as in improvement and reconstruction of the existing ones. The infrared thermography has been proved as an extremely useful method for visualization of the heat losses through the construction elements when exploring the potential for the increase of the building energy efficiency. Through the competent analysis and interpretation of the recorded thermograms of the building, it is possible to locate the defects on the construction and direct the reconstruction interventions towards the optimal improvement of the building energy system efficiency.

Therefore, apart from the wide area of successful application, thermography is currently more and more present in the field of buildings. Insulation quality examinations of the outer surface of the building, as well as locating the spots of the maximal heat losses, detecting the areas with higher humidity and overall building analysis, is successfully performed by thermography, as a non-destructive method of construction examination. Besides, infrared thermography, as a qualitative method is used to control the construction of the new buildings.

Energy Institute [Hrvoje Požar](#) in cooperation with faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, within the National energy programme of energy efficiency improvement in buildings–KUEENZgrada, has performed energy analysis, using the infrared thermography on several objects in order to visualize the heat losses, develop ways of energy consumption optimization, and suggest the interventions to be made in accordance with the energy efficiency principles.

KEYWORDS

Energy efficiency in buildings, infrared thermography, visualization of the heat losses

Primjena termografije kod analize strujanja vode u toplovodnim kotlovima

Srećko Švaić, prof.dr.sc.
Fakultet strojarstva i brodogradnje
Ivana Lučića 5, 10 000 Zagreb
Tel, fax: 01/6168-146
srecko.svaic@fsb.hr

Damir Dović, dr.sc.
Fakultet strojarstva i brodogradnje
Ivana Lučića 5, 10 000 Zagreb
Tel, fax: 01/6168-174
damir.dovic@fsb.hr

Mirela Suša, dipl.inž.
Fakultet strojarstva i brodogradnje
Ivana Lučića 5, 10 000 Zagreb
Tel: 01/6168-510
mirela.susa@fsb.hr

SAŽETAK

Kod konstrukcije toplinskih aparata (kotlova, izmjenjivača topline i slično) potrebno je osigurati kvalitetno strujanje medija uz oplakivane površine. To pretpostavlja da su predviđene brzine strujanja ostvarene na svim mjestima u aparatu. Pojava zona s manjim brzinama strujanja ili zona zastoja neminovno dovodi do smanjenog učina aparata. Kod toplovodnih kotlova i drugih toplinskih aparata kod kojih može doći do pregrijavanja radnog medija ovakve pojave dovode do dodatnih problema koji se manifestiraju kao lokalno isparavanje popraćeno zvučnim efektima usljed stvarnja mjehura pare. U radu je prikazana primjena termografskog praćenja strujanja medija kroz kotao koja omogućava otkrivanje mjesta na konstrukciji s lošom prostrujanosti medijem. Na taj se način izbjegavaju dugotrajna ispitivanja koja u mnogim slučajevima nije jednostavno provesti.

Pokazani primjeri termografskih ispitivanja provedenih na prototipovima toplovodnih kotlova i na osnovi njih dobivene informacije ukazuju na opravdanost uvođenja IC termografije metode za verifikaciju pojedinih parametara. Ona ne samo da pruža niz informacija o kvaliteti konstrukcije koje se klasičnim mjerenjima teško dobiju već znatno skraćuje i pojeftinjuje razvoj proizvoda. Pored termografske analize strujanja vode kroz kotao na isti se način može provesti i analiza temperaturne raspodjele na vanjskoj oplati kotla i ostalim ploham kao što su plohe vrata, dimne komore, upravljačke kutije i slično te utvrditi da li su one u granicama koje propisuju norme.

KLJUČNE RIJEČI

Termografija, toplovodni kotlovi, strujanje vode kod toplovodnih kotlova

1.0 UVOD

Kod konstrukcije toplinskih aparata (kotlova, izmjenjivača topline i slično) potrebno je osigurati kvalitetno strujanje medija uz oplakivane površine. To pretpostavlja da su predviđene brzine strujanja ostvarene na svim mjestima u aparatu. Pojava zona s manjim brzinama strujanja ili zona zastoja neminovno dovodi do smanjenog učina aparata. Kod toplovodnih kotlova i drugih toplinskih aparata kod kojih može doći do pregrijavanja radnog medija ovakve pojave dovode do dodatnih problema koji se manifestiraju kao lokalno isparavanje popraćeno zvučnim efektima usljed stvarnja mjehura pare. U radu je prikazana primjena termografskog praćenja strujanja medija kroz kotao koja omogućava otkrivanje mjesta na konstrukciji s lošom prostrujanosti medijem. Na taj se način izbjegavaju dugotrajna ispitivanja koja u mnogim slučajevima nije jednostavno provesti.

2.0 PRISTUP KONSTRUKCIJI TOPLINSKIH APARATA

Prilikom konstrukcije toplinskog aparata inženjer se susreće s tri osnovna problema koje mora kompromisno riješiti. To su:

- određivanje potrebnih površina za izmjenu topline
- definiranje strujanja medija kroz aparat
- postizanje tražene čvrstoće aparata

Ove se tri zadaće rješavaju termodinamičkim i hidrauličkim proračunom i proračunom čvrstoće.

Kvalitetno rješenje ova tri zahtjeva traži od konstruktora dobro poznavanje problematike pojedinih tipova toplinskih aparata, kako zbog njihove specifične konstrukcije tako i uvjeta rada. Iako dugogodišnji rad

na konstruiranju aparata pretpostavlja dovoljno iskustvo za rješavanje ovih problema, gotovo uvijek potvrda o dobrom ili lošem rješenju dolazi tek nakon funkcionalnog ispitivanja prototipa. Rekonstrukcije, ako ih je potrebno napraviti, zahtjevaju određeno vrijeme i naravno dodatne troškove. Upravo u ovom segmentu termografija može pomoći da se ove aktivnosti svedu na najmanju moguću mjeru.

3.0 TOPLOVODNI KOTLOVI

Kod toplovodnih se kotlova susrećemo s dva tipa površina za izmjenu topline. Oba su s jedne strane oplakivana vodom, pri čemu se toplina između stijenke i vode izmjenjuje mehanizmom prisilne konvekcije. S druge pak strane imamo površine ložišta koje izmjenjuju toplinu zračenjem s plamenom i konvekcijom s produktima izgaranja i one kod kojih se javlja samo konvekcija. Toplinska su opterećenja ovih površina bitno različita i kreću se u odnosu od 3:1 do 6:1, naravno u korist onih u ložištu. Kvalitetno strujanje vode oko tih površina osnovni je preduvjet za postizanje traženog kapaciteta kotla. To znači da voda od ulaza u kotao pa do izlaza mora strujati duž površina s određenim brzinama. Osim toga, kako je već rečeno u uvodu, zastoji mogu dovesti do neželjenih pojava kao što je lokalno isparavanje i pojava vibracija i buke. Isto tako u kotlu se mogu javiti neželjena strujanja u kratkom spoju nastala radi lokalnih otpora ili nedostataka u konstrukciji. I na kraju postoji još jedan problem o kojem treba voditi računa, a to je povrat hladne vode u kotao koji ako nije dobro riješen, dovodi do pothlađivanja stijenki, kondenzacije i pojačane korozije.

4.0 PRIMJENA TERMOGRAFIJE

Termografijom se može dobiti temperaturna raspodjela na promatranim površinama. Upravo raspodjela temperatura koja se javlja na pojedinim plohama kotla, a koje su pristupačne za termografska mjerenja, daju informacije o navedenim pojavama. Kotao koji se ispituje mora biti bez vanjske oplate i izolacije tako da su vidljive sve plohe koje se želi snimati. Termogrami se snimaju sustavno s postavnim parametrima kamere koji osiguravaju pokrivanje cjelokupnog temperaturnog diapazona i u vremenskim razmacima koji kasnije omogućavaju interpretaciju strujanja u fazi zagrijavanja kotla i u stacionarnom stanju.

5.0 PROVEDENA TERMOGRAFSKA MJERENJA

Termografska mjerenja provedena su na dva toplovodna kotla, jednom loženom EL loživim uljem i drugom loženom krutim gorivom i to u fazi ispitivanja prototipa.

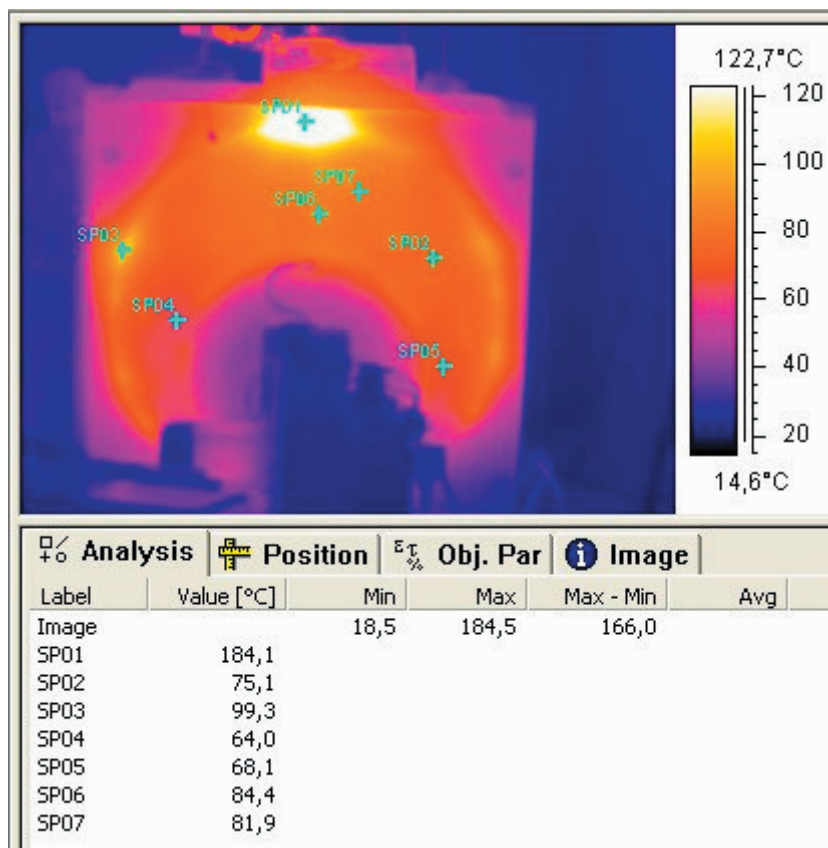
Prvi kotao ložen EL loživim uljem imao je nazivnu snagu 1000 kW, dva prolaza dimnih plinova i usmjerivač povratne vode čiji je zadatak da štiti cijevi drugog snopa od pothlađivanja i osigurava postepeno mješanje povratne i kotlovske vode. Cilj mjerenja bio je utvrditi prostrujanost kotla i funkcionalnost usmjerivačkog lima. Sa kotla je skinuta vanjska oplata i izolacija tako da je IC kamerom omogućeno snimanje temperaturne raspodjele na vanjskom plaštu kotla. Prvi niz termograma snimljen je u prve tri minute nakon što je kotao koji je do tada bio u fazi mirovanja, na radnoj temperaturi pri čemu ni cirkulacijska pumpa niti plamenik nisu radili, počeo s radom. Slijedeći termogrami iste plohe napravljeni su nakon 15 minuta, 25 minuta i 60 minuta.

Na slici 1. prikazan je ispitivani kotao postavljen na mjernu liniju.



Slika 1. Kotao postavljen na mjernu liniju

Termogram na slici 2. snimljen je kod stacionarnog stanja kotla na nazivnom učinku s ciljem dobivanja temperaturne raspodjele i utvrđivanja mjesta s povišenom temperaturom.



Slika 2. Termogram prednje strane kotla u stacionarnom stanju

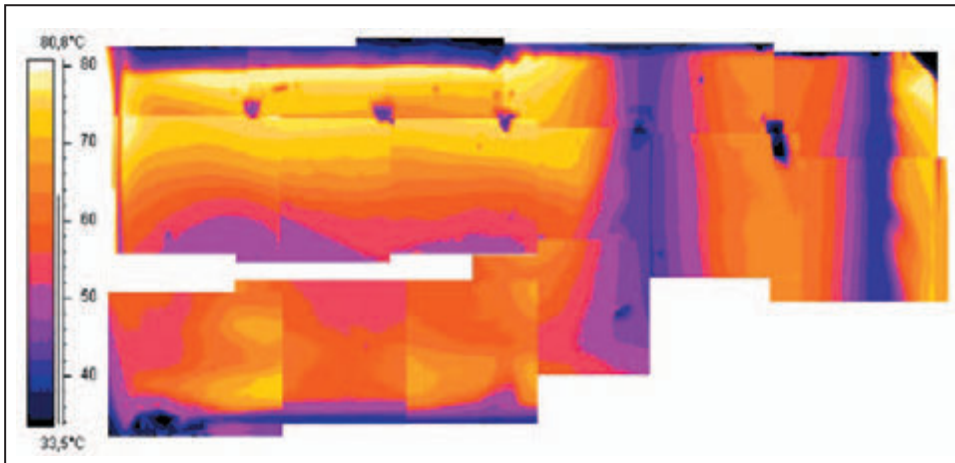
Na slici 3. dan je niz od četiri termograma na kojima se vidi temperaturna raspodjela na plohi vanjskog plašta nastala kao rezultat cirkulacije vode u kotlu.

Na prvom termogramu vidi se temperaturna raspodjela nastala nakon tri minute od početka rada plamenika i pumpe. Uočava se efekat usmjerivača povratne vode i karakteristika strujanja u ostalom dijelu kotla. Hladna voda koja dolazi ispod plamenice diže se uz nju, prelazi preko cijevnih snopova i odlazi zagrijana na približno 80°C.

Na drugom termogramu uočavaju se šire zone pojedinih temperatura uz zadržanu karakteristiku strujanja. Voda koja struji duž usmjerivačkog lima ima jednoliku temperaturu .

Na trećem termogramu temperaturna raspodjela nije se bitno promjenila, no cijeli je kotao došao na viši temperaturni nivo. Na usmjerivačkom se limu vidi mješanje povratne i kotlovske vode.

Četvrti termogram snimljen u stacionarnom stanju pokazuje dobru raspodjelu strujanja kroz kotao. Povratna voda dolazi do dna kotla te se otuda diže nagore i jednoliko zagrijava do izlaznog priključka.



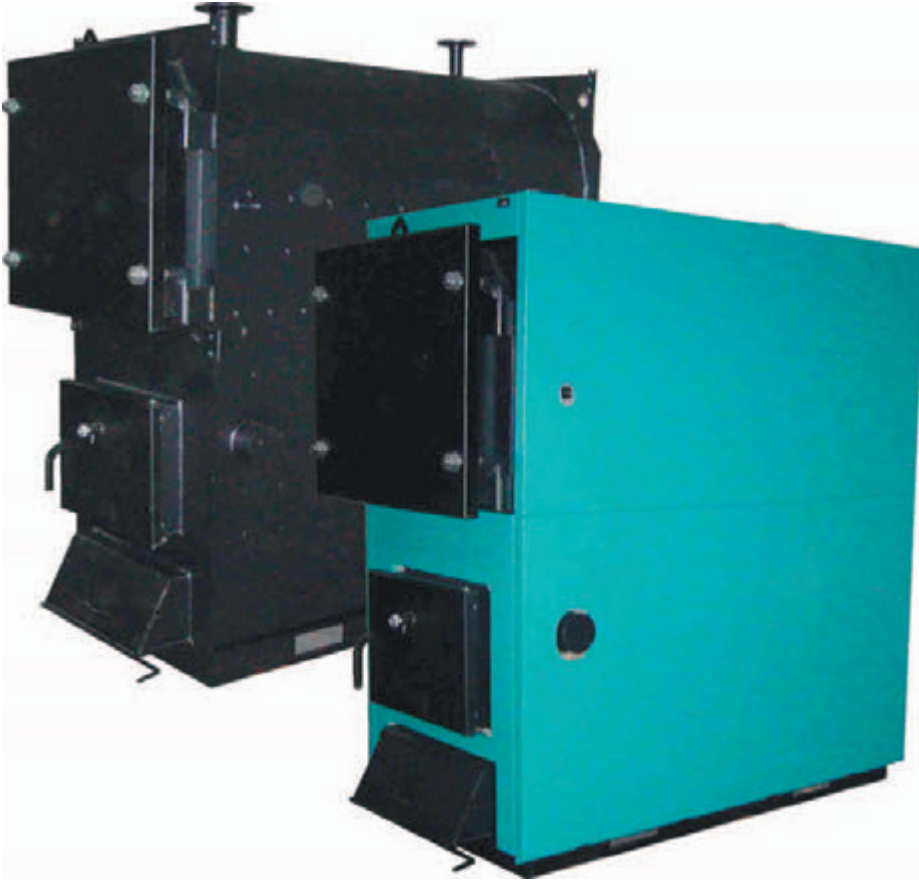


Slika 3.T termogrami s temperaturnom raspodjelom na plohi vanjskog plašta

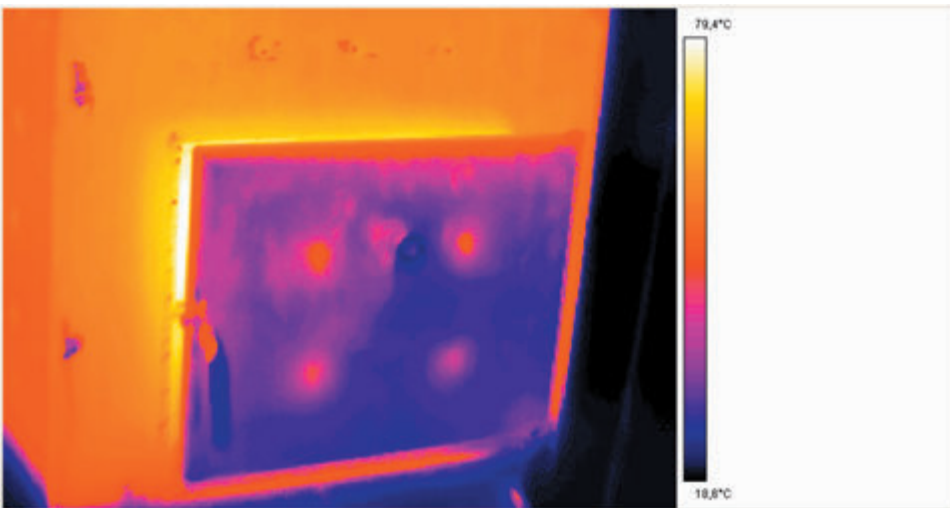
Drugi kotao ložen krutim gorivom bio je snage 300 kW. Cilj provedenih mjerenja bio je isti kao i kod prvog prototipa kotla.

