

KLIMATIZACIJA

Tema:

- POVRAT TOPLINE U GViK SUSTAVIMA

Doc.dr.sc. Igor BALEN

Racionalno gospodarenje energijom – imperativ modernog doba

Ušteda toplinske energije u građevini:

- toplinska izolacija građevine
- izbor energetske i regulacijske sustava građevine
 - izbor ogrijevnog/rashladnog medija (zrak, voda...)
 - korištenje novih tehnologija (kondenzacijska tehnika, frekvencijska regulacija brzine vrtnje, dizalice topline, solarni sustavi...)
 - moderni regulacijski sustavi (DDC...)
- korištenje energije - proizvodnja toplinske/rashladne energije (stupnjevi iskorištenja, COP, kogeneracija...)
 - korištenje povratne topline otpadnih medija (dimni plinovi, zrak, otpadna voda...)
 - akumulacija toplinske/rashladne energije

Povrat toplinske energije iz otpadnih medija – korištenje toplinske energije sadržane u otpadnim medijima, koja bi se inače **neiskorištena** odbacila u okoliš.

Važnost povrata topline:

- smanjenje pogonskih troškova
(ušteta plinskih, kapljevutih i krutih goriva, ušteta električne energije)
- smanjenje učinka i dimenzija opreme; izostavljanje pojedine opreme
(kotao, rashladni agregat, izmjenjivači, ovlaživač)
- **zaštita okoliša**

Povrat toplinske energije

~~DA ili NE~~

KADA? i KAKO?

Tehnički propis o sustavima ventilacije, djelomične klimatizacije i klimatizacije zgrada (NN 03/07) navodi obavezu korištenja sustava povrata topline (SPT) za GViK sustave od 2500 m³/h vanjskog zraka naviše.

Podloge za vrednovanje gospodarske isplativosti sustava povrata topline u Europi

- VDI 2071
- EUROVENT 10
- ASHRAE Standard 84

OSNOVNE ZNAČAJKE:

- stupanj povrata topline Φ - povrat osjetne topline
- stupanj povrata vlage Ψ - povrat latentne topline
- pad tlaka Δp

MODERNI SPT:

- serijska proizvodnja
- direktna ugradnja u GViK sustave
- nema ograničenja u primjeni u komfornim i industrijskim termotehničkim postrojenjima

Principi povrata topline

Gospodarska isplativost:

UŠTEDA > TROŠAK

Pitanja:

- kada se isplati upotreba sustava povrata topline?
- koji tip sustava odabrati?
- kolika im je iskoristivost?
- o kojim parametrima ovisi njihova gospodarska isplativost?

Principi povrata topline

Karakteristična veličina sustava:

STUPANJ POVRATA TOPLINE Φ

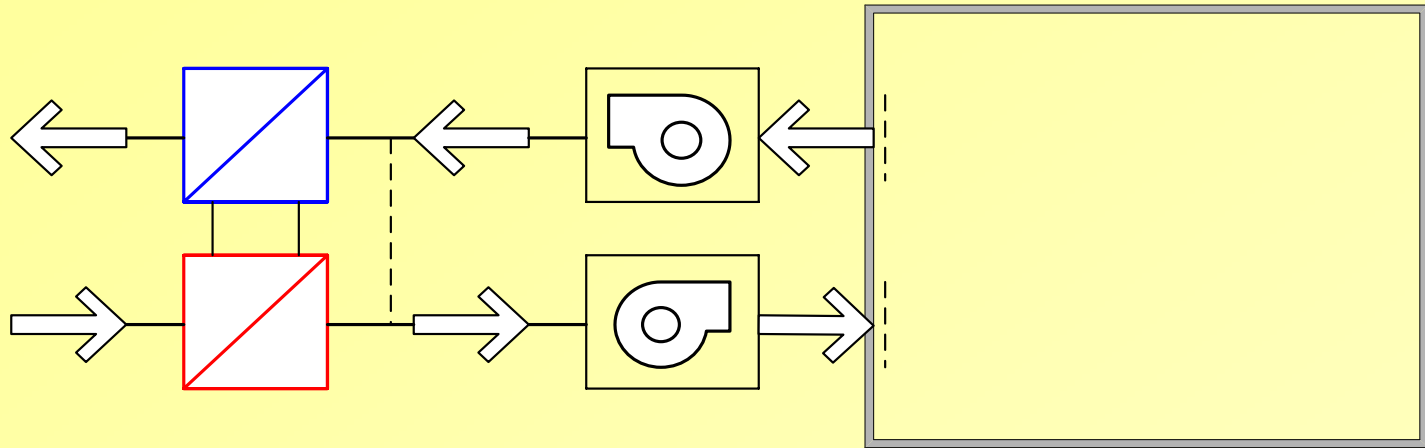
- mjera za prijelaz topline

Ovisi o:

- tipu SPT

- pogonskim uvjetima SPT

Principi povrata topline



Stupanj povrata topline: $\Phi_2 = \frac{t_{22} - t_{21}}{t_{11} - t_{21}}$

Stupanj povrata vlage: $\Psi_2 = \frac{x_{22} - x_{21}}{x_{11} - x_{21}}$

Stupanj povrata entalpije: $\Phi_{h2} = \frac{h_{22} - h_{21}}{h_{11} - h_{21}}$

- izraženo na strani **VANJSKOG** zraka
 - vrijedi za $m_{VA} = m_{IS}$ (kg/s)

t – temperatura (°C)
 x - sadržaj vlage (kg w/kg z)
 h - entalpija (J/kg)

SUSTAVI POVRATA TOPLINE

REKUPERATIVNI

REGENERATIVNI

DIREKTNA IZMJENA

INDIREKTNA IZMJENA
(preko posrednog medija)