Na slici 4. vidi se ispitivani kotao sa i bez izolacije.

Na termogramu, slika 5 dana je temperaturna raspodjela na prednjoj strani kotla. Uočava se razlika temperatura vrata koja su izolirana od temperatura ostalog dijela.

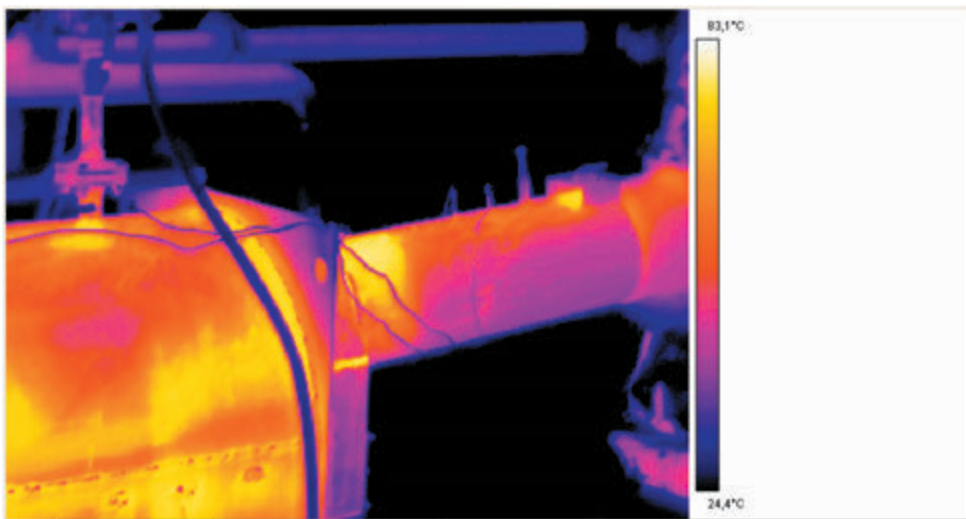
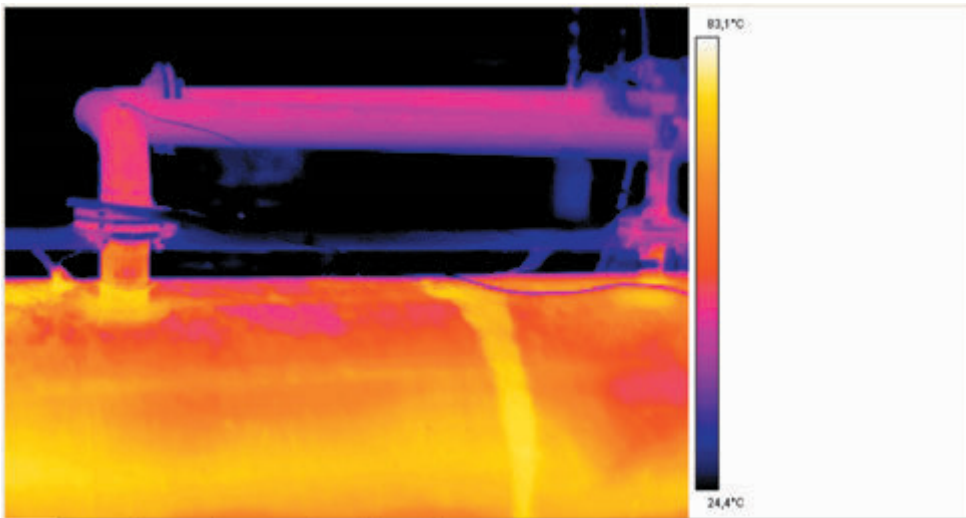


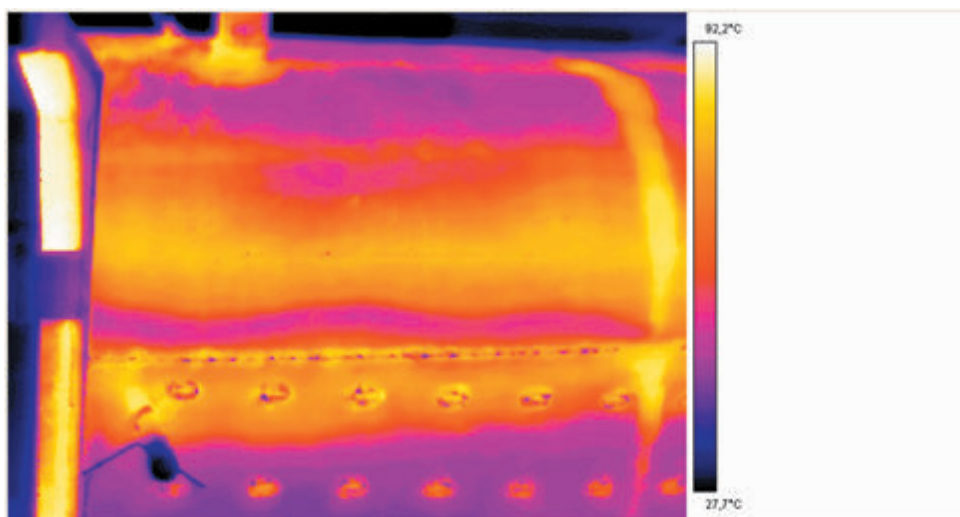
Slika 4. Ispitivani kotao



Slika 5 Termogram s prikazom temperaturne raspodjele na prednjoj strani kotla

Na termogramima, slika 6. vidi se temperaturna raspodjela na bočnoj strani kotla nastala kao rezultat strujanja vode kroz kotao.





Slika 6 Termogram s prikazom temperaturne raspodjele na bočnoj strani kotla

6.0 ZAKLJUČAK

Pokazani primjeri termografskih ispitivanja provedenih na prototipovima toplovodnih kotlova i na osnovi njih dobivene informacije ukazuju na opravdanost uvođenja IC termografije metode za verifikaciju pojedinih parametara. Ona ne samo da pruža niz informacija o kvaliteti konstrukcije koje se klasičnim mjerenjima teško dobiju već znatno skraćuje i pojeftinjuje razvoj proizvoda. Pored termografske analize strujanja vode kroz kotao na isti se način može provesti i analiza temperaturne raspodjele na vanjskoj oplati kotla i ostalim plohama kao što su plohe vrata, dimne komore, upravljačke kutije i slično te utvrditi da li su one u granicama koje propisuju norme.

BIBLIOGRAFIJA

1. Holst, C. G., *Common Sense Approach to Thermal Imaging*, SPIE-The International Society for Optical Engineering, Bellingham, Washington, USA, 2000.
2. Boras, I. and Svaic, S., Possibilities of Determination and Characterization of Subsurface Defects in Material by Means of Thermography and 3D Numerical Model, *International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE)*, Berlin, Germany, Sept. 16-19, 2003.

Practical experience with square pulse thermography for finding inclusions in stainless steel

Gerhard Traxler*

ARC Seibersdorf research GmbH, A-2444 Seibersdorf, Industrial Inspection and Integration

ABSTRACT

For inline applications the so called square pulse technique (SPT) is easy to automate and needs less power from the source, because energy can be brought into the probe for a longer time span. Further its strength (in relation to flash pulse technique) is to find voids deeper below the surface. Therefore all of the calculations and practical verifications in this paper will be done only with square pulse.

This work sets the focus on differences between practical experience and theoretical calculations. All practical square pulse tests were made with a specimen of stainless steel with an inclusion of air.

For calculations we will use algebraic solutions of the heat diffusion equation as well as finite differences method. To show the differences to the practical values, their discussion is based on diagrams with both: practical and calculated values of temperature progress.

Additionally some experience of how to avoid measurement faults will be explained.

Keywords: thermography, square pulse, finite differences, inline inspection

1. INTRODUCTION

Thermographic inline inspection is able to find voids or inclusions inside of probes. This is done by watching the surface temperature while the probe is heated up. If the temperature progress is different to the one for an infinite probe, it is assumed, that there is an inclusion. This is a very idealistic statement which is true only in a special case:

To compare to an infinite probe (thickness) is ok as long as we evaluate the temperatures up to the reaction time only.

But still there are influences like for instance reflected radiation or not optimal energy source for heating up (unstable in time), that leads to differences between the above statement and practical results. It will be shown how to suppress or how to deal with these influences.

First step to build a test arrangement is to get some basic design parameters like:

- Temperature raise as a function of time
- Find the time, when the temperature difference between infinite and void probe is large enough to be dedected
- Reaction time as a function of depth

To get the design parameters and to explain what happens according to a not optimal (constant in time) energy source a simulation with Finite Differences Method (FDM) is done. Additionally arithmetic calculations are used to check the simulated results.

Last but not least the practical experiment is compared to the results of FDM to show, if the influence is really suppressed or at least explained.

2. METHODOLOGY

Based on theoretical considerations and calculations like FDM a test system is arranged to get practical data. Comparing the practical data with calculated ones, there will be found some differences which are to be explained.

* gerhard.traxler@arcs.ac.at; phone +43 50 550-2715; fax +43 50 550-2724

2.1 Test method

As testing method SPT^[1] is used. That means to observe the surface temperature while the surface is heated up. To observing the surface temperature means to measure radiation, coming from the surface of the probe and is caused by the surface temperature. Since real probes have an emission coefficient < 1 , there is also reflected radiation coming from the same direction. Three methods are used to deal with the unintended reflection:

- 1) Radiation from environment has a known value, given by the ambient temperature. The temperature calculation software of the camera takes this into account by subtracting the ambient part.
- 2) Radiation from the Xenon source has an IR part, which is filtered out by a semitransparent mirror. So radiation with a wavelength higher than $2\mu\text{m}$ is suppressed.
- 3) The camera, sensible in the wavelength range 3.6 to $5\mu\text{m}$ views the probe in an angle of 45° against the probes perpendicular to suppress specular reflection.

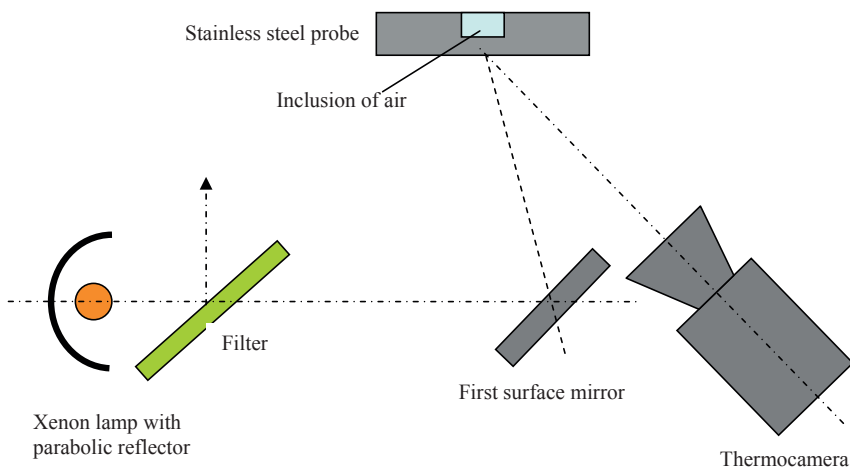


Figure 1: components

Light from Xenon source is reflected by a parabolic mirror (Figure 1). So most of the light radiates parallel to the optical axis and exposes a small portion on the probes surface with uniform intensity. (Related to the area of interest intensity is 100% in the centre and approximately 80% at the borders.) Most of the light with wavelengths larger than $2\mu\text{m}$ is reflected away by a filter plate of Plexi[®]. Therefore the largest portion of transmitted light is in the wavelength range from 300 to 2000nm. Since the camera is sensitive in the range of 3.6 to $5\mu\text{m}$ exposure of the camera by reflected light is strongly suppressed.

The radiation caused by the probe temperature is orders below the radiation for heating up its surface. So an additional method for suppression is done by choosing optimal exposure and viewing angles. The exposure angle, which is the angle of incident light leads to a direction of specular light away from the camera. Only scattered light reaches the camera. The camera is another radiating source. It is hotter than surrounding at its housing and colder (77K) on the chip. So watching the probe perpendicularly means to watch the specular reflections of the camera itself. To avoid this, the camera looks onto the probes surface not in a right angle.

[®] Plexi is a registered trademark

2.2 Algebraic calculation

To find a first hint for dimensioning the checking system an algebraic solution of the heat conduction in solids is used. With zero temperature at $t=0$, an emission coefficient ε of the probes surface and an irradiance E [W/m^2] the surface temperature for a semi infinite probe as a function of time is given by equation 2.1^[2]:

$$\Delta T = \frac{2E\varepsilon}{\lambda} \sqrt{\frac{t\kappa}{\pi}} \tag{2.1}$$

The reaction time when the surface temperature starts deviating caused by a defect in depth z is (equation 2.2):

$$t_r = \frac{z^2}{4\kappa} \tag{2.2}$$

with $\kappa = \frac{\lambda}{\rho c_p}$

κ [m^2/s] is the thermal diffusivity, λ [$W/m/K$] is the heat conductivity, ρ [kg/m^3] is the density and c_p [$J/kg/K$] is the specific heat capacity.

2.3 Simulation with FDM

To limit the amount of calculation time for the FDM, only a simple 1-dimensional simulation is done. In this model, the surface of the probe is thought to be of infinite area and the whole surface is exposed by the same amount of radiation. An inclusion of air then would act as if the probes thickness would be reduced. In the real probe heat is transported also laterally and causes an error, which becomes significant at time spans longer than the time that it takes for the first reaction from the inclusion to the surface temperature. So 1-dimensional FDM-calculated temperatures later than the first reaction are wrong, or should at least be handled with care.

For FDM the probe is divided into equal thick layers (figure 2) and an additionally layer at the front and the back of the probe, to take the environment into account. The first layer is the one, exposed to the energy source and each immediate neighbour will get some transported heat according to its temperature difference.

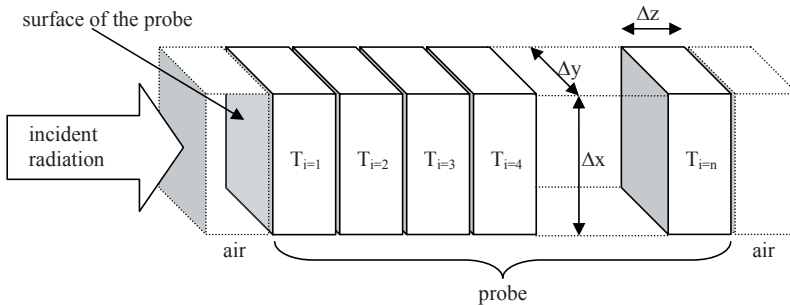


Figure 2: sketch for FDM

With given temperature difference ΔT , the heat ΔQ , transported over the distance Δz through area A to the neighbour layer in Δt can be calculated by equation 2.3:

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = \lambda \frac{A \Delta T}{\Delta z} \tag{2.3}$$

For elements with $A = \Delta x \Delta y$ is constant for all elements, with known temperatures T_i and $\Delta z_i = z_{i+1} - z_i$, the heat transported from element i to $i+1$ is (equation 2.4)

$$\Delta Q_i = \lambda \frac{\Delta x \Delta y (T_i - T_{i+1}) \Delta t}{\Delta z_i} \quad (2.4)$$

The equivalent for the transported heat (equation 2.5) expressed as a temperature difference is then

$$\Delta T_i = \frac{\Delta Q_i}{c_{pi} \rho_i \Delta x \Delta y \Delta z_i} \quad (2.5)$$

So if T_i and T_{i+1} are given at t_i , $T_i - \Delta T_i$ is the temperature in layer i at $t_i + \Delta t$ and $T_{i+1} + \Delta T_i$ is the temperature in layer $i+1$ at $t_i + \Delta t$. It is known, that the FDM calculation becomes unstable^[3], if Δt is too large. So it is chosen according to equation 2.6:

$$\Delta t = \min \left(\frac{\Delta z_i^2 c_{pi} \rho_i}{3 \lambda_i} \right) \quad (2.6)$$

The factor of 3 in equation 2.6 is used to satisfy the stability criteria (a factor of 2)^[3] and to have a small reserve. Since the energy source doesn't start immediately with its full power after $t=0$, an influence to the temperature progress is expected.