BRZOROTIRAJUĆI

SPOROROTIRAJUĆI

Kapilarni ventilatori

Rotirajući regeneratori

Cijevni orebreni
izmjenjivači

Pločasti izmjenjivači

s prisilnom cirkulacijom
(kružni sustav)

s prirodnom cirkulacijom
- gravitacijski ili kapilarno
(toplinska cijev)

s vanjskim izvorom energije
(dizalica topline)

Rekuperativni sustavi povrata topline

- PRIJELAZ TOPLINE PREKO PLOHA (CIJEVI, PLOČE) BEZ MEĐUSOBNOG DODIRA MEDIJA – MOGUĆ **POVRAT SAMO OSJETNE TOPLINE.**

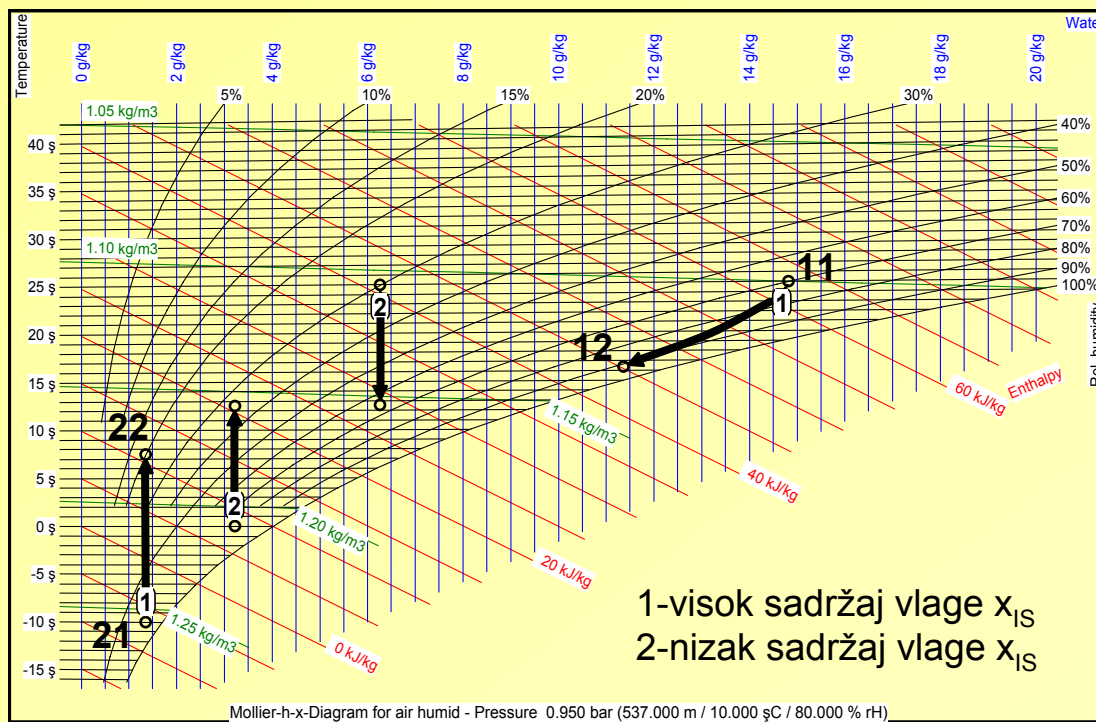
PREDNOST:

- razdvajanje struja fluida
- mogućnost prijelaza topline na različite medije (voda, zrak, ulje...)

NEDOSTATAK:

- manji stupanj iskorištenja
- veći pad tlaka
- veći potreban prostor za ugradnju

Rekuperativni sustavi povrata topline



CIJEVNI OREBRENI IZMJENJIVAČI

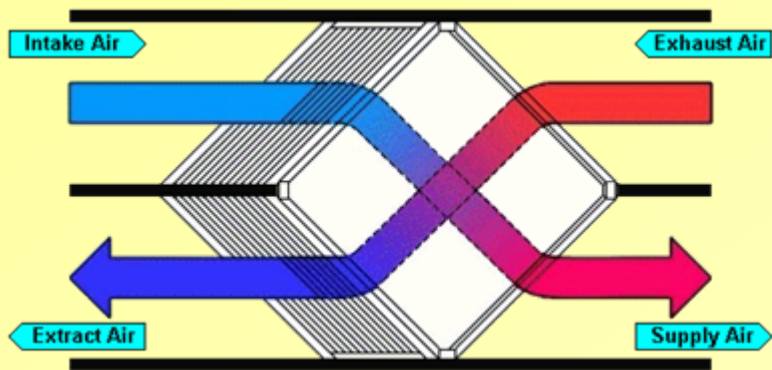
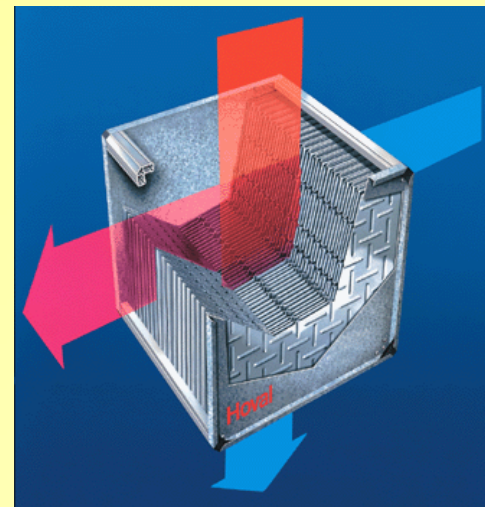
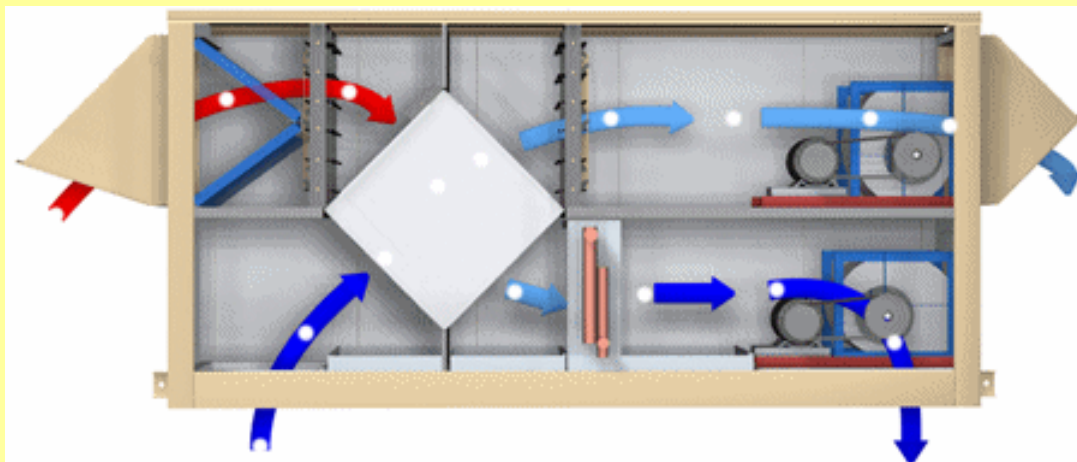


CIJEVNI OREBRENI IZMJENJIVAČI

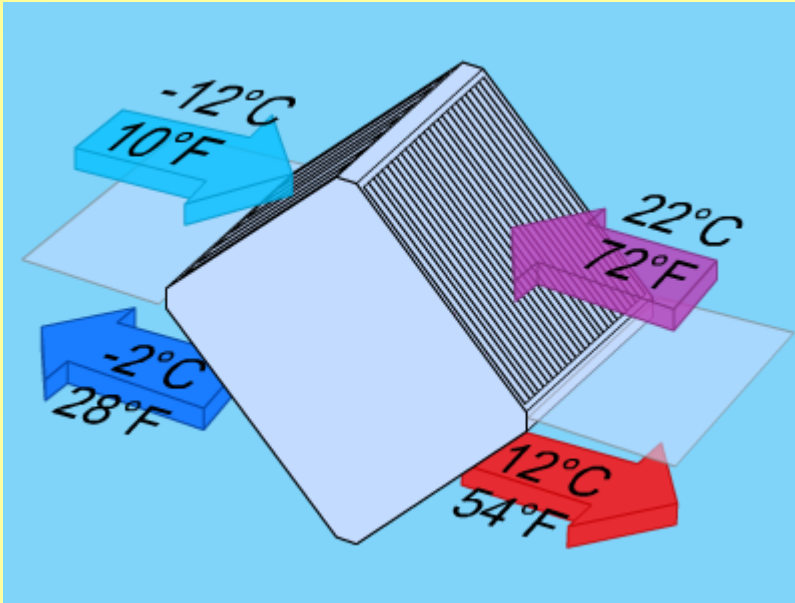


- iskorištenje toplinskog kapaciteta dimnih plinova npr. za predgrijavanje drugog medija - *economizer* za predgrijavanje vode na generatorima pare.
- iskustvena procjena – povećanje svakih 6°C na strani vode (smanjenje svakih 22°C na strani dimnih plinova) predstavlja povećanje iskoristivosti kotla za oko 1%
- povećanje stupnja iskorištenja kotla 5% do 10%.

PLOČASTI IZMJENJIVAČI



PLOČASTI IZMJENJIVAČI



Osnovne značajke:

- križno strujanje
- najčešći u upotrebi za prijelaz topline između plinova, $t \leq 100^\circ\text{C}$
- materijali – Al-lim, Al-lim prevučen plastikom, nehrđajući čelik, plastika
- debljine ploča do 1 mm
- razmak između ploča 5...10 mm
- pad tlaka na strani vanjskog zraka 100...250 Pa

- širina do 3m, protok plina do 100.000 m³/h

- stupanj povrata topline $\Phi_2=50...60\%$ uz brzine strujanja plina 2,5...3 m/s

Primjer

Predgrijavanje zraka $\Phi_2=50\%$; $t_{PO} = t_{11} = 24^\circ\text{C}$; $t_{VA} = t_{21} = -10^\circ\text{C}$

$t_{DO} = t_{22} = 7^\circ\text{C}$ – zagrijavanje vanjskog zraka za 17°C!

UZ PROTOK 20.000 m³/h – OGRIJEVNI UČINAK $Q_{SPT} \approx 114 \text{ kW}$

PLOČASTI IZMJENJIVAČI

Problemi:

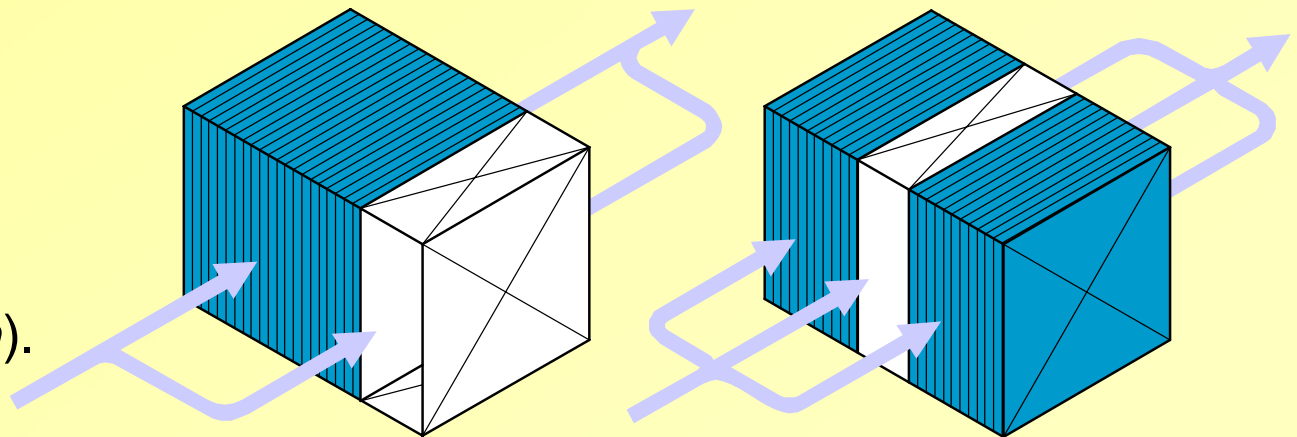
- opasnost od smrzavanja pri niskim vanjskim temperaturama ($\approx -10^{\circ}\text{C}$)
- osjetljivost na onečišćenje \rightarrow smanjenje Φ_2 i porast Δp_2

Protumjere:

- ugradnja bypassa
- smanjenje protoka
- predgrijavanje dobavne struje
- ugradnja filtera

Regulacija učinka:

- isključivo pomoću premosnice (*bypassa*).

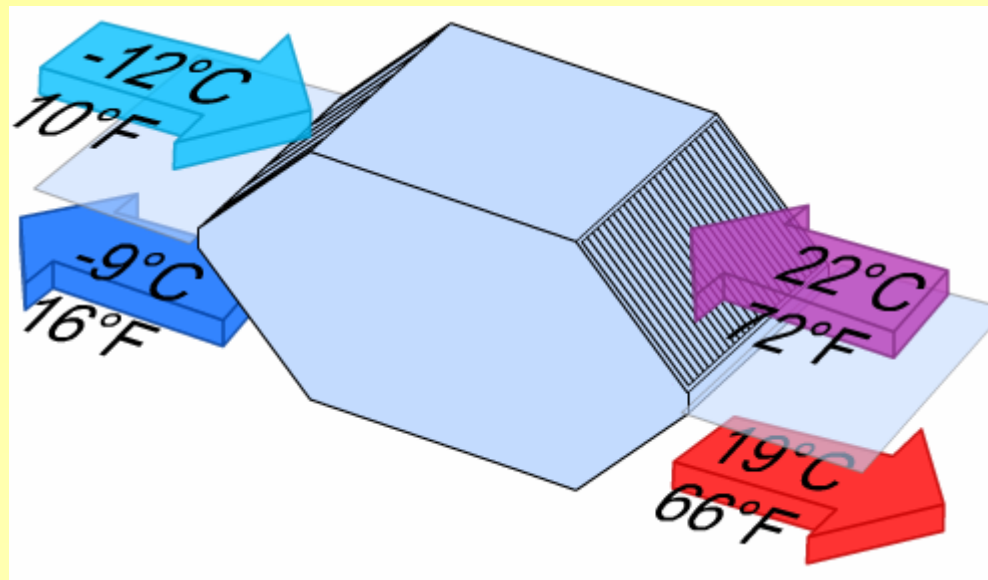


PLOČASTI IZMJENJIVAČI

POVEĆANJE STUPNJA POVRATA TOPLINE:

- povećanjem ugradbene duljine – promjena iz križnog u protusmjerno strujanje

- $\Phi_2=60...75\%$



PLOČASTI IZMJENJIVAČI

POVEĆANJE STUPNJA POVRATA TOPLINE:

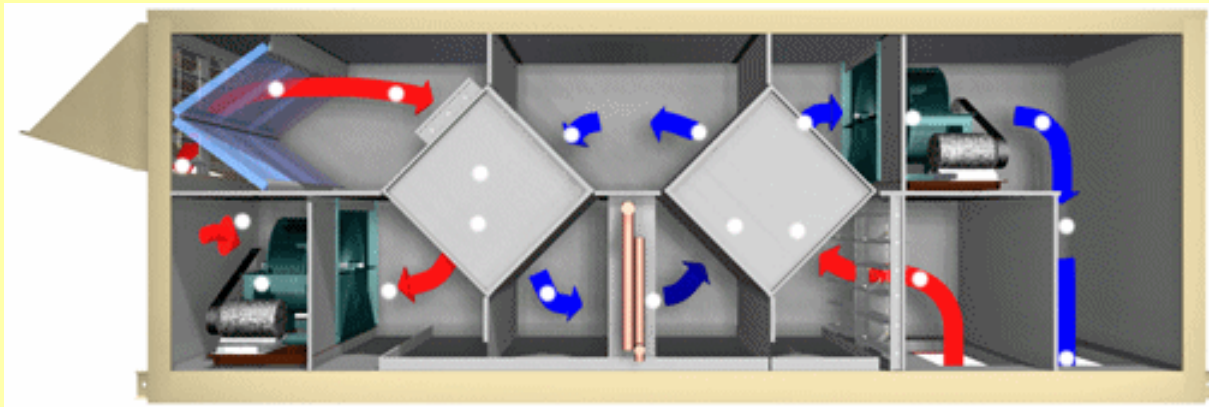
- postavljanjem dvaju izmjenjivača jedan iza drugog
- povećanje prema izrazu:

$$\Phi_{2UK} = \frac{2\Phi_2 - \left(1 + \frac{m_{VA}}{m_{IS}}\right)\Phi_2^2}{1 - \frac{m_{VA}}{m_{IS}}\Phi_2^2}$$