2.4 Optimization for FDM

The result from the FDM calculation should give the surface temperature progress for a given probe. Since dimensions are finite, temperature of the element at the probes surface $T_{i=1}$ is not the real surface temperature T_{surface} , because it is still Δz away from surface.

$T_{i=1}$ is an equivalent of kinetic energy in element 1. So it is the integral of energy in infinitely small fractions of space in the element. Since energy is not equally distributed, T_{surface} is an equivalent of kinetic energy of a fraction of this element with $\Delta z=0$.

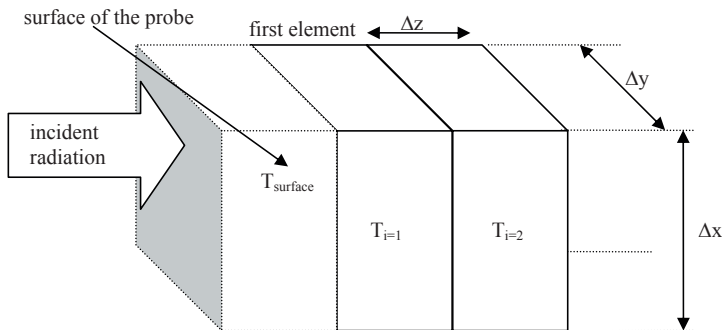


Figure 3: sketch for FDM

When heating up is in progress, T_{surface} must be higher than $T_{i=1}$. This is shown in equation 2.7 with z as the distance from surface and t as time starting with $t=0$ at exposure start.

$$\Delta T = \frac{2E\varepsilon}{\lambda} \left(\sqrt{\frac{t\kappa}{\pi}} e^{-z^2/4\kappa t} - \frac{z}{2} \operatorname{erfc} \frac{z}{\sqrt{4\kappa t}} \right) \quad (2.7)$$

For a given time t temperature declines rapidly with larger depths z . The gradient also declines with larger depths. So extrapolating T_{surface} for $z=0$ based on the first and the second deviation of $T=f(z)$, the calculated surface temperature must be closer to the real surface temperature. Since z has discrete values in FDM, the temperature of the first 3 elements with z is set into the centre of each element is taken to calculate $\Delta f(z)$ and $\Delta\Delta f(z)$. T_{surface} is $\Delta z/2$ away from $T_{j=1}$ and the distance from one element to the next is Δz , so for extrapolation only half of the differences has to be add (equation 2.8).

$$\begin{aligned} \Delta T_1 &= \frac{T_1 - T_2}{2} \\ \Delta\Delta T_1 &= \frac{T_1 - 2T_2 + T_3}{2} \\ T_{\text{Surface}} &= T_1 + \Delta T_1 + \Delta\Delta T_1 \end{aligned} \quad (2.8)$$

2.5 Light source

The light source is switched on electrically at $t=0$. Since switching on isn't done by a trigger like used for flash lamps, it takes a lot of time for the power supply to reach full power output to the lamp. Equation 2.9 was found as sufficient approximation to our real light source:

$$P_t = P_{\text{max}} \left(\frac{t}{t_{100\%}} \right)^{0,8} \quad (2.9)$$

Since it is expected, that this "start up" behaviour has significant influence for the temperature progress, it will be taken into account in later FDM calculations.

3. DATA

The probes dimension in all cases is $21 \times 21 \times 5\text{mm}^3$. The material is CrNi-steel with the properties: $\lambda = 16.2 \text{ W/m/K}$, $\rho = 8000 \text{ kg/m}^3$, $c_p = 500 \text{ J/kg/K}$.

The defect has a size of $6.7 \times 3\text{mm}$ and is an inclusion of air. It is in a depth of 1mm below the surface, and it is open at the back side of the probe.

Practical data have been acquired with a thermal camera at time intervals of approximately 100ms in the midwave range ($3.6\text{-}5\mu\text{m}$). Since temperature values are provided with a time stamp, the time for one captured temperature is known with an accuracy of 40ms . The Cameras resolution is 0.1°C . To suppress noise and non uniformities the average value of 400 pixels, each representing an area of approximately 0.5mm^2 is taken for each value shown in diagrams with practical data.

3.1 Algebraic calculation

Calculations were done with material properties for CrNi-steel: $\lambda = 16.2 \text{ W/m/K}$, $\rho = 8000 \text{ kg/m}^3$, $c_p = 500 \text{ J/kg/K}$ and an emission coefficient $\varepsilon = 0.95$ of the probes surface. Normally the emission coefficient for CrNi-steel would be 0.4 in the midwave range of light, but the probes surface has been painted with graphite to rise the emission coefficient. The absorption coefficient for exposure (300-2000nm) is not known and will be assumed to be 0.95.

For a defect in a depth of 1mm a reaction time of 62ms is the result (Equation 2.2). In other words: it is expected, that there will be a temperature difference between a probe with and without defect in 1mm depth of more than "measureable" 0.1°C short behind these 62ms. The value of 0.1°C have been chosen based on our own experience. It is the same value as Mr. Vavilovs "noise constant of the world"^[4].

As heat source we used a Xenon lamp with an electrical Power of 300W and 60W of light flux. To bring a maximum of Power into the probes surface, a parabolic reflector is used. In a distance lamp-probe of 250mm, there is an effective radiant incidence E of 16kW/m^2 on the probes surface.

3.2 Simulation with FDM

The probe of CrNi-steel is divided into $50\mu\text{m}$ thick layers. To be stable, Δt has to be smaller or equal to $34\mu\text{s}$ (Equation 2.6). Calculations were done with Matlab[®] by a user written program, according to the described method (Chapters 2.3 and 2.4). The results will be taken for a comparison between algebraic and FDM, and to show the influence of a "slow" energy source.

4. RESULTS

4.1 Suppression of reflected light from the source

If reflected radiation influences surface temperature measurement, the temperature progress would show a discontinuity at $t=0$ (when exposure starts) and also at a later time, when exposure is stopped. Absence of this discontinuity is a clear sign, that there is no significant influence of the sources reflection into the camera. In none of the practical tests such a discontinuity occurred. So it is assumed, that there is no significant influence of the source and radiation into camera is caused by the surface temperature of the probe and the surrounding temperature only.

4.2 Optimization of FDM

To check if optimization works correctly we compared its results to the results of equation 2.7 at 50ms and 100ms after exposure start. To get larger differences (to show the effect more clearly), the probe is divided into 4 larger elements, each of 1mm thickness.

^{*} Matlab is a registered trademark of Math Works, Inc.

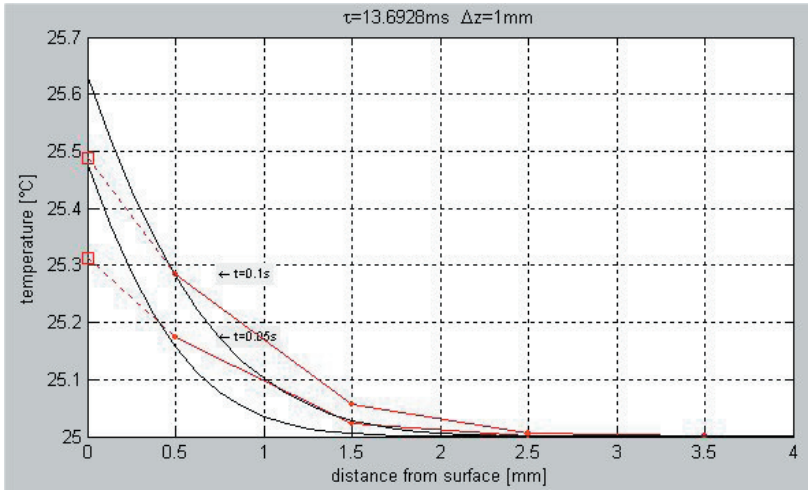


Figure 4: spatial temperature distribution with FDM and algebraic calculation

The squares in figure 4 at $z=0$ are the extrapolated values and the dots the FDM calculated ones. The solid lines are the result of equation 2.7. Without optimization the temperatures at $z=0.5\text{mm}$ would act as surface temperature which is well below the real value. The optimized surface temperature is far closer to the real surface temperature, even if it does not reach it for 100%.

With $\Delta z=50\mu\text{m}$ the FDM's result for a 4mm thick probe is sufficient close to the result of equation 2.1 for exposure times smaller than 1s, which is the expected reaction time (equation 2.2). The deviation, starting at 1s (figure 5) is caused by the finite thickness of the probe for FDM calculation and the assumption for equation 2.1, that the probe is semi-infinite.

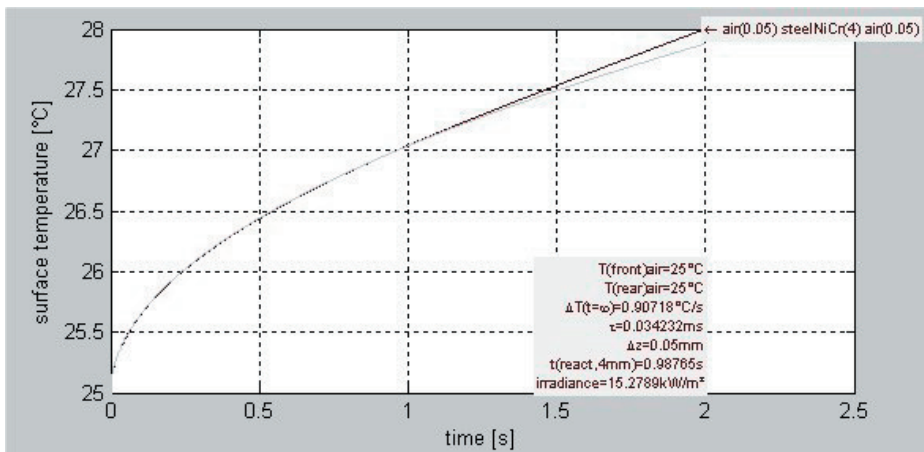


Figure 5: temperature progress with FDM and algebraic calculation

4.3 FDM and practical data

Figure 6 shows practical data for a probe with a thickness of 4mm (marked with “+”) and for an inclusion in a depth of 1mm (marked with dots). Further the solid lines show the result of FDM simulation with 1 and 4mm thickness of steel. The grey line is the algebraic result for the semi-infinite probe.

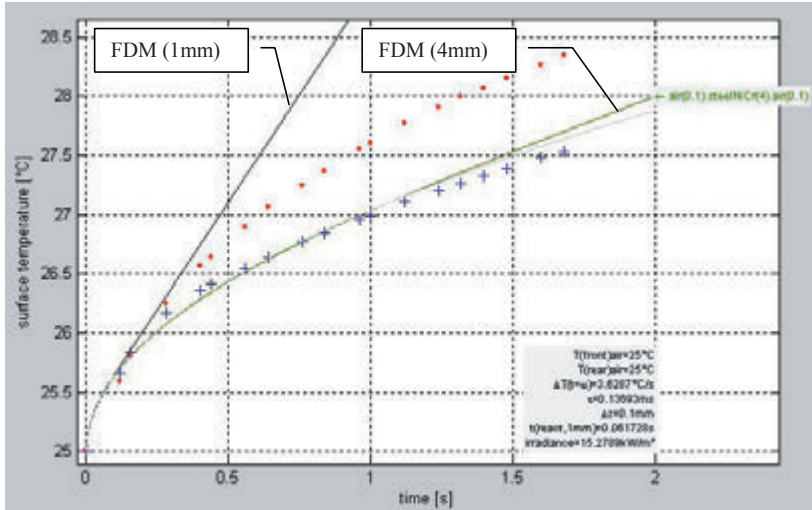


Figure 6: measured data and FDM-simulation

At the beginning of the heat up process, measured data seems to rise a little slower (or later) than simulated ones. The reason for this was found to be caused by the slow start up of the light source.

4.4 FDM and practical data with slow source

Considering that the energy source starts up slowly, the temperature-progress changes significantly. To emphasize this effect, figure 7 shows only the first half second. The dotted line is a FDM simulation with the energy is being assumed to be constant for all times larger than 0. The solid line is the result of simulation with a rising energy for the first 0.1s, and constant for times larger than 0.1s. It can be seen easily, that there is a large difference in the first 0.1s. For later times the difference could be interpreted as a displacement along the time axis.

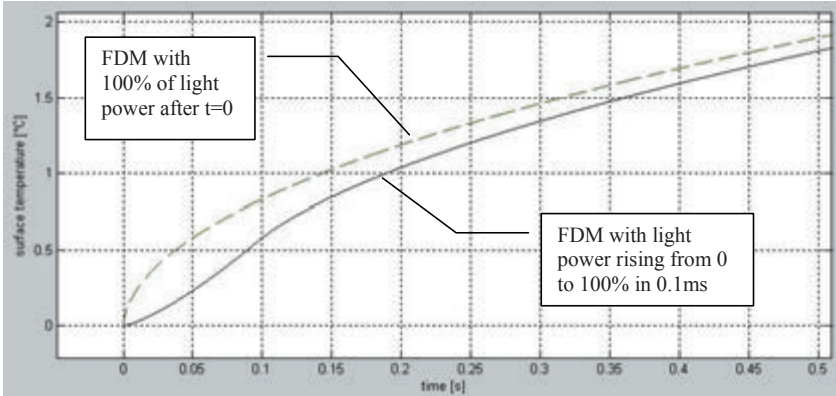


Figure 7: influence of slow start up of energy source

Since the reaction time for the inclusion in a depth of 1mm is 62ms (Equation 2.2), the temperatures of the probe with the void are higher at times later than 62ms (figure 8). At 1s after exposure start there could be measured a temperature difference of 0.6°C which is well enough for a secure detection of inclusions, that are located in 1mm depth.

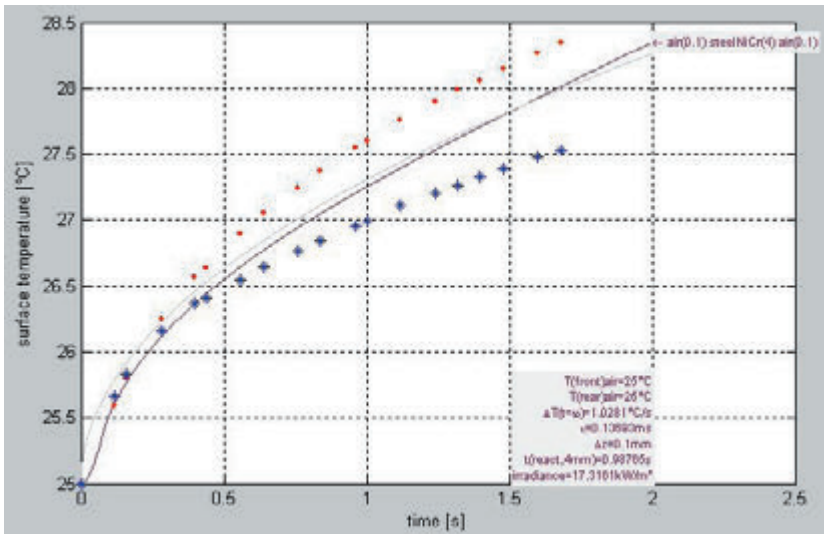


Figure 8: measured data and FDM with slow start up of energy source

- Legend: dots... "void in 1mm depth"
- stars... "probe with 4mm thickness"
- line (marked)... "FDM simulation for steel with 4mm thickness"
- line ... "algebraic calculation for a semi-infinite probe"

Measured data and FDM simulated ones, both for a probe thickness of 4mm should be equal for all times, which is not true in figure 8 for times later than 0.5s. This is caused by flow of heat not only along one dimension, as assumed for the FDM simulation. Since the exposed area is finite (approx. 10mm) and the distribution is not uniform, a lateral flow must happen.

5. CONCLUSIONS

The example (CrNi-steel, inclusion in 1mm depth) used for demonstration in this paper appears to be feasible even with the low power energy source. Since the probe has been heated up for the test just 3°C which is well below the temperature that possible without damaging the probe, temperature difference could be raised to much higher values by using more power for the heat source. So also defects deeper than 1mm should be easily found by SPM.

Theoretical results are not only helpful to find design parameters, they also opens the chance for optimization. By comparing theory and measurement, the reason for some effects can be found and – may be used for optimizing the test system. So the influence of the slow starting up energy source is small in the example shown. This could be an optimization of financial cost for the source.