Primjer

Predgrijavanje zraka $\Phi_2=50\%$; $m_{VA}/m_{IS}=1$

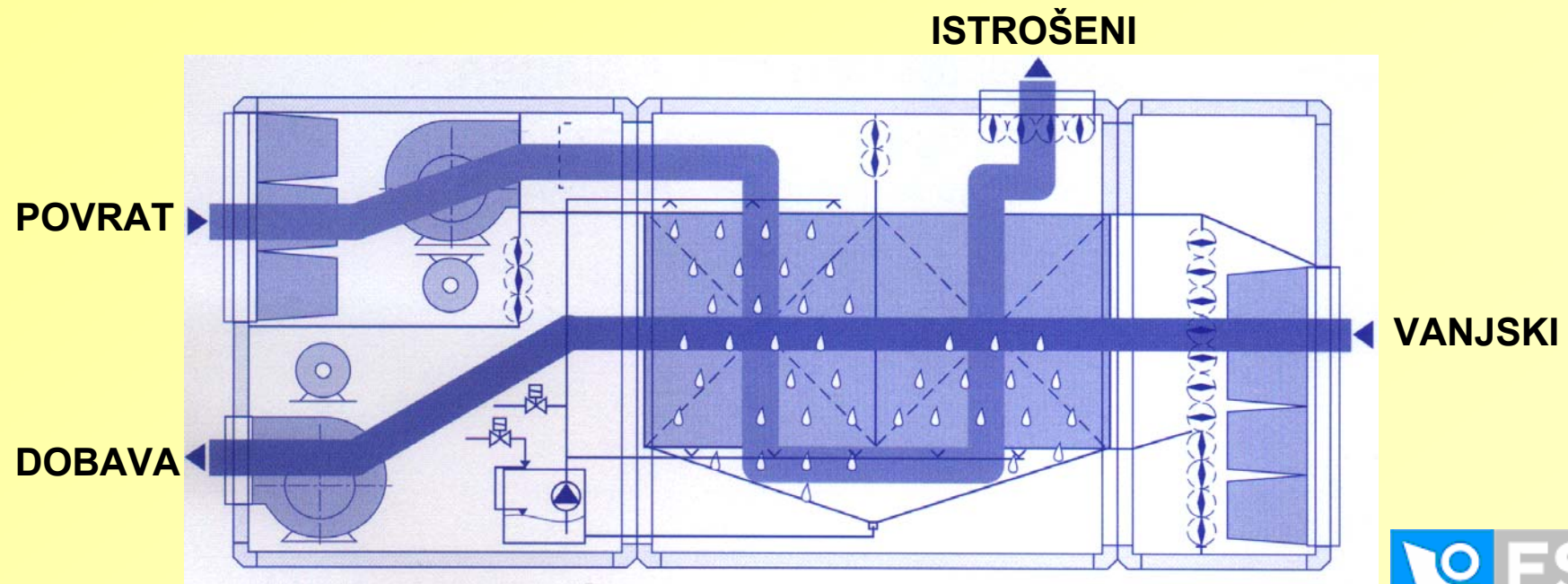
$$\Phi_{2UK} = 67\%$$



PLOČASTI IZMJENJIVAČI

POVEĆANJE STUPNJA POVRATA TOPLINE:

- postavljanjem dvaju izmjenjivača jedan iza drugog i raspršivanjem vode sa strane povratnog zraka u ljetnom režimu
- ljetni režim s evaporativnim hlađenjem: $\Phi_2 \approx 90\%$
- ljetni režim bez evaporativnog hlađenja i zimski režim: $\Phi_2 \approx 75\%$