REFERENCES

- [1] Gerald C. Holst, Common sense approach to thermal imaging, SPIE Optical Engineering Press, Washington / USA
- [2] H. S. Carslaw, Conduction of heat in solids, second edition, Oxford University Press / UK
- [3] M. Necati Özisik, Boundary value problems of heat conduction, Dover Publications, Mineola / NY
- [4] Vladimir Vavilov, Evaluating the efficiency of data processing algorithms in transient thermal NDT, Thermosense XXVI, SPIE Vol. 5405, Appendix Law #3

Mjeriteljski elementi u termografiji ukopanih objekata

Metrology elements in buried object thermography

dr.sc. Josip Stepanić^{2,*}, Prof. dr.sc. Srećko Švaić¹, Prof. dr.sc. Vjera Krstelj²,
doc. dr.sc. Ivanka Boras¹, mr.sc. Marina Malinovec Puček¹

¹Zavod za termodinamiku, toplinsku i procesnu tehniku
Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu,
I. Lučića 5, Zagreb; tel.: 6168 222, fax: 6156 940,
srecko.svaic@fsb.hr, ivanka.boras@fsb.hr, marina.malinovec@fsb.hr

²Zavod za kvalitetu,
Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu,
I. Lučića 1, Zagreb; tel.: 6168 497, fax: 6157 129,
vjera.krstelj@fsb.hr, josip.j.stepanic@fsb.hr

SAŽETAK

Detekcija ukopanih objekata primjenom termografije za primjenu u humanitarnom razminiranju temelji se na raspoznavanju oblika. Pravilni – pravokutni ili kružni – poprečni presjek ukopanih mina pritom treba razlikovati od nepravilnih poprečnih presjeka prirodnih objekata, na termogramima površine tla. Termogrami su u pravilu obilježeni velikim termalnim šumom zbog čega je svojstvo pravilnosti statistički pojam. U ovom radu pristupamo definiranju pravilnosti otiska poprečnog presjeka ukopanog objekta na termogramu putem kvantitativnog analiziranja odstupanja snimljenog presjeka od predviđenog.

KLJUČNE RIJEČI

termografija, mjeriteljstvo, detekcija, humanitarno razminiranje

ABSTRACT

Buried object detection using thermography for applications in humanitarian demining is based on the shape recognition. Regular – rectangular or circular – cross sections of buried mines are to be differentiated from irregular cross sections of natural objects, all in thermograms of surfaces. Thermograms are regularly characterised with an excessive thermal noise which causes regularity to be a statistical category. In this paper, we contribute to defining regularity of a buried object signature on a thermogram by quantitatively analyse the deviations between recorded and predicted shapes.

KEY WORDS

thermography, metrology, detection, humanitarian demining

INTRODUCTION

Infrared thermography (IR) is a non-contact, non-destructive testing, presumably performed in the field in real-time conditions. Its raw data is a thermogram of some area, which should contain a distinctively extractable signature of a sub-surface pattern, e.g. an indication of a failure. Non-contactedness, non-destructiveness and, on average rapid, evaluation of data make IR a prospective candidate for exploitation in mine detection within humanitarian demining [1, 2]. However, in practice, IR is in humanitarian demining exploited only exceptionally, because other characteristics of IR drastically suppresses its possibility to make possible reliable detecting of buried objects, presumably buried mines. These characteristics are a diffusive character of heat conduction which underlies surface thermogram and sensitivity to variations in composition and structure of recorded area [3].

The observed importance of suppressing elements of IR in a particular field of its application could be expected in diverse fields, which generally makes that problem a significant one in broadening the scope of IR applications.

In order to try to overcome encountered problems, we concentrated on the set of derivatives of measures related to thermograms, which contains reliable, extractable information content about the buried objects. On the one hand it could be generally expected that such a set is not abundant information source, but on the other hand the establishing of its precise information content has a value of its own. In particular, we started the set formulation with introducing metrology content in the derivations of thermograms, i.e. into algorithms for thermogram processing.

In this paper we present a formulation of a quantitative measure of a buried object regularity, which is metrologically founded and which can be used in further, more elaborate thermogram processing analyses.

In the second section the important characteristics of IR applications in buried object detection for humanitarian demining are described, along with the model experiment performed during researches. The measure attributed to thermograms is introduced in the third section. The paper ends with the conclusions and projections of future work in the fourth section.

BURIED OBJECT DETECTION USING THERMOGRAPHY

Humanitarian demining is a process for transforming mine affected regions into regions safe for local population in their regular activities. Its part responsible for the majority of duration and risks accompanied with the humanitarian demining is mine detection. Currently, it is performed using metal detection, hand probing, using trained dogs. Additionally, demining is performed using machine clearing. The established average demining rate is generally considered as un-sufficient, which has motivated research and development of other approaches to mine detection. Within that group falls the infrared thermography, both in the active and passive working mode.

Substantially, in IR based buried object detection one uses thermograms of the portion of soil in which heat exchange takes place. The thermal characteristics of the soil and the objects buried in it generally differ, thus one expects to see the buried objects signatures on the recorded thermograms as transient heat sources or sinks. That is exploited both in the active and passive mode. Active mode has potentially broader applicability regarding climatic conditions, while passive mode is economically more suitable in cases in which climate conditions favours it. The precise history of thermal flows in the recorded area is generally not known, thus buried object of interest – presumably buried mines – are to be extracted solely because of their regular cross section, circular or rectangular. Despite the fact that there

are documented cases in which the projection of mine cross section on the buried soil surface is not regular in the described sense, one expects that the quantity of mines which could be detected in that way is large enough to make the related detection technique applicable.

There are different experiments conducted in order to establish clear limits of the applicability of IR in buried mine detection, which are nevertheless as a rule restricted to mines in homogeneous soils with homogeneous surfaces, i.e. vegetationless, flat sand surfaces. In order to obtain full information and understanding of underlying heat flows, combination of experiments and numerical simulations is needed [4].

EXPERIMENT

The experimental group at the Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture – University of Zagreb, has performed within the Laboratory for Applied Thermodynamics several groups of experiments regarding the applicability of IR in buried object detection. In order to make possible repeatability of experiments, the model soil and model buried objects were used in the active IR configuration.

Typical experimental set-up is shown in Fig. 1a, and typical specimens to be detected in Fig. 1b. Set-up is aligned with the active-IR configuration in which heating was applied for a finite time interval, includes the thermocamera for recording of surface thermograms during the cooling phase and additional PC-controlled temperature sensors for independent check of some details of the model. Specimens were of regular geometry in order to simplify interpretation of the results obtained. In the first set of measurements they were buried so that their bases were parallel to sand surface, which was parallel to the heater surface.

a)



b)



Fig. 1. a) Experimental set-up, b) typical specimens used.

In case of five specimens buried in a dense linear configuration, typical thermogram obtained is shown in Fig 2a, and corresponding temperature records in Fig 2b. Thermogram in Fig 2a was recorded after 120 s of cooling. During previous, heating phase, heat flux of 12 kW was applied during 600 s. Temperature of some characteristic points on the specimens and in the treated sand volume follow the same shape – rise during heating, intense cooling with preservation of initial temperature difference afterwards, with ending phase in which there are several changes in the sequence of measured point temperatures. Characteristic points were soil surface (graph P in Fig. 2b), and upper and lower surfaces of two specimens (graphs with G, and with D, respectively, in Fig 2b). Graphs for upper surface temperatures practically coincide.

Additionally, in the second set of experiments the specimens and soil surface were purposefully given some relative slope. The slope resulted in disturbed cross sections on thermograms belonging to the specimens, thus weakened reliance on the shape regularity

based buried object detection. The exploited configuration enables researchers to put the limits on the applicability of the shape regularity based detection.

In particular, that limits have required the development of a new concept, the quantitatively expressed regularity of the signature of buried object on thermograms.

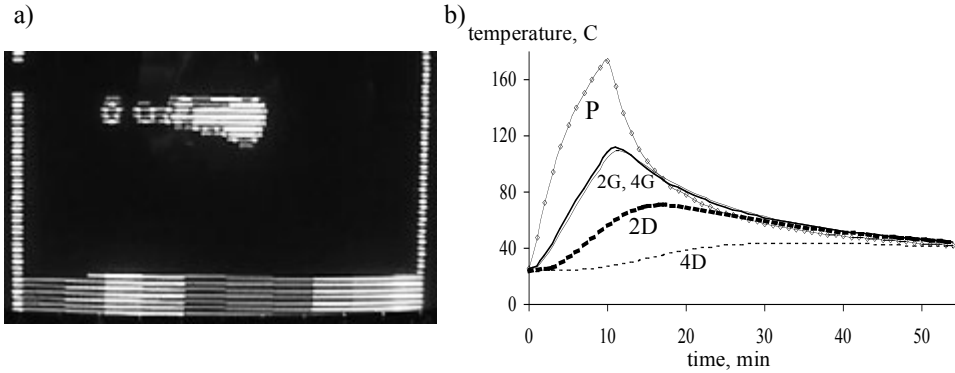


Fig. 2. Typical experimentally obtained a) thermogram, b) temperature evolution, for buried objects.

MEASURE

Fundamental relation between the recorded area and its subsurface content analysis is through regularity of buried object recorded cross section. It is either circular or rectangular, for a majority of buried mines in suitable orientations. The measure attributed to the patterns on the thermograms, to be associated with the buried objects, therefore, has to express quantitatively and reliably that regularity.

In order to be robust enough, the measure should suppress the influence of the non-homogeneities, like is presence of vegetation and variations in soil structure. That is taken into account through global character of the measure. Originally, the operationally efficient measure was defined previously. That application is, however, a numerically suitable reduction of the general form, shown in the following expression for objects of circular cross section:

$$b^{(n)} = \frac{2\pi}{(\bar{r}^{(n)})^2} \int_0^{2\pi} [r^{(n)}(\alpha) - \bar{r}^{(n)}]^2 \frac{d\alpha}{2\pi}, \tag{1}$$

with

$$\bar{r}^{(n)} = \int_0^{2\pi} r^{(n)}(\alpha) \frac{d\alpha}{2\pi}, \tag{2}$$

In (1) b is the boundary roundness, and angle α governs the crossing of full boundary of the indication in the thermogram in the adapted polar diagram, as described by the function $r(\alpha)$. Additional superscript n takes into account that because of finite thermal resolution there are usually several closed curves, isotherms, attributable to boundary of signature of a buried object. The measure (1) exploits the fact that finite thermal resolution makes the boundary a solid object. The form of (1) emphasises deviance of a shape from circular form. Apparently, b depends on object's signature radius, and thus on the depth. However, that influence is separated from influence of objects' orientations. That measure combines structure and dynamics. Structure represents regular geometry as projected onto thermogram through

diffused cross section. Dynamics is included through the fact that observed structures in thermograms are transients caused by transient heat fluxes. Because (1) is determinable for every signature in the thermogram, it can be determined in every moment. That brings about its global-in-time character, which is combined with its local-in-time character as manifested in (1). The boundary roundness has been shown useful in quantifying deviations of a regular, round shape, of buried objects, as well as showing the statistical significance of that deviation.

CONCLUSIONS AND PROJECTIONS OF FUTURE WORK

In order to fully develop potential of the quantitative measures for shape regularity in analyses of thermograms, it is useful to conduct numerical simulations of heat transfer corresponding to diverse possible active IR experiments. The results of the simulations, the time dependent temperature field of the surface, is used in order to determine the boundary roundness b . Extensive simulations could bring about the clear regions of applicability of shape regularity based buried object detection.

Boundary roundness as defined in (1) is formally applicable only for circular objects the symmetry axis of which are appropriately aligned with characteristic axes of the soil surface and heating equipment. However, its generalisation for objects of other regular shapes is straightforward. Nevertheless, some predicted, thus in practice a regular shape, is needed in order to set a reference shape for calculating deviations, and formally to determine proper generalisation of \bar{r} in (1). Because of that, it is not known whether the stated approach could be useful in IR applications in which subsurface indications of generally unknown shape are to be detected, like in majority of conventional non-destructive testing applications.

ACKNOWLEDGMENT

This work has been financed by Croatian Ministry of Science, Education and Sport, through contracts No. 0120038 and 0120046.

REFERENCES

1. Kingsbury, N., Land Mine Detection DOD's Research Program Needs a Comprehensive Evaluation Strategy, US GAO Report, GAO-01 239, 2001,
2. Georgson, M. et al., Mine Detection Using Infrared Imaging Technique, International Conference MINE'99, Firenze, Proceedings, 1999, pp. 66-71,
3. Stepanić, J., Malinovec, M., Švaić, S. and Krstelj, V., Parameterisation of non-homogeneities in buried object detection by means of thermography, *Infrared Physics & Technology* 45, 2004, pp. 201-208,
4. Boras, I. and Švaić, S., Characterisation of subsurface defect by means of thermography and 3D numerical model, SPIE 2001, Orlando, USA, Proceedings, SPIE Vol. 4360, pp. 516 – 523.

PROCJENA PREŽIVLJENJA KOŽNIH REŽNJEVA POMOĆU IR TERMOGRAFIJE

Dražen Shejbal* mr. sc., Petar Drviš* mr. sc., Srećko Švaić** prof. dr. sc.,
Ivanka Boras** doc. dr. sc., Mirela Šušić** dipl. ing., Boris Pegan* prof. dr. sc., Livije
Kalogjera* prof. dr. sc.

* Klinika za otorinolaringologiju i kirurgiju glave i vrata, KB Sestre milosrdnice, Zagreb

** Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb

Adresa: Dražen Shejbal, Klinika za otorinolaringologiju i kirurgiju glave i vrata, KB Sestre
milosrdnice, Zagreb 10 000, Vinogradska ulica 29

Telefon: 091 1 515 929, fax 01 3 768 293

Mail: dr.azen@vip.hr,

SAŽETAK

Kožni režnjevi služe kao nadomjestak manjku tkiva u plastično rekonstruktivnoj kirurgiji. Jedan od ključnih ciljeva rekonstrukcije režnjem je njegovo cjelovito preživljenje, što sam operativni zahvat čini funkcionalno i estetski uspješnim. Djelomično ili potpuno odumiranje režnja najčešći je uzrok neuspjeha ovakovog zahvata. Postoje pripravci i metode koji poboljšavaju postotak preživljenja režnja. Cilj rada bio je ispitati utjecaj lijekova na preživljenje nasumičnih kožnih režnjeva. Nasumični kožni režnjevi odignuti su na leđima štakora, potom šavima vraćeni nazad u ishodišno ležište preko gel foam trake natopljene mitomicinom, kapsaicinom, metilprednizolonom i BPC 157 pentadekapeptidom. Životnje su podijeljene u četiri eksperimentalne skupine, a u kontrolnoj, petoj, korištena je 0,9% fiziološka otopina. Procjena preživljenja vršena je termokamerom. Statistički značajno preživljenje ($p < 0.05$) postignuto je u metilprednizolon i BPC 157 skupini. Metilprednizolon i pentadekapeptid BPC 157 korišteni jednokratno lokalno statistički značajno poboljšavaju preživljenje nasumičnih kožnih režnjeva. IR termografija izvrsna je metoda u procjeni vitaliteta kožnog režnja.

UVOD

Upotreba termokamere u kliničkoj i eksperimentalnoj medicini

Upotreba termokamere u medicini doživjela je svoj najveći uspon sedemdesetih godina prošlog stoljeća kada se termografijom služilo u dijagnostici tumorskih bolesti dojke, apscesa mekih tkiva, krvožilne insuficijencije okrajina i u nekih reumatskih bolesti [1]. Potom termokamera kao dijagnostičko sredstvo pada u zaborav. Poboljšanjem razlučivosti termokamere, uvođenjem dinamičke termografije i usavršavanjem računalnih programa termokamera danas ponovno postaje dijagnostičko sredstvo kod procjene debljine eshare opekotina [2], prohodnosti krvnih žila u kardiokirurgiji [3], lociranje perforatornih krvnih žila u plastično rekonstruktivnih režnjeva [4], procjeni vitaliteta desni u stomatologiji [5], sindroma naprezanja u sportskoj medicini [6], procjeni vitaliteta režnjeva u rekonstruktivnoj kirurgiji [7,8] i kao dijagnostičko sredstvo u nistagmologiji [9,10]. Bitna razlika naspram prvog zlatnog doba je da termokamera današnjim eksperimentalnim radovima prestaje biti samo jednodimenzionalna metoda oslikavanja

temperature ljudske kože, već kombinacijom višesmjernog vektorskog snimanja, dinamičke termografije i složene računalne obrade uspjeva slojevno locirati procese u tkivu. Razvija se i metodologija koja kombinira mjerenje otpora tkiva i termografsko snimanje za dijagnostiku tumorskih bolesti dojke [11,12,13]. Termografija je također zahvalna metoda u ispitivanju odnosa živog tkiva i nežive tvari, što nalazi svoju upotrebu kod umjetnih usadaka [14]. Danas nema sigurne i standardizirane metode za dijagnostiku vitalnosti plastično rekonstruktivnih režnjeva. Koristi se fotopletizmografija zelenog svijetla (mjeri se spektar isijavanja hemoglobina eritrocita), laser Doppler mjerenje protoka kroz krve žile, puls oksimetrija, PH metrija i termografija. Sve su metode neetablirane, i praktički najupotrebljavanija je iskustvena metoda: ispekcijom, dakle gledanjem [15,16]. Termografija u eksperimentalnoj medicini izvrsna je metoda procjene i kvantificiranja razlučivosti živog naspram neživog tkiva, ishemijskih promjena, utjecaja implanata i vanjskih energetskih umjetnih izvora na promjene temperature tkiva, te procjene utjecaja toplinskih i laserskih kirurških instrumenata na tkivo [17, 18].

Preživljenje kožnih režnjeva u plastičnorekonstruktivnoj kirurgiji

Režanj je dio tkiva odstranjen iz svog prirodnog anatomskog okružja i preseljen na drugi dio tijela. Pri tom može imati vezu s svojim primarnim anatomskim sijelom, kroz koji dobiva prehranu ili se može sasvim odvojiti te ponovno presaditi u novu anatomsku lokaciju. Ukoliko ostane vezan za anatomsko ishodište, može se planirano uzeti režanj s žilom hranilicom, što podrazumjeva dobro poznavanje anatomskih odnosa ili prethodno prepoznavanje toka žile hranilice navedenog područja. Režanj se može uzeti i nasumično, tada računamo na prehranu iz hvatišta za anatomsko ishodište te na prehranu difuzijom i preko naknadno uraslih kapilara u anatomskom ležištu. Nasumični režanj je dakle manje idealan no lakše dostupan i tehnički izvodiv, te stoga široko upotrebljavan u plastično rekonstruktivnoj kirurgiji. Odumiranje, gubitak vitalnosti režnja, najčešći je razlog neuspjeha kod kirurških zahvata s upotrebom režnja.

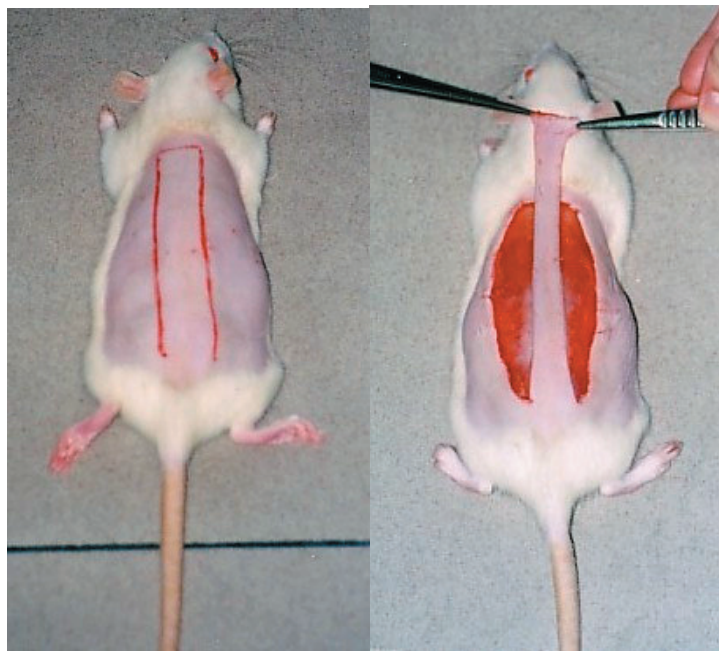
Danas se istražuje upotreba više raznih metoda i lijekova u poboljšanju preživljenja nasumičnog režnja. Kapsaicin je spoj koji se normalno nalazi u ekstraktu chili paprike i daje mu ljutinu. Ima višestruk utjecaj na tkivo na koje se primjeni lokalno, uglavnom preko smanjenja koncentracije neuropeptida odgovornih za senzornealno provođenje i utjecaj na lokalne faktore rasta. Utjecaj na preživljenje režnjeva je po dosadašnjim studijama kontroverzan, a termokamera nije korištena u procjeni preživljenja režnja [18,19,20,21].

Metilprednizolon je kortikosteroid, spada u grupu lijekova široko korištenih u medicini u svim pripravnim oblicima. Na tkivo djeluje preko kortikosteroidnih receptora, utjecajem na upalne medijatore i oslobađanje faktora rasta. Začudno je malo eksperimentalnih radova o utjecaju kortikosteroida na preživljenje režnjeva [22].

Mitomycin je je spoj koji ima antifibrotičko djelovanje, sprečava prekomjerno ožiljavanje tkiva, a pentadekapetid BPC-157 novije je izoliran spoj iz sluznice želuca s višestrukim djelovanjem na poboljšano cijeljenje tkiva. Eksperimenti s ta dva spoja i preživljenjem režnjeva nisu rađeni [23,24,25].

METODE

Po dozvoli etičkog komiteta 50 ženki Wistar štakora težine 200 do 250 g svrstano je u pet skupina, 4 eksperimentalne i jednu kontrolnu. Svim štakorima obrijana su leđa, gdje se odignuo kožni režanj, dužine 10 cm a širine pripoja baze 2 cm (Ilustracija 1).

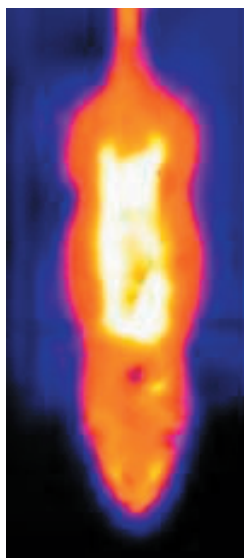


Ilustracija 1. iscrtavanje i odizanje kožnog nasumičnog reznja štakora

Između kože reznja i mišićja leđa umetnula se gelatinozna traka (Gel foam) natopljena s 0,9 % fiziološkom otopinom u kontrolnoj skupini, a s metilprednizolonom (30 mg/kg), kapsaicinom (2%), mitomicinom (0,2 mg/ml) i pentadekapeptidom BPC 157 (0,2 mcg) u eksperimentalnim skupinama. Rezanj je potom sašiven na prvotnu anatomsku poziciju. Mjerila se dužina preživljenog reznja 7 dana po odizanju. Procjena preživljenja reznja vršena je pomoću ThermoCAM SC2000 (Ilustracija 2, 3.).



Ilustracija 2. mjerenje dužine vitalnosti reznja. Vidi se vitalni (bliže repu) i odmrli (oko 2/3) dio reznja



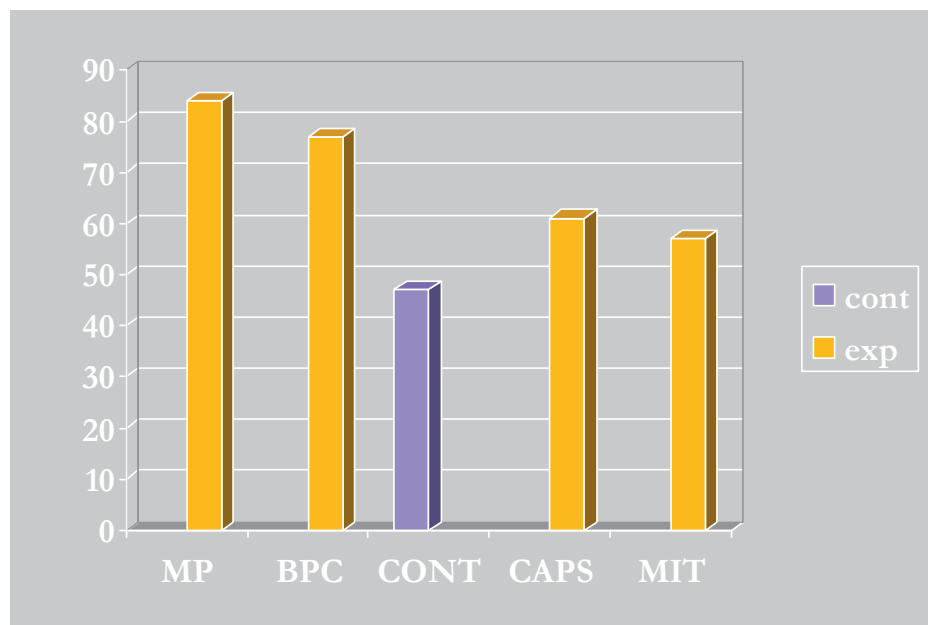
Ilustracija 3. termografska slika reznja

Kompjuterska analiza vitalne površine vršena je s ThermoCAM Researcher 2002, histogramom a kog se isčitavao pad temperature reznja, a ukoliko je granica vitalnosti i nekroze bila nepravilna

histogram se očitavao na pet paralelnih linija, potom je iz njih izračunat prosjek. Statistička analiza vršena je pomoću Mann Whitney testa.

REZULTATI

Režnjevi s lokalno apliciranim metilprednizolonom i BPC-157 pentadekapeptidom imali su statistički značajno veće preživljenje od kontrolne grupe tretirane s fiziološkom otopinom s vrijednošću manjom od 0.05. Lokalna aplikacija kapsaicina i mitomicina nije u preživljenju režnja imala statistički značajne razlike naspram kontrolne skupine (Ilustracija 4.)



Ilustracija 4. preživljenje režnjeva po grupama, u milimetrima. MP: metilprednizolon, BPC: pentadekapeptid BPC-157, CONT: kontrola, CAPS: kapsaicin, MIT: mitomicin, cont: kontrolna skupina, exp: eksperimentalne skupine

RASPRAVA

Upotreba kožnih režnjeva u plastično rekonstruktivnoj kirurgiji zbog povećanih estetskih i funkcionalnih kriterija raste, no nema etabliranih smjernica upotrebe farmakoterapijskih metoda koje bi poboljšavalo njihovo preživljenje. Ovim eksperimentom pokazano je plauzabilno djelovanje metilprednizolona i BPC-157 na preživljenje nasumičnog kožnog režnja, što bi uz daljnju ekperimentalnu doradu otvorilo terapijske opcije i za kliničku primjenu. Termografski model koji je ovdje upotrebljen također pruža smjernice za dalji rad o upotrebi kamere u ocjeni vitaliteta režnja. Moguća klinička implikacija bila bi procjena ugroženosti režnja nekrozom, u slučaju kada se režanj može spasiti dodatnim terapijskim opcijama, a osobito ako bi njegovo propadanje bitno ugrozilo ishod operativnog postupka.

ZAKLJUČAK

Lokalno aplicirani metilprednizolon i pentadekapeptid BPC-157 statistički značajno poboljšavaju preživljenje nasumičnog kožnog režnja leđa štakora. Kapsaicin i mitomicin ne poboljšavaju preživljenje režnja. Termografski prikaz uz dodatnu računalnu obradu uspješan je način prikaza vitaliteta kožnog režnja.

BIBLIOGRAFIJA

1. Heine B., Die Tele-Thermographie in der medizinischer diagnostic. *Labor med*, 3:217, 1978.
2. Kaczmarek M, Nowakowski A, Renkielska A ., Rating burn wounds by dynamic thermography, *Quantitative infrared thermography international conference*, Reims, 2000, str. 376-379
3. Mohr FW, Falk V, Philippi A, autschbach R, Kreiger H, Diegeler A, Dalichau H., Intraoperative assesment of internal mammmary artery bypass graft patency by thermal coronary angiography, *Cardiovasc surg*. 2(6):703-710, 1994.
4. Chijiwa T, Arai K, Miyazaki N, Igota S, Yamamoto N., Making of a facial perforator map by thermography. *Ann Plast Surg*; 44:596-600, 2000.
5. Barnett ML, Gilman RM., Computer based thermal imaging of human gingiva, *J. Periodontol* 60:628-633, 1989.
6. Koprowski R, Wrobel Z, Konik H, Olex D., Diagnosis of the effectiveness of streching exercises by means of the analysis of termovisual images, *Quantitative infrared thermography international conference*, Zagreb, 2002, str. 141-142
7. Bradford CR., Flap monitoring, *Facial pastic surgery*, 1(12): 19-21, 1996.
8. Bulstrode NW, Wilson GR, Inglis MS., No-touch free-flap temperature monitoring, *Br J Plast Surg.*, 55(2):174, 2002.
9. Kitamura K, Ishida T, Kaminaga C, Haga M, Miyata M, Nomoto Y, Suzuki T., Infrared/video ENG recording of positional nystagmus in subjects with peripheral vestibular disease, *Acta Otolaryngol Suppl*, 520 (2):430-3, 1995.
10. Ichijo H, Ichinohe M, Usami S, Shinkawa H., Observation of positional nystagmus with infrared CCD camera, *Acta Otolaryngol Suppl*.520 (2):366-8, 1995.
11. Zavisek M, Drastich A, Sandera J., Quantitative Thermography in Breast Cancer Detection, *Quantitative infrared thermography international conference*, Von Karman institute for fluid dynamics, Bruxelles, 2004.

12. Nowakowski A., Comparison of thermal and electrical tomography in medicine, *Quantitative infrared thermography international conference*, Von Karman institute for fluid dynamics, Bruxelles, 2004.
13. Parisky YR, Sardi A, Hamm R, Hughes K, Esserman L, Rust S, Callahan K., Efficacy of computerized infrared imaging analysis to evaluate mammographically suspicious lesions, *AJR Am J Roentgenol.*180:263-9, 2003.
14. Pau HW, Sievert U, Wild W., Thermography of the skin covering a cochlear implant - temperature as an indicator for blood circulation, *Laryngorhinootologie*, 82(9):615-9, 2003.
15. Cho BC, Shin DP, Byun JS, Park JW, Baik BS., Monitoring flap for buried free tissue transfer: its importance and reliability, *Plast. Reconstr. Surg.* 110:1249-1250, 2002.
16. Futran ND, Stack BC, Hollenbeak C, Scharf JE., Green light photoplethysmography monitoring of free flaps, *Arch otolaryngol head neck surg.* 126:659-662, 2000.
17. Koteles GJ, Benko I, Nemeth G., Use of termography in diagnosis of local radiation injuries. *Health Physics*, 74:264-265., 1998.
18. Eisenbeis W, Marotz J, Schrade JP. Reflection-optical multispectral imaging method for objective determination of burn depth., *Burns*, 25:697-704, 1999.
18. IinumaT,SawadaY. Topical application of capsaicin and flap survival., *Br J Plast Surg* 49:319-20, 1996.
19. Miawaki T, Jackson IT, Bier UC, Andrus L, Williams F, Bradford M., The effect of capsaicin ointment on skin for the survival of a cutaneous flap. *Eur J Plast Surg*, 24:28-30, 2001.
20. Chang CC, Maruyama Y, Inomata K. Increased flap survival after sensory denervation with capsaicin accompanied by delay., *J Reconstr Microsurg*, 6(1):29-33, 1990.
21. Westin M, Heden P. Sensory denervation with capsaicin does not influence the critical ischemia time in rat island flaps. *Scand J Plast Reconstr Surg Hand Surg*, 23:173-6, 1989.
22. Saray A, Can B, Sevin K., Effects of methylprednisolone on the viability of experimental flow-through venous flaps, *J Reconstr Microsurg*, 18:615-22, 2002.
23. Demir T, Turgut B, Akyol N, Ozercan I, Ulas F, Celiker U., Effects of amniotic membrane transplantation and mitomycin C on wound healing in experimental glaucoma surgery, *Ophthalmologica*, 216:438-42, 2002.
24. Rahbar R, Jones DT, Nuss RC, Robertson DW, Kenna MA, McGill TJ, Healy GB. The role of Mitomycin in the prevention and treatment of scar formation in the pediatric aerodigestive tract, *Arch Otolaryngol Head Neck Surg.*, 128: 401-406, 2002.
25. Sikiric P, Seiwerth S, Mise M, Staresinic M, Bedekovic V, Zarkovic N, Borovic S, Gjurasin M, Boban-Blagaic A, Blagaic L, Rucman N, Anic T., Corticosteroid-impairment of healing and gastric pentadecapeptide BPC-157 cream in burned mice, *Burns*, 29: 323-334, 2003.



The Austrian Society for Thermography

The Austrian Society for Thermography was founded in the year 1988. It is non-political, not focussed on profit, and it has the specific aim to be a forum for the exchange of experience as well as for information and further vocational training. All this is offered to those who work in the field of thermography. This aim is reached by national and international contacts as well as by seminars and conferences. The society was brought to the public for the first time in 1990.

Structural Survey of Members

Instruction/Science/Research	10
Energy Suppliers	3
Industrial plants	5
Service Industry	42
Offices/Authorities etc.	3
Manufacturers of IR-Equipment	9
Total	72

Activities

National and International Contacts

Since 1990 8 national and 7 international conferences have been held.

In 1991 the first conference with guests from "next door" countries took place at Großram near Vienna.

In the year 1996 the Austrian Society for Thermography was a founding member of the European umbrella organization named VET.

Further vocational training and quality control

Since 1994 our members have been offered opportunities of further vocational training. First in internal courses and since the year 2000 as a certification following the standard of EN.473, in cooperation with the staff certification expert "Sector Cert".

Further vocational training by workshops

Example: Building thermography

Public relations

Our most important media is the website. 250 hits per month on an average

We are getting increasingly present in search engines.

Specialist articles in quality print media

It's rather difficult to present oneself in ORF, but sometimes we are successful in spite of.....