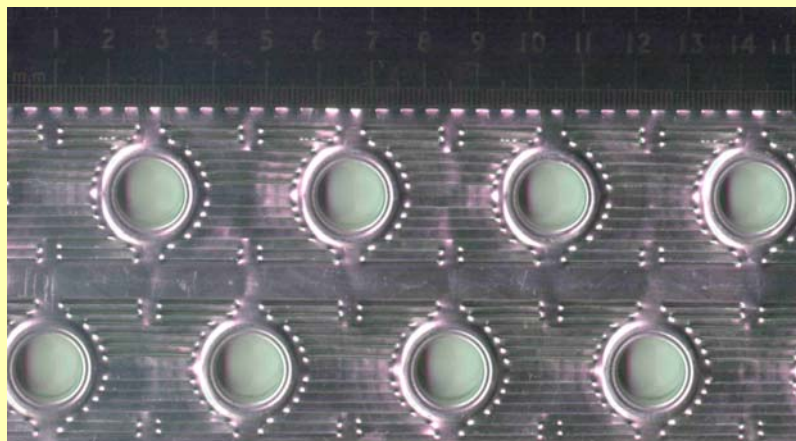


PLOČASTI IZMJENJIVAČI

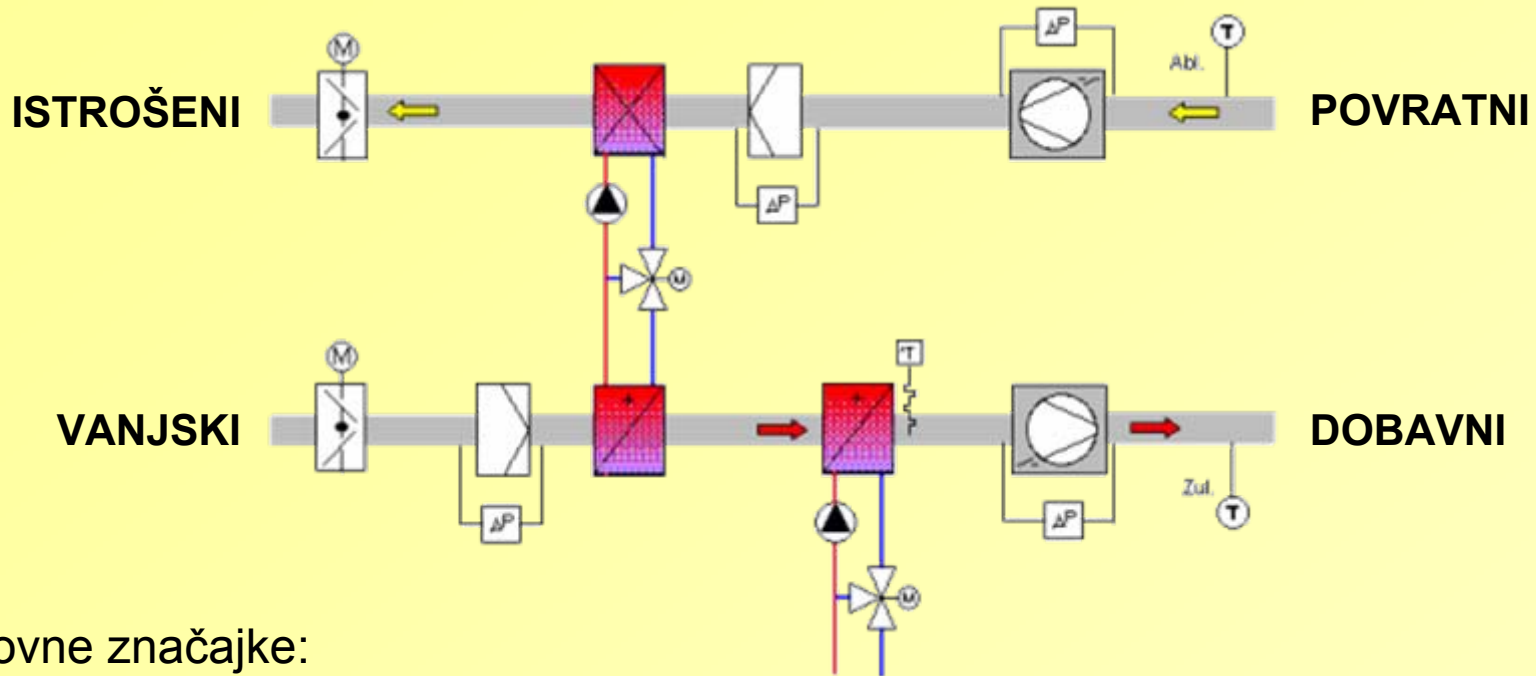
POVRAT TOPLINE PLIN-KAPLJEVINA I KAPLJEVINA-KAPLJEVINA



KRUŽNI CIRKULACIJSKI SUSTAV



KRUŽNI CIRKULACIJSKI SUSTAV



Osnovne značajke:

- protusmjerno strujanje
- upotreba za prijelaz toplote između plinova, $t \leq 100^{\circ}\text{C}$ – posredni medij (voda, voda-etilenglikol) cirkulira kroz izmjenjivače povezane spojnim cjevovodom.
- cjevovod ima vlastitu pumpu, ekspanzijsku posudu i troputni ventil.
- pogodni za udaljene dobavnu i istrošenu struju plina
- materijali – [Cu-cijevi/Al-rebra](#), [Č-cijevi/Č-rebra](#) i dr.

KRUŽNI CIRKULACIJSKI SUSTAV

- broj redova cijevi u smjeru strujanja 2...8
- razmak između lamela 1,5...6 mm
- pad tlaka na strani vanjskog zraka 100...250 Pa
- ugradbena širina do 4m, protok plinova do 100.000 m³/h
- stupanj povrata topline $\Phi_2=40...60\%$ uz brzine strujanja plina 2,5...3 m/s