Informationen:

Österreichische Gesellschaft für Thermografie
Generalsekretariat
Danubiastraße 12 A-3400 Klosterneuburg
0043 / 2243 / 37744 Mobile: 0043 / 676 / 70 88 919
thermografie@aon.at
www.thermografie.co.at

Prezentacija tvrtke VEXVE OY iz Finske



Danfoss

Individualna stambena toplinska podstanica - regulacijske karakteristike višenamjenskog regulatora tip AVTI

Sažetak:

Individualna stambena toplinska podstanica je termotehnički uređaj koji omogućuje potpuno individualiziranje sustava grijanja i pripreme potrošne tople vode («etažno centralno grijanje») u objektima priključenim na sustav daljinskog grijanja ili centralnu kotlovnici. Za krajnjeg korisnika to znači ostvarivanje potpunog komfora te mjerenje ukupno potrošene toplinske energije za grijanje i za pripremu PTV pomoću jednog mjerila toplinske energije (omogućena je i ugradnja vodomjera za mjerenje ukupne potrošnje hladne vode).

Uobičajeno se stambena podstanica priključuje na sekundarnu stranu sustava daljinskog grijanja (preko centralne toplinske podstanice), te takav način priljučka, kao i konstrukcija individualne podstanice, diktiraju zahtjeve na komponente automatske regulacije.

Primarne regulacijske funkcije najviše su vezane uz sustav pripreme PTV (protočna priprema preko pločastog izmjenjivača topline) - održavanje konstantne temperature PTV bez obzira na temperaturni režim rada sustava daljinskog grijanja i održavanje konstantne temperature izmjenjivača topline kad nema potrošnje PTV («prazni hod»). Regulacija polazne temperature u sustavu grijanja vrši se u centralnoj podstanici, dok je u stambenoj podstanici ugrađen regulator diferencijalnog tlaka za sustav grijanja u stanu, čime se omogućavaju idealni radni uvjeti za termostatske radijatorske ventile (koji se brinu za regulaciju temperature svake pojedine prostorije) kao i hidraulička ravnoteža čitavog sustava. Za svaku od ovih navedenih funkcija brine se zasebni regulacijski element, a razvojem višenamjenskog regulatora tip AVTI, sve ove regulacijske funkcije preuzima jedan kompaktni regulator.



Individual Flat Substation - Control Characteristics of a Multifunctional Controller Type AVTI

Summary:

Individual flat substation is thermo technical equipment, which enables total individualization of heating and domestic hot water systems («decentralized systems») in objects connected to district heating systems or to central boiler plant. For the end user it means full comfort as well as measuring of total energy consumption for heating and DHW by means of one heat meter (the construction enables the installation of a flow meter for cold water consumption measuring). Individual flat substation is usually connected to the secondary side of a district heating system (by means of central substation) and this way of connecting, as well as construction of a flat substation itself, sets the demands on the control components in a substation.

Primary control functions are mainly connected to DHW system (DHW is heated instantaneously, by means of a plate heat exchanger) - constant temperature of DHW as well as constant temperature of a heat exchanger when there is no tapping («stand-by»). Heating system flow temperature weather compensation is provided in the central substation. In a flat substation a differential pressure regulator is installed to ensure the ideal working conditions for radiator thermostats in a flat (which are responsible for room temperature control) and to ensure the hydraulic balance in the whole building. One control component for every mentioned control function is being used, but the development of a multifunctional controller type AVTI all the control functions are fulfilled with one compact regulator.





TEMATSKI OKRUGLI STOL

HEP TOPLINARSTVO: GRIJANJE I HLAĐENJE PAROM



HRVATSKI SABOR

Na temelju članka 88. Ustava Republike Hrvatske, donosim

ODLUKU O PROGLAŠENJU ZAKONA O PROIZVODNJI, DISTRIBUCIJI I OPSKRBI TOPLINSKOM ENERGIJOM

Proglašavam Zakon o proizvodnji, distribuciji i opskrbi toplinskom energijom, kojega je Hrvatski sabor donio na sjednici 18. ožujka 2005. godine.

Broj: 01-081-05-1136/2

Zagreb, 23. ožujka 2005.

Predsjednik Republike Hrvatske
Stjepan Mesić, v. r.

ZAKON O PROIZVODNJI, DISTRIBUCIJI I OPSKRBI TOPLINSKOM ENERGIJOM

I. OPĆE ODREDBE

Članak 1.

Ovim se Zakonom uređuje obavljanje energetske djelatnosti proizvodnje, distribucije i opskrbe toplinskom energijom.

Članak 2.

(1) Izrazi koji se koriste u ovom Zakonu imaju značenja utvrđena Zakonom o energiji (»Narodne novine«, br. 68/01. i 177/04.).

(2) U ovom se Zakonu koriste i izrazi koji u smislu ovoga Zakona imaju sljedeća značenja:

1. distribucijsko područje – područje obavljanja djelatnosti u jedinici lokalne samouprave,
2. energetski objekti za distribuciju toplinske energije – objekti i uređaji za prijenos toplinske energije do kupca, od mjernog mjesta za preuzimanje toplinske energije do mjernog mjesta za prodaju toplinske energije (distribucijska mreža, pumpne i toplinske stanice, te mjerila toplinske energije),
3. energetski objekti za proizvodnju toplinske energije – postrojenja za proizvodnju toplinske energije ukupne instalirane snage veće od 0,5 MW,
4. energetski objekti kogeneracije – postrojenja u kojima se istodobno u jedinstvenom procesu proizvodi električna i toplinska energija,
5. opskrba toplinskom energijom – prodaja toplinske energije kupcu,
6. toplinska energija – proizvedena energija namijenjena za zagrijavanje prostora ili u tehnološke svrhe (para, vrela i topla voda),
7. toplinski sustav – tehnički sustav koji se sastoji od postrojenja i uređaja za proizvodnju i distribuciju toplinske energije,
8. zajedničko mjerilo toplinske energije – mjerilo kojim se registrira količina isporučene toplinske energije za dva ili više kupaca spojenih na zajedničku instalaciju centralnog grijanja.

Članak 3.

Izgradnja energetske objekata kogeneracije, njihovo održavanje i korištenje od posebnog je interesa za Republiku Hrvatsku.

II. OBAVLJANJE ENERGETSKIH DJELATNOSTI

Članak 4.

- (1) Proizvodnja toplinske energije za povlaštene kupce i opskrba toplinskom energijom povlaštenih kupaca obavljaju se prema pravilima kojima se uređuju tržišni odnosi.
- (2) Energetske djelatnosti proizvodnja toplinske energije za tarifne kupce i opskrba toplinskom energijom tarifnih kupaca obavljaju se na regulirani način.
- (3) Energetska djelatnost distribucije toplinske energije obavlja se kao javna usluga.

Članak 5.

- (1) Ministarstvo sudjeluje u izradi dokumenata prostornog uređenja koje donosi Hrvatski sabor.
- (2) Ured državne uprave u županiji, odnosno upravno tijelo Grada Zagreba nadležno za poslove energetike sudjeluje u izradi dokumenata prostornog uređenja koje donose predstavnička tijela jedinica lokalne i područne (regionalne) samouprave.
- (3) Nositelj izrade dokumenata prostornog uređenja dužan je o prijedlogu dokumenata prostornog uređenja iz stavka 1. i 2. ovoga članka pribaviti mišljenje Ministarstva, odnosno ureda državne uprave u županiji, odnosno upravnog tijela Grada Zagreba nadležnog za poslove energetike.

Članak 6.

- (1) U postupku izdavanja lokacijske dozvole za građevinu u kojoj se nalazi energetski objekt za proizvodnju toplinske energije, posebne uvjete glede proizvodnje i distribucije toplinske energije utvrđuje ured državne uprave u županiji, odnosno upravno tijelo Grada Zagreba nadležno za poslove energetike.
 - (2) Iznimno od stavka 1. ovoga članka, u postupku u kojem lokacijsku dozvolu izdaje ministarstvo nadležno za prostorno uređenje, posebne uvjete glede proizvodnje i distribucije toplinske energije utvrđuje Ministarstvo.
 - (3) Posebni uvjeti iz stavka 1. i 2. ovoga članka odnose se na:
 - vrstu primarnih energenata koje će objekt koristiti,
 - načine i uvjete proizvodnje i distribucije toplinske energije, te prestanka obavljanja tih djelatnosti.
 - (4) Posebni uvjeti iz stavka 1., 2. i 3. ovoga članka odgovarajuće se primjenjuju i u postupku izdavanja lokacijske dozvole za energetske objekte kogeneracije.
 - (5) Posebni uvjeti iz stavka 1., 2. i 3. ovoga članka utvrđuju se sukladno Zakonu o tržištu električne energije (»Narodne novine«, br. 177/04.).
- A) Proizvodnja toplinske energije

Članak 7.

- (1) Proizvodnju toplinske energije obavlja pravna osoba koja je od Hrvatske energetske regulatorne agencije – HERE (u daljnjem tekstu: Agencija) dobila dozvolu za obavljanje energetske djelatnosti proizvodnje toplinske energije.
- (2) Dozvola nije potrebna za obavljanje energetske djelatnosti proizvodnje toplinske energije koja se proizvodi isključivo za vlastite potrebe ili se proizvodi u proizvodnim objektima snage do 0,5 MW.
- (3) Energetski subjekt proizvodi toplinsku energiju u postrojenjima u svom vlasništvu ili u postrojenjima koje koristi na temelju ugovora zaključenog s vlasnikom postrojenja.

Članak 8.

Tehničke uvjete za energetske objekte za proizvodnju toplinske energije propisuje ministar pravilnikom, uz suglasnost ministra nadležnog za poslove graditeljstva.

Članak 9.

- (1) Izgradnja energetskog objekta kogeneracije ima prednost pri odabiru energetskog rješenja kod donošenja odluke o izgradnji energetskih objekata.
- (2) Energetski subjekt koji koristi energetski objekt kogeneracije i koristi otpad, biorazgradive dijelove otpada ili obnovljive izvore energije za proizvodnju toplinske energije na gospodarski primjeren način, u skladu s mjerama zaštite okoliša, može steći status povlaštenog proizvođača toplinske energije.

- (3) Status povlaštenog proizvođača toplinske energije energetski subjekt iz stavka 2. ovoga članka stječe na temelju rješenja Agencije u skladu s uvjetima koje pravilnikom propisuje ministar.
- (4) Pravilnikom iz stavka 3. ovoga članka određuju se i jamstvo o porijeklu energije za povlaštenog proizvođača toplinske energije, kriteriji učinkovitosti uključujući i utjecaj na okoliš.
- (5) Pravilnikom iz stavka 3. ovoga članka određuje se i povezivanje sa sustavom za prijenos električne energije te distribuciju električne i toplinske energije za kogeneracije.
- (6) Udio povlaštenog proizvođača toplinske energije u energetskom sustavu Republike Hrvatske ovisi o vrsti, snazi i učinkovitosti postrojenja, gorivu, utjecaju na okoliš te o potencijalima postrojenja tijekom nastupajućih godina.
- (7) Parametre iz stavka 6. ovoga članka, izvore i iznos financijske potpore za energetske objekte povlaštenog proizvođača toplinske energije, utvrđuje Vlada Republike Hrvatske.

Članak 10.

- (1) Energetski subjekt koji obavlja energetske djelatnosti proizvodnje toplinske energije može ugovarati prodaju toplinske energije izravno s povlaštenim kupcima.
 - (2) Ugovor iz stavka 1. ovoga članka zaključuje se nakon što ugovorne strane dobiju suglasnost energetskog subjekta koji obavlja energetske djelatnosti distribucije toplinske energije.
 - (3) Stranka kojoj je uskraćena suglasnost iz stavka 2. ovoga članka može izjaviti žalbu Agenciji. Rješenje Agencije je konačno.
- B) Distribucija toplinske energije

Članak 11.

- (1) Jedinica lokalne samouprave, koja na svom distribucijskom području ima energetske objekte za distribuciju toplinske energije, dužna je osigurati trajno obavljanje energetske djelatnosti distribucije toplinske energije.
- (2) Jedinica lokalne samouprave i energetski subjekt za distribuciju toplinske energije dužni su osigurati kvalitetno obavljanje energetske djelatnosti distribucije toplinske energije na načelima održivog razvitka, osigurati održavanje energetskih objekata u stanju funkcionalne sposobnosti i osigurati javnost rada.

Članak 12.

- (1) Energetska djelatnost distribucije toplinske energije obavlja se na temelju koncesije ili na temelju ugovora o obavljanju djelatnosti.
- (2) Koncesijom se može steći pravo obavljanja energetske djelatnosti distribucije toplinske energije te pravo izgradnje energetskih objekata za distribuciju toplinske energije.
- (3) Energetski subjekt obavlja energetske djelatnosti distribucije toplinske energije korištenjem vlastitih energetskih objekata za distribuciju toplinske energije ili energetskih objekata koje koristi na temelju ugovora zaključenog s vlasnikom.
- (4) Sadržaj i razina usluge koju je energetski subjekt dužan pružiti pri obavljanju energetske djelatnosti distribucije toplinske energije ne smije ovisiti o načinima korištenja energetskih objekata za distribuciju toplinske energije iz stavka 3. ovoga članka.

Članak 13.

- (1) Koncesiju za obavljanje energetske djelatnosti distribucije toplinske energije daje predstavničko tijelo ili drugo ovlašteno tijelo jedinice lokalne samouprave nakon provedenoga javnog natječaja.
- (2) Dva ili više predstavničkih tijela, ili drugih ovlaštenih tijela jedinica lokalne samouprave, mogu zajedno provesti natječaj i dati koncesiju za obavljanje energetske djelatnosti distribucije toplinske energije na svom ili dijelovima svog područja.

Članak 14.

Koncesijom za obavljanje energetske djelatnosti distribucije toplinske energije određuje se energetski subjekt koji će kao koncesionar obavljati djelatnost, tehnički i prostorni obuhvat, opseg obavljanja djelatnosti, razdoblje važenja koncesije, te druga pitanja propisana ovim Zakonom.

Članak 15.

- (1) Koncesija za obavljanje energetske djelatnosti distribucije toplinske energije daje se na vrijeme do 30 godina. Koncesijsko razdoblje započinje danom sklapanja ugovora o koncesiji.
- (2) Koncesija se daje nakon provedenoga javnog natječaja koji sadrži:
1. namjenu koncesije (pobliže određivanje djelatnosti koja će se obavljati na temelju koncesije),
 2. područje obavljanja djelatnosti,
 3. vrijeme na koje se koncesija daje. Ako se tijekom koncesije širi područje obavljanja energetske djelatnosti distribucije toplinske energije unutar distribucijskog područja, posebno se označuju rokovi za pojedine faze proširenja područja,
 4. rok u kojem koncesionar mora priključiti kupce na distribucijsku mrežu i započeti s isporukom toplinske energije kupcima, kad je udovoljeno tehničkim i koncesijskim uvjetima,
 5. visinu i način plaćanja naknade za koncesiju,
 6. način određivanja cijene toplinske energije od koncesionara sukladno tarifnom sustavu,
 7. način naplate isporučene toplinske energije od strane koncesionara,
 8. oznaku jamstva za osiguranje financijskih sredstava za obavljanje djelatnosti, a osobito za izgradnju energetskih objekata za distribuciju toplinske energije,
 9. dokaz o posjedovanju dozvole za obavljanje energetske djelatnosti distribucije toplinske energije,
 10. dokaz kojim se može utvrditi poslovni ugled natjecatelja,
 11. mjere zaštite okoliša,
 12. druge obveze koncesionara,
 13. uvjete otkaza ugovora o koncesiji,
 14. rok trajanja natječaja,
 15. podatke o mjestu, vremenu i načinu podizanja ili pregleda natječajne dokumentacije, predaji ponuda i javnom otvaranju ponuda,
 16. udio korištenja povlaštenog proizvođača toplinske energije.
- (3) Predstavničko tijelo, ili drugo ovlašteno tijelo jedinice lokalne samouprave, utvrđuje i provodi natječaj za davanje koncesije te donosi odluku o davanju koncesije.
- (4) Natječaj za davanje koncesije objavljuje se u »Narodnim novinama« i jednim dnevnim novinama koje se uobičajeno prodaju na distribucijskom području za koje se daje koncesija.

Članak 16.

- (1) Odlukom o davanju koncesije određuje se ponuđač koji u potpunosti udovoljava svim uvjetima iz natječaja, a čija je ponuda, na temelju njegovoga poslovnog ugleda, ocjene sposobnosti za ostvarivanje koncesije, cijene i udjela korištenja povlaštenog proizvođača toplinske energije, ocijenjena najpovoljnijom.
- (2) Na temelju odluke iz stavka 1. ovoga članka predstavničko tijelo, ili drugo ovlašteno tijelo jedinice lokalne samouprave, i ponuđač zaključuju ugovor o koncesiji koji sadrži sve elemente iz članka 15. stavka 2. ovoga Zakona.

Članak 17.

Koncesija prestaje:

1. istekom vremena na koje je koncesija dana,
2. prestankom postojanja koncesionara,
3. u slučajevima iz članka 18. stavka 1. točke 2. Zakona o energiji,
4. otkazom ugovora o koncesiji,
5. sporazumom davatelja koncesije i koncesionara.

Članak 18.

Davatelj koncesije može otkazati ugovor o koncesiji ako koncesionar:

1. ne obavlja energetske djelatnosti sukladno odredbama ugovora o koncesiji,
2. ne plati naknadu za koncesiju u roku iz ugovora o koncesiji,
3. nakon isteka razdoblja za koje je izdana dozvola za obavljanje energetske djelatnosti ne dobije novu dozvolu,
4. u slučaju iz članka 18. stavka 1. točke 1. Zakona o energiji.

Članak 19.

- (1) U slučaju da nema ponude, ili niti jedna ponuda ne ispunjava uvjete natječaja iz članka 15. stavka 2. ovoga Zakona, jedinica lokalne samouprave može zaključiti ugovor o obavljanju djelatnosti s energetskim subjektom za obavljanje energetske djelatnosti distribucije toplinske energije ako je isti u većinskom vlasništvu države ili jedinice lokalne samouprave.
- (2) U slučaju da na distribucijskom području ne postoji energetski subjekt iz stavka 1. ovoga članka, jedinica lokalne samouprave dužna ga je osnovati i s njime zaključiti ugovor iz stavka 1. ovoga članka.
- (3) Na sadržaj i prestanak ugovora o obavljanju djelatnosti na odgovarajući se način primjenjuju odredbe članka 16. stavka 2. i članka 17. i 18. ovoga Zakona.
- (4) Ugovor o obavljanju djelatnosti zaključuje se na vrijeme do 15 godina, uz suglasnost Agencije.

Članak 20.

Energetski subjekt koji obavlja energetske djelatnosti distribucije toplinske energije odgovoran je za:

1. razvitak, izgradnju, upravljanje, nadzor, vođenje pogona i održavanje energetskih objekata za distribuciju toplinske energije,
2. izradu planova izgradnje i razvoja toplinskog sustava, usklađenih s planovima i programima jedinice lokalne samouprave,
3. funkcionalnu ispravnost i pouzdanost energetskih objekata za distribuciju toplinske energije,
4. usklađeno djelovanje različitih energetskih objekata za distribuciju toplinske energije,
5. osiguravanje pristupa distribucijskoj mreži za treće osobe na reguliranoj osnovi,
6. ugovaranje toplinske energije prema planu za tekuću godinu, a u skladu s instaliranom snagom kapaciteta,
7. davanje informacija o budućim potrebama za toplinskom energijom te ostalih informacija potrebnih Agenciji,
8. marketing sustava, odnos s kupcima i statističko informiranje o poslovanju.

Članak 21.

Metodologija pravednog rasporeda troškova proizvodnje i distribucije toplinske energije između energetskih subjekata, primjenom odgovarajućih utjecajnih parametara (cijena energetskog goriva i kretanje cijena valuta na tržištu), utvrđuje se Tarifnim sustavom za usluge energetskih djelatnosti proizvodnje, distribucije i opskrbe toplinskom energijom.

Članak 22.

- (1) Energetski subjekt koji obavlja energetske djelatnosti distribucije toplinske energije dužan je omogućiti pristup na distribucijsku mrežu prema općim uvjetima za opskrbu toplinskom energijom.
- (2) Stranka kojoj je odbijen pristup distribucijskoj mreži, ili koja ima prigovor na uvjete pristupa, može u roku od 15 dana od dana odbijanja pristupa izjaviti žalbu odnosno podnijeti prigovor na odobrene uvjete pristupa Agenciji. Rješenje Agencije je konačno.
- (3) Stranka iz stavka 2. ovoga članka može financirati izgradnju izravnog voda koji gradi energetski subjekt za distribuciju toplinske energije uz suglasnost Agencije.

Članak 23.

- (1) Tarifni kupci toplinske energije na zajedničkom mjerilu toplinske energije ne mogu se izdvojiti iz toplinskog sustava bez suglasnosti energetskog subjekta za distribuciju toplinske energije i energetskog subjekta za opskrbu toplinskom energijom.
- (2) Energetski subjekti iz stavka 1. ovoga članka dužni su dati suglasnost tarifnom kupcu ukoliko to dozvoljavaju tehnički uvjeti i ako tarifni kupac pribavi suglasnost svih tarifnih kupaca na zajedničkom mjerilu toplinske energije.
- (3) Energetski subjekti iz stavka 1. ovoga članka dužni su donijeti odluku o davanju suglasnosti za izdavanje iz toplinskog sustava u roku od 60 dana od dana primitka zahtjeva.
- (4) Stranka kojoj nije dana suglasnost iz stavka 1. ovoga članka može u roku od 15 dana od dana uskrate suglasnosti izjaviti žalbu Agenciji. Rješenje Agencije je konačno.

Članak 24.

(1) Vlasnici posebnih dijelova objekta koji predstavljaju samostalnu uporabnu cjelinu u objektu izgrađenom prije stupanja na snagu ovoga Zakona mogu radi racionalnijeg korištenja energije, uz suglasnost energetskog subjekta koji obavlja energetske djelatnosti distribucije toplinske energije, ugraditi uređaje za lokalnu razdiobu isporučene toplinske energije, uređaje za regulaciju odavanja topline i uređaje za mjerenje potrošnje toplinske energije.

(2) Energetski subjekt iz stavka 1. ovoga članka dužan je donijeti odluku o davanju suglasnosti iz stavka 1. ovoga članka u roku od 60 dana od dana primitka zahtjeva.

(3) Stranka kojoj je uskraćena suglasnost iz stavka 1. ovoga članka može izjaviti žalbu Agenciji. Rješenje Agencije je konačno.

(4) Ugradnja uređaja iz stavka 1. ovoga članka te modeli raspodjele i obračuna toplinske energije uređuju se Pravilnikom o načinu raspodjele i obračunu troškova za isporučenu toplinsku energiju kojega donosi ministar.

Članak 25.

(1) Tarifnim sustavom za usluge energetskih djelatnosti proizvodnje, distribucije i opskrbe toplinskom energijom utvrđuje se na jedinstven način za cijelo područje Republike Hrvatske vrsta korisnika s obzirom na ogrjevni medij, razdoblje isporuke, količina i dinamika potrošnje toplinske energije te tarifne stavke za obračun cijene toplinske energije.

(2) Visina tarifnih stavki ovisi o troškovima proizvodnje, distribucije i opskrbe toplinskom energijom distribucijskog područja.

C) Opskrba toplinskom energijom tarifnih kupaca

Članak 26.

(1) Pravo na obavljanje energetske djelatnosti opskrbe toplinskom energijom tarifnih kupaca ima onaj energetski subjekt kojem je dana koncesija za obavljanje energetske djelatnosti distribucije toplinske energije ili koji je zaključio ugovor o obavljanju djelatnosti pod uvjetom da je od Agencije prethodno dobio dozvolu za obavljanje energetske djelatnosti opskrbe toplinskom energijom.

(2) Iznimno od odredbe stavka 1. ovoga članka, energetski subjekt koji obavlja energetske djelatnosti proizvodnje toplinske energije u tehnološkom procesu u kojem nema energetskih objekata za distribuciju toplinske energije, može obavljati energetske djelatnosti opskrbe toplinskom energijom pod uvjetom da je od Agencije dobio dozvolu za obavljanje energetske djelatnosti opskrbe toplinskom energijom.

Članak 27.

(1) Energetski subjekt koji obavlja energetske djelatnosti opskrbe toplinskom energijom jamči kontinuitet i pouzdanost sustava opskrbe toplinskom energijom u dogovoru s energetskim subjektom koji obavlja energetske djelatnosti distribucije toplinske energije.

(2) Energetski subjekt koji obavlja energetske djelatnosti opskrbe toplinskom energijom odgovoran je za osiguranje dovoljne količine i kvalitete toplinske energije za potrebe tarifnih kupaca i osiguranje obavljanja energetske djelatnosti opskrbe toplinskom energijom na svojem području.

Članak 28.

(1) Građevine izgrađene bez građevinske dozvole ili drugoga odgovarajućeg akta na temelju kojega se može graditi građevina ne smiju se priključiti na energetski objekt za distribuciju toplinske energije, kao i građevine za koje je u tijeku postupak građevinske inspekcije koji se odnosi na obustavu građenja ili uklanjanja građevina prema posebnom zakonu.

(2) Odredba stavka 1. ovoga članka ne odnosi se na građevine koje su izgrađene bez građevinske dozvole, ali za koje se prema odredbama posebnog propisa smatra da su izgrađene na temelju građevinske dozvole.

III. POVLAŠTENI KUPAC

Članak 29.

- (1) Povlašteni kupac može slobodno izabrati energetski subjekt za proizvodnju toplinske energije.
- (2) Danom stupanja na snagu ovoga Zakona status povlaštenog kupca stječe kupac koji u kalendarskoj godini ima potrošnju koja odgovara zakupljenoj toplinskoj snazi u vremenu od najmanje 3 700 vršnih sati ili više od 15% ukupno distribuirane pare ili vrele vode na distribucijskom području u prethodnoj kalendarskoj godini.
- (3) Povlašteni kupac ne može izgubiti svoj status u godini u kojoj zadržava potrošnju na temelju koje mu je odobren status povlaštenog kupca.

IV. NADZOR

Članak 30.

- (1) Upravni nadzor nad provedbom ovoga Zakona i propisa donesenih na temelju ovoga Zakona obavlja Ministarstvo.
- (2) Inspeksijski nadzor nad provedbom ovoga Zakona obavljaju Državni inspektorat i drugi nadležni inspektori prema posebnim propisima.

Članak 31.

Ako inspektori Državnog inspektorata, ili drugi nadležni inspektori prema posebnim propisima, pri obavljanju inspeksijskog nadzora utvrde da energetski subjekt ne obavlja energetsku djelatnost, a kupac toplinske energije ne koristi toplinsku energiju u skladu s odredbama ovoga Zakona i propisa donesenih na temelju ovoga Zakona, osim ovlaštenja sukladno općim propisima, imaju ovlaštenje rješenjem:

- narediti otklanjanje utvrđenih nepravilnosti i nedostataka, uz određivanje roka za njihovo otklanjanje,
- zabraniti gradnju proizvodnog objekta ako nije pribavljeno odobrenje za gradnju proizvodnog objekta,
- narediti obustavu daljnje gradnje ili korištenja energetskog objekta, odnosno obustavu opskrbe energijom ili korištenje energije ako se oprema za energetske objekte ne proizvodi, a ti objekti ne grade, ne koriste ili ne održavaju sukladno odobrenju ili potvrđenoj dokumentaciji prema posebnim tehničkim ili drugim propisima, i ako zbog toga postoji neposredna opasnost za stabilnost i sigurnost energetskih objekata, zdravlje ili život ljudi ili sigurnost prometa ili susjednih građevina.

V. KAZNE NE ODREDBE

Članak 32.

- (1) Novčanom kaznom u iznosu od 10.000,00 do 50.000,00 kuna kaznit će se za prekršaj energetski subjekt koji:
 - ugovori prodaju toplinske energije s povlaštenim kupcem bez suglasnosti energetskog subjekta koji obavlja energetsku djelatnost distribucije toplinske energije (članak 10. stavak 2.),
 - obavlja energetsku djelatnost distribucije toplinske energije na području za koje je drugom energetskom subjektu dana koncesija ili s kojim je zaključen ugovor o obavljanju djelatnosti (članak 12. stavak 1.),
 - obavlja energetsku djelatnost distribucije toplinske energije ili energetsku djelatnost opskrbe toplinskom energijom bez koncesije ili ugovora o obavljanju djelatnosti (članak 12. stavak 1. i članak 26. stavak 1.),
 - ne obavlja djelatnost sukladno uvjetima koncesije (članak 15. stavak 2.),
 - ne postupa sukladno odredbi članka 20. stavka 1. ovoga Zakona,
 - utvrdi i razgraniči troškove nastale distribucijom toplinske energije mimo Tarifnog sustava (članak 21.),
 - ne omogućiti pristup na distribucijsku mrežu prema općim uvjetima za opskrbu toplinskom energijom (članak 22. stavak 1.),
 - je stekao pravo na obavljanje energetske djelatnosti distribucije toplinske energije, a nije osigurao obavljanje energetske djelatnosti opskrbe toplinskom energijom (članak 26.),
 - obavlja energetsku djelatnost opskrbe toplinskom energijom bez dozvole Agencije (članak 26. stavak 2.),
 - ne postupa sukladno odredbi članka 27. ovoga Zakona,
 - priključi građevinu na mrežu bez građevinske dozvole ili drugoga odgovarajućeg akta na temelju kojega se može graditi građevina (članak 28. stavak 1.),

- ako ne postupa prema rješenju inspektora (članak 31.),
 - koji ne postupa sukladno odredbi članka 36. stavka 1. i 2. ovoga Zakona.
- (2) Novčanom kaznom u iznosu od 300,00 do 5.000,00 kuna kaznit će se za prekršaj iz stavka 1. ovoga članka i odgovorna osoba energetskog subjekta.
- (3) Uz novčanu kaznu za prekršaj može se energetskom subjektu koji je počinio dva ili više prekršaja iz stavka 1. ovoga članka, ili koji u razdoblju od godine dana ponovi dva ili više puta prekršaj iz stavka 1. ovoga članka, izreći zaštitna mjera zabrane obavljanja energetske djelatnosti u trajanju do godine dana, a odgovornoj osobi energetskog subjekta može se izreći zaštitna mjera zabrane obavljanja istih poslova u trajanju do godine dana.

Članak 33.

- (1) Novčanom kaznom u iznosu od 10.000,00 do 15.000,00 kuna kaznit će se za prekršaj tarifni kupac toplinske energije pravna osoba koji se bez suglasnosti energetskog subjekta za distribuciju toplinske energije izdvojio iz toplinskog sustava (članak 23. stavak 1.).
- (2) Novčanom kaznom u iznosu od 1.000,00 do 2.000,00 kuna kaznit će se za prekršaj tarifni kupac toplinske energije fizička osoba koji se bez suglasnosti energetskog subjekta za distribuciju toplinske energije izdvojio iz toplinskog sustava (članak 23. stavak 1.).

VI. PRIJELAZNE I ZAVRŠNE ODREDBE

Članak 34.

- (1) Energetski subjekti koji na dan stupanja na snagu ovoga Zakona obavljaju energetske djelatnosti distribucije toplinske energije nastavljaju obavljati energetske djelatnosti distribucije toplinske energije i energetske djelatnosti opskrbe toplinskom energijom tarifnih kupaca do zaključivanja ugovora o koncesiji ili ugovora o obavljanju djelatnosti, ali najdulje godinu dana od dana stupanja na snagu ovoga Zakona.
- (2) Ako se energetske djelatnosti iz stavka 1. ovoga članka na dan stupanja na snagu ovoga Zakona obavljaju na temelju koncesije, koncesionar nastavlja obavljati tu djelatnost do isteka roka na koji je dana koncesija i pod uvjetima iz ugovora o koncesiji.

Članak 35.

Izgradnja energetskih objekata započetih prije stupanja na snagu ovoga Zakona nastaviti će se i dovršiti po odredbama zakona prema kojima je pokrenut postupak izgradnje.

Članak 36.

- (1) Priključenje na energetski objekt za distribuciju toplinske energije objekata izgrađenih nakon stupanja na snagu ovoga Zakona izvesti će se na način da svaki posebni dio objekta koji predstavlja samostalnu uporabnu cjelinu ima ugrađen zaseban uređaj za regulaciju protoka toplinske energije i zaseban uređaj za mjerenje potrošnje toplinske energije.
- (2) U roku od dvije godine od dana stupanja na snagu ovoga Zakona energetski subjekt nadležan za distribuciju toplinske energije dužan je o svom trošku ugraditi uređaje za regulaciju protoka toplinske energije i uređaje za mjerenje potrošnje toplinske energije u svim toplinskim stanicama.

Članak 37.

- (1) Ministar će propise iz članka 9. stavka 3. i članka 24. stavka 4. ovoga Zakona donijeti u roku od 6 mjeseci, a propis iz članka 8. u roku od godine dana od dana stupanja na snagu ovoga Zakona.
- (2) Vlada Republike Hrvatske će propis iz članka 9. stavka 7. ovoga Zakona donijeti u roku od godine dana od dana stupanja na snagu ovoga Zakona.

Članak 38.

- (1) Predstavnička tijela, ili druga ovlaštena tijela jedinica lokalne samouprave, dužna su uskladiti svoje akte s ovim Zakonom u roku od godine dana od dana stupanja na snagu ovoga Zakona.
- (2) Akti predstavničkih tijela, ili drugih ovlaštenih tijela jedinica lokalne samouprave, koji nisu usklađeni s odredbama ovoga Zakona, prestaju važiti na dan isteka roka iz stavka 1. ovoga članka.

(3) Članak 6. ovoga Zakona primjenjuje se od dana donošenja razvojnih dokumenata jedinica lokalne i područne (regionalne) samouprave donesenih sukladno Zakonu o energiji.

Članak 39.

Postupci započeti do stupanja na snagu ovoga Zakona dovršit će se prema odredbama Zakona o komunalnom gospodarstvu (»Narodne novine«, br. 36/95., 70/97., 128/99., 57/00., 129/00., 59/01., 26/03. – pročišćeni tekst 82/04., 110/04. i 178/04.).

Članak 40.

Do stupanja na snagu podzakonskih akata iz članka 38. stavka 1. Zakona o energiji (»Narodne novine«, br. 68/01. i 177/04.) i članka 8., članka 9. stavka 3. i 7. i članka 24. stavka 4. ovoga Zakona, primjenjuju se podzakonski akti koji uređuju pitanja energetske djelatnosti proizvodnje, distribucije i opskrbe toplinskom energijom, ako nisu u suprotnosti s odredbama ovoga Zakona.