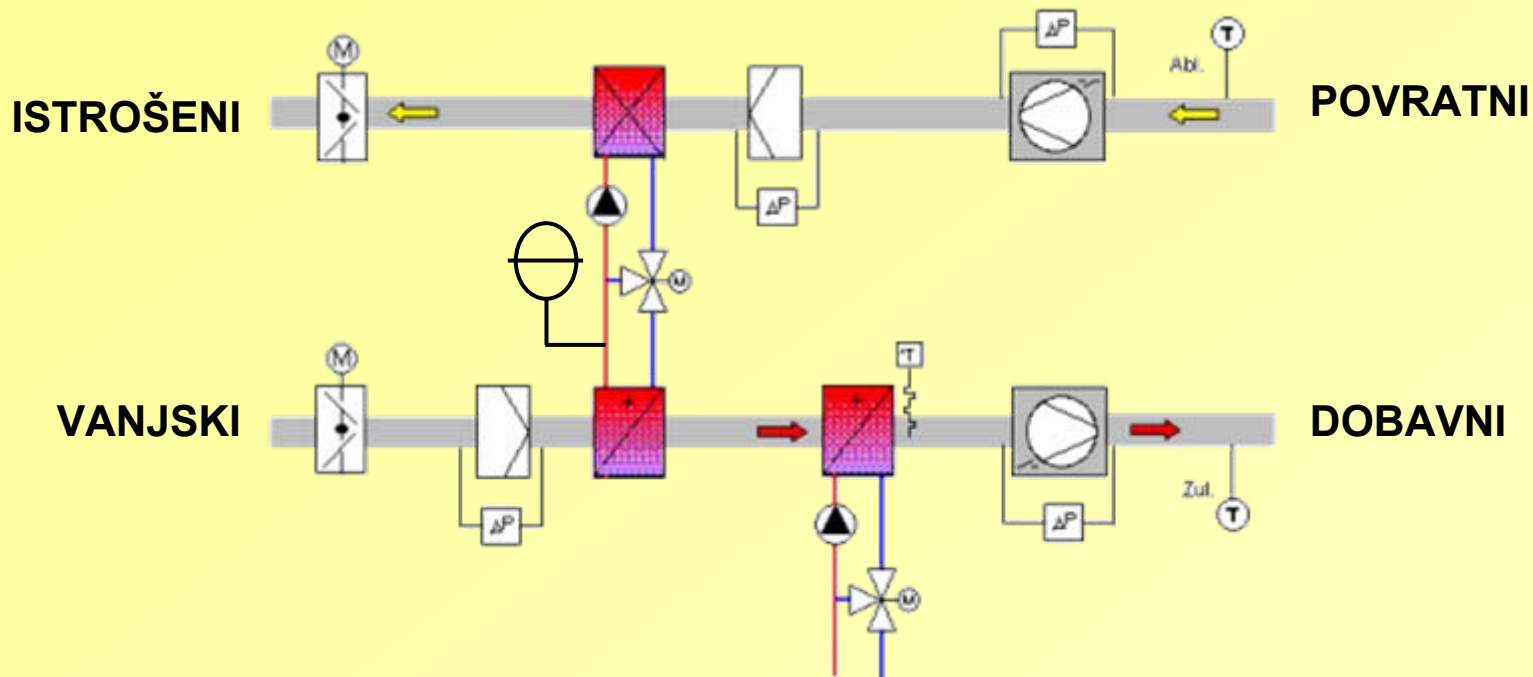
Problemi:

- opasnost od smrzavanja pri niskim vanjskim temperaturama ($\approx -10^\circ\text{C}$)
- izmjena topline između spojnog cjevovoda i okoliša
- osjetljivost na onečišćenje → smanjenje Φ_2 i porast Δp_2

Protumjere:

- dodavanje etilen-glikola u krug vode
- smanjenje protoka vode kroz izmjenjivač u dobavnoj struji
- izolacija spojnog cjevovoda
- ugradnja filtera ispred izmjenjivača u obje struje plina

KRUŽNI CIRKULACIJSKI SUSTAV



Regulacija učinka:

- pomoću troputnog miješajućeg ventila u struji vode – smanjenje protoka vode kroz izmjenjivač u dobavnoj struji → smanjenje učinka i zaštita sustava od smrzavanja

KRUŽNI CIRKULACIJSKI SUSTAV

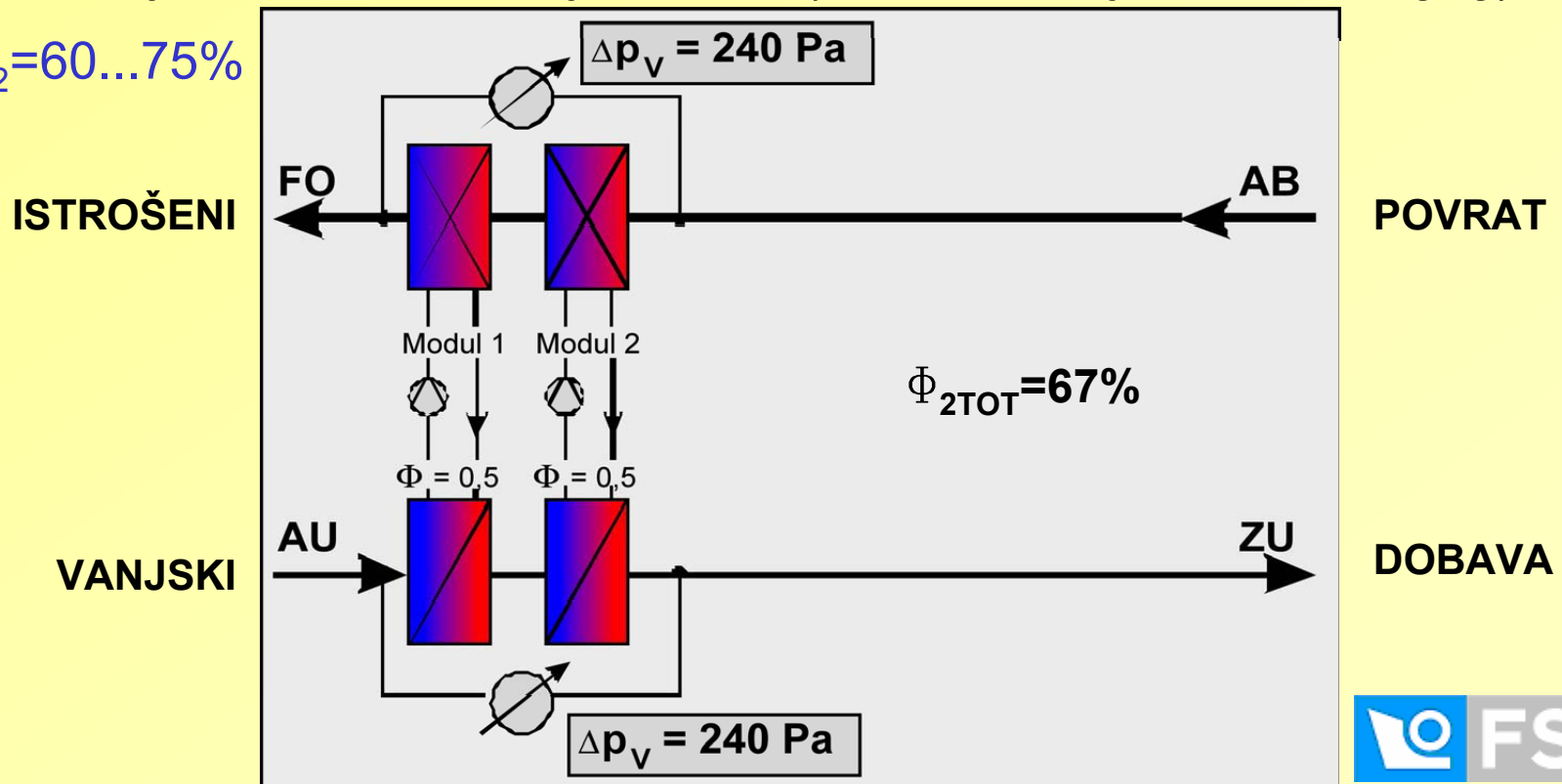
Optimalno područje rada:

$$(m_{VA}c_p)/(m_Wc_W)=1$$

POVEĆANJE STUPNJA POVRATA TOPLINE:

- dodavanjem sustava u serijsku vezu (dva sustava jedan iza drugog)

- $\Phi_2=60...75\%$



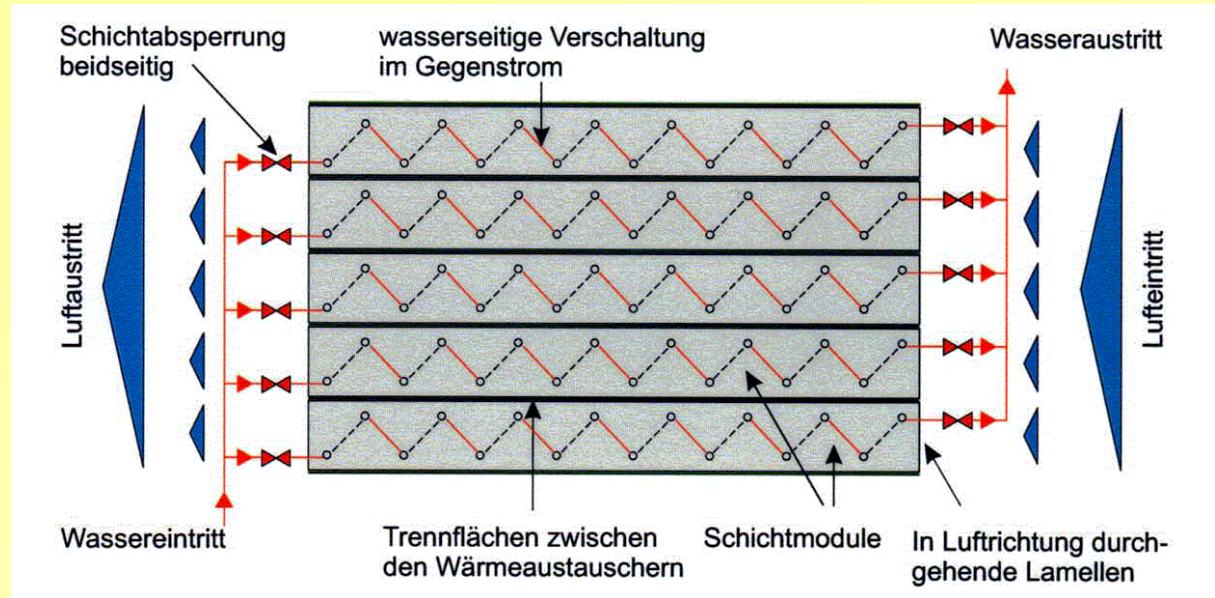
KRUŽNI CIRKULACIJSKI SUSTAV

POVEĆANJE STUPNJA POVRATA TOPLINE:

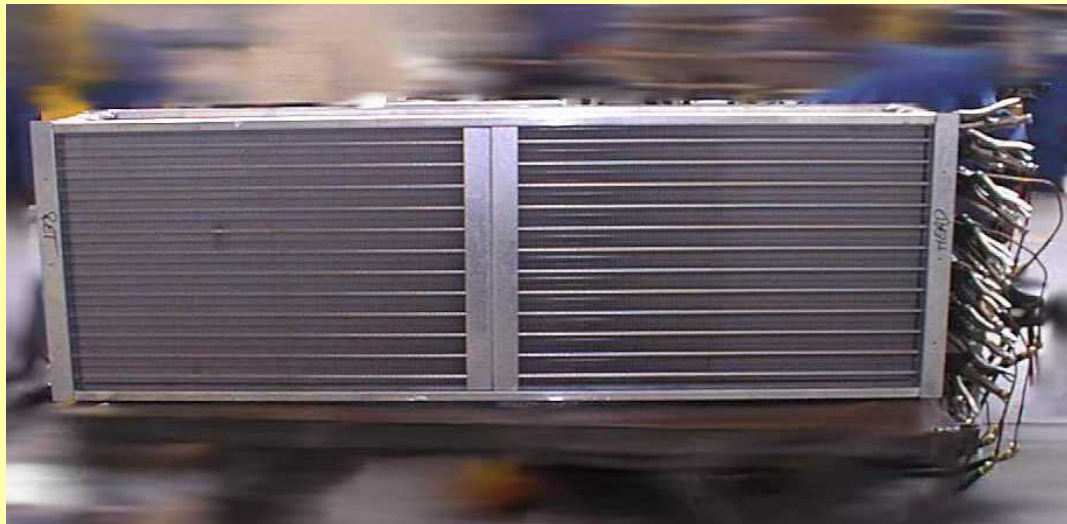