Članak 41.

Ovaj Zakon stupa na snagu osmoga dana od dana objave u »Narodnim novinama«.

Klasa: 363/02/04-01/02
Zagreb, 18. ožujka 2005.

HRVATSKI SABOR
Predsjednik Hrvatskoga sabora
Vladimir Šeks, v. r.

MREŽE CENTRALNOG GRIJANJA U DANAŠNJE VRIJEME...

U posljednjih 30 godina proizvodnja i primjena toplinske energije učinile su velik korak naprijed u smislu učinkovitosti, prihvatljivosti za okoliš i zaštite resursa. Pri tome su biomasa i geotermalna energija dobili sve veći značaj.

Isto se tako velika promjena dogodila u distribuciji toplinske energije u mrežama daljinskog grijanja koje su se ranije razvodile isključivo u betonskim kanalima. Prije više od 40 godina mreže su počele postupno prelaziti na cijevi od polimernih materijala koje su danas preuzele vodeće mjesto u distribuciji topline u suvremenim toplinarskim sustavima.

U takav se razvoj intenzivno uključila i tvrtka Isoplus Fernwärmetechnik koja je danas vodeća na njemačkom tržištu, a sa svojih pet tvornica u Europi jedan je od vodećih proizvođača cijevi s omotačem od polimernog materijala.

Konstrukcija od čelične cijevi, izolacija od poliuretanske pjene i vanjski omotač od polietilena na dulji se rok pokazala čvrstom. Budući da je ekonomična u nabavi, da ne zahtijeva održavanje tijekom uporabe i da se cijelom trasom može digitalno nadzirati pomoću osjetničkih žica, cijev od polimernih materijala postala je klasikom u distribuciji toplinske energije do temperature 145 °C.

Međutim, razvoj se nastavlja. Za posebno učinkovit prijenos topline pobrinula se tzv. dvostruka cijev, pri čemu su dvije čelične cijevi (za polazni i povratni vod) povezane pjenom u jednom ovalnom omotaču i čime se zbog stvaranja tzv. toplinskog bloka i povoljne raspodjele izolacije postiže smanjenje pogonskih troškova od 20%. U međuvremenu su mnoge bavarske općine postale predvodnice u primjeni te tehnologije budućnosti.

Za manje mreže minitoplana s pogonskim temperaturama do 95 °C na raspolaganju su savitljivi cjevovodi namotani na kolut koji se polažu u rov kao crijevo i spajaju u zgradi. Taj je postupak brz, praktičan i cijenom povoljan. Cijev koja provodi

Polaganje cijevi daljinskog grijanja danas je značajno pojednostavljeno zahvaljujući primjeni suvremenih rješenja



medij je u tom slučaju od umreženog polietilena (PE-X) za grijanje i hlađenje sanitarije. Struktura izolacije je jednaka kao kod cijevi s omotačem od polimernog materijala.

Naravno da projektiranje pojedinih mreža dopušta i miješanje sustava kako bi se osigurali optimalni investicijski i pogonski troškovi. Kod svakog novog projekta preporučuje se ispitati i u cijelosti razmotriti izvor topline i toplinsku mrežu kako bi se došlo do optimalnih rezultata za potrebe kasnijeg rada.

OPTIMIRANA TEHNIKA ZA BOLJE REZULTATE

Sustavi savitljivih cijevi postali su standardnim programom u projektima malih sustava daljinskog grijanja i primjene biomase. Upravo je na tom području vidljiva svijest o potrošnji energije i usmjerenost prema budućnosti. Prema tome, zahtijeva se daljnji razvoj koji drži korak s inovativnom proizvodnjom energije. Isoplus nudi rješenja koja su tržišno opravdana i uvjerljiva.

Vrijednost $\lambda = 0,024 \text{ W/(m K)}$ je naš doprinos !!!

Novi postupak izrade pjene i izmjene u smjesama Isoplusa pružaju još bolju toplinsku izolaciju. Na taj način se optimizira prijenos topline i ostvaraju dodatne uštede u radu. Pri takvim uvjetima svaki se projekt isplati.

Nepromijenjena izolacijska svojstva cijelo vrijeme rada

Kako bi se postigli konstantni rezultati tijekom dugogodišnjeg rada i dugoročno održala trenutačna optimalna vrijednost $\lambda = 0,024 \text{ W/(m K)}$, izolacijski sustav treba stabilizirati. To se postiže tako da se između poliuretanske pjene i vanjskog omotača od polietilena male gustoće polaže folije. Time se sprječava razmjena plinova i preventivno djeluje protiv porasta toplinskih gubitaka zbog starenja. Pri tome se, ovisno o pogonskoj temperaturi, tijekom cijelog vijeka trajanja sustava može prosječno uštedjeti 7%.

Dvije različite folije pri tome služe kao brana protiv prijenosa plinova u poliuretanskoj čeliji.

Područja primjene

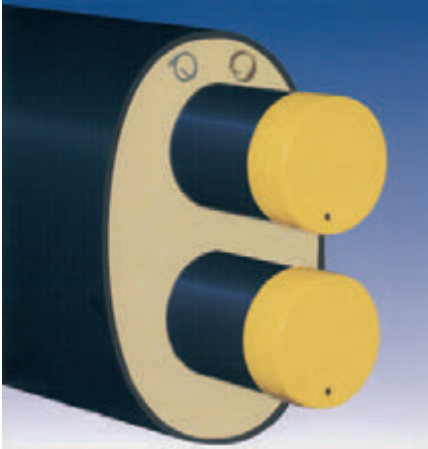
Područja primjene su sljedeća:

- pitka voda
- potrošna topla voda
- bazeni
- postrojenja za biomasu
- mali sustavi daljinskog grijanja i hlađenja
- veliki sustavi daljinskog grijanja i hlađenja
- kućni priključci
- mrežna distribucija.

Izvešće o ispitivanju dobiveno od Istraživačkog instituta za toplinarske sustave u Hannoveru

Cijevi s aluminijskom folijom i difuzijskom branom od polietilena visoke gustoće





tehnologija u kojoj profesionalci uživaju

PREDIZOLIRANE CIJEVI ZA TEMPERATURE DO 149 °C ZA PROMJERE DO DN 20 - DN 1200

PREDIZOLIRANE FLEXIBILNE CIJEVI ZA TEMPERATURE DO 90 °C

SPECIJALNE CIJEVI ZA TEMPERATURE DO 300 °C

PREDIZOLIRANE DUPLJE CIJEVI - ODLAZ I POV RAT U JEDNOM PLAŠTU ZA PROMJERE OD DN 25 - DN 150

ISO 9001

JAMSTVO 5 GODINA

uкажите na svoj problem - mi ćemo vam dati rješenje

ISOPLUS

ime za pouzdanog partnera

REGIONALNI URED ZA HRVATSKU I BOSNU I HERCEGOVINU:

ISOPLUS ZAGREB d.o.o., 10000 ZAGREB, Vrlička 12

tel: 01/ 301 16 34, faks: 01/ 301 16 30

mob: 098 40 66 13

e-mail: tibor.varga@bj.htnet.hr

osoba za kontakt: TIBOR VARGA



isoplus Fernwärmetechnik GmbH
Schwanenstraße 28
D-99706 Sonderhausen
Telefon: 03632/4516-0
Telefax: 03632/4516-99

isoplus Tűzfűtéstechnikai Kft.
Könyvesd u. 45
H-1037 Budapest III.
Telefon: 1-250/4440
Telefax: 1-250/4339

isoplus s.p.a.
Technica s.r.l. s.p.a. s.p.a.
Elettricità Gasstoviglie s.r.l.
CZ-33213 Pederobba 2
Telefon: 042/4534031
Telefax: 042/4843619

isoplus Fernwärmetechnik Ges.m.b.H.
Furhofstraße 1a
A-3192 Hebenberg
Telefon: 02767/8002-0
Telefax: 02767/8002-80



isoplus Romania S.R.L.
Conducte preizolate
3b Uzinei nr. 10
RO-3700 Oradea - Jud.Bihar
Telefon: 059/479-888
Telefax: 059/466-588



TEMATSKI OKRUGLI STOL

**HRVATSKA KOMORA ARHITEKATA
I INŽENJERA U GRADITELJSTVU**

**RAZRED INŽENJERA
STROJARSTVA**



OKRUGLI STOL RAZREDA INŽENJERA STROJARSTVA

u Zagrebu, u okviru Simpozija Interklima 2005.

na Zagrebačkom velesajmu, dvorana Brijuni

PROGRAM OKRUGLOG STOLA

1. Pozdravna riječ organizatora
2. Stanje u HKAIG s osvrtom na Razred inženjera strojarstva
3. Rasprava o problemima inženjera strojarstva na području Grada Zagreba i Zagrebačke županije

STRUČNA TEMA

1. Gospodarenje energije u zgradarstvu (postojeći i novi objekti)
 - 1.1 Europski trendovi (norme; krovna regulativa)
 - 1.2 Domaća stvarnost
(problematika: investicijski trošak jedini kriterij; strukovno učešće pri ugovaranju opreme i usluga; energetska učinkovitost zgrade?)
 - 1.3 Rizici i opasnosti za zgrade i sustave u njima zbog zloupotrebe (terorizam)



**ENERGETIKA
MARKETING**
d.o.o. ZA TEHNIČKE I
POSLOVNE USLUGE

HR-10000 Zagreb, Sokolska 25
tel: 01/377 12 56, faks: 01/377 24 29
e-mail: ege@ege.hr
www.ege.hr



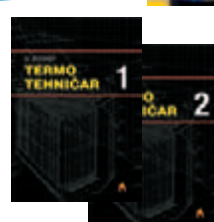
*Najpopularniji
časopis izlazi već
13 godina !*



Posjetite
nas na sajmu
interklima 2005
paviljon: 8
(južni ulaz)



*... tu su i naša
stručna
izdanja ...*



*Pridružite nam
se na ostalim
našim stručnim
skupovima*

**2. HAVATSKI
SEMINAR
O
TLAČNOJ
OPREMI**

Zagreb,
12. svibnja 2005.

**ENERGETSKA I PROCESNA
POSTROJENJA
DUBROVNIK 2006
MEĐUNARODNI FORUM O
OBNOVLJIVIM IZVORIMA ENERGIJE**

ECE

2/2005

ENERGETIKA • GOSPODARSTVO • EKOLOGIJA • ETIKA

ožujak - travanj godina XIII. ISSN 1330-0628 www.ege.hr cijena 70 kn

TANKERSKI PRIJEVOZ • REORGANIZACIJA I PRIVATIZACIJA NAJVEĆE
SVJETSKE ELEKTROPRIVREDE • EKSPLOZIJE I OŠTEĆENJA TLAČNIH
POSUDA • NASTAJANJE I SPRJEČAVANJE ROŠENJA

Danfoss

- 4. PLINARSKI FORUM - ODGOVORI NA PITANJA I ZAKLJUČCI
- AKTUALNI TRENUTAK U PLINSKOM GOSPODARSTVU
- VISOKOTLAČNI PLINSKI SUSTAV RH • SIGURNOST U UPORABI PLINA • STANJE DIMNJAČARSTVA U ZAGREBU
- KLIMATIZACIJA POMOĆU REVERZIBILNE TOPLINSKE CRPKE • INTERKLIMA 2005

do 20%
ušteta
energije

RA 2000 - najsvremeniji
termostatski radijatorski ventil

NOVO !



PODSJETNIK ZA IZVOĐENJE PLINSKIH INSTALACIJA

**Izdanje koje
sprječava
nesreće i
pomaže u
svakodnevno
m radu svima
kojima su plin
i plinske
instalacije
struka. Malog
je formata i
praktično pa
stane u
svačiji džep.**

**izdanje 2005.
124 stranice
format 10 × 21 cm**



Perfect C°mfort



Rezidencija SKIPER, Alberi/Savudrija

Uz DAIKIN klimatizaciju u bilo koje doba dana, jednostavno možete uživati u vašem životu, radu i kupovini u Perfect C°mfort zoni.

Modularni sistem, jedinstvena rješenja. Ovakav način klimatizacije je inovativan, skladan i ekološki prihvatljiv. Proizvod za visoki standard.

Uživajte u svim pogodnostima ovakvih sustava čak i ako ih naknadno ugrađujete. Naš napredak u razvoju klimatizacije – vaša prednost. Projektanti vjeruju u DAIKIN i znaju da je to najbolje rješenje.

DAIKIN AIRCONDITIONING CENTRAL EUROPE
Predstavništvo u Republici Hrvatskoj
Tel. +385 (0) 1 60 65 850, www.daikin-ce.com

DAIKIN
Air Conditioning

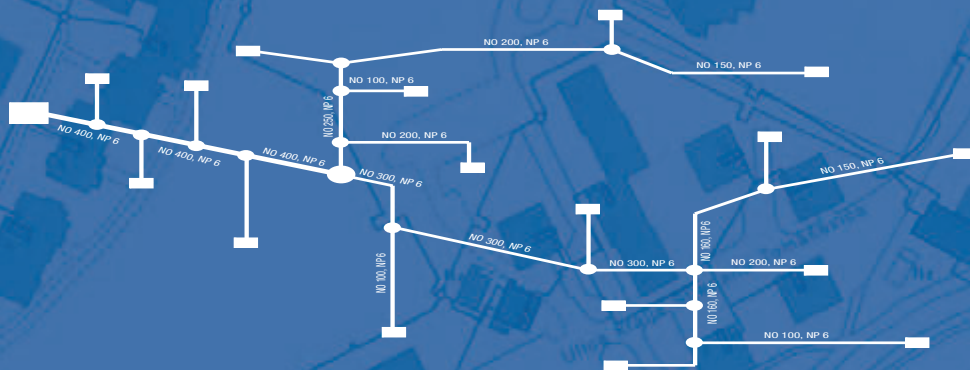


HEP-TOPLINARSTVO d.o.o.

Miševečka 15a, 10000 Zagreb

ČLAN HEP GRUPE

tel: 01/60 09 555, faks: 01/61 31 978



HRVATSKA KOMORA ARHITEKATA I INŽENJERA U GRADITELJSTVU
Razred inženjera strojarstva

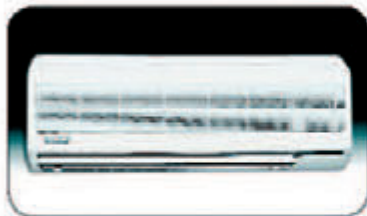
**SVE INFORMACIJE I
NOVOSTI IZ RAZREDA I
KOMORE USKORO NA
NAŠIM INTERNETSKIM
STRANICAMA!**



Trg bana Josipa Jelačića
10000 Zagreb
tel: 01/ 4854 411/108,
01/ 4852 714
faks: 01/ 4855 668
e-mail: strojari@hkaig.hr

www.hkaig.hr

10000 Zagreb
Vrlička 24
Tel: 01/ 384 03 52
Fax: 01/ 384 03 98



YORK INTERNATIONAL korporacija je najveći nezavisni proizvođač opreme za grijanje, ventilaciju, klimatizaciju i hlađenje u SAD i vodeći međunarodni industrijski proizvođač. Kompanija ima oko 23.000 zaposlenih širom svijeta a proizvodi kompanije plasiraju se u više od 100 zemalja.

- **HLADENJE** (komercijalno i industrijsko)
- **KOMPLEKSNI SISTEMI ZA KLIMATIZACIJU**
- **MALI SISTEMI ZA KLIMATIZACIJU** (split sistemi, hidro sistemi, paketne jedinice)
- **SERVIS**



10000 Zagreb, Kastavska 8
tel: 01/ 36 31 040
01/ 36 31 050
faks: 01/ 36 80 437
e-mail: sladovic@zg.htnet.hr

Sladović S
od 1965.

BAŽDARENJE I SERVIS
SIGURNOSNIH VENTILA I ARMATURA



IZVOĐENJE
RAĐOVA



ISPITIVANJA I SERVISI PLINSKIH
INSTALACIJA U BRODU



KONTROLA
PROTUEKSPLOZIJSKIH
VENTILA



TRAŽENJE
KVAROVA I
TRASIRANJE



PRIPREMA I ISPITIVANJE POSUDA POD
TLAKOM I MJERENJE DEBLJINE STIJENKE



ISPITIVANJE
PROTOKA
TEKUĆINA U
CJEVOVODU



PROIZVODNJA



www.sladovic.hr

RC GROUP



KLIMA
ORMARI

RASHLADNI AGREGATI

ITS CONSULTING d.o.o.

www.its-consulting.hr

10000 Zagreb
CMP Savica Šanci 133
Tel: 00385-1/2409-133
Fax: 00385-1/2409-135
its-consulting@zg.hinet.hr



CALMAC
BANKE
LEDA



VENTILOKONVEKTORI

**MITSUBISHI
ELECTRIC**



NAJTIŠI UREĐAJ

TEKSTILNI
KANALI
za distribuciju
zraka



UREĐAJI ZA
KLIMATIZACIJU
isporuka
montaža
održavanje
rezervni dijelovi

ISBN 953-6759-28-4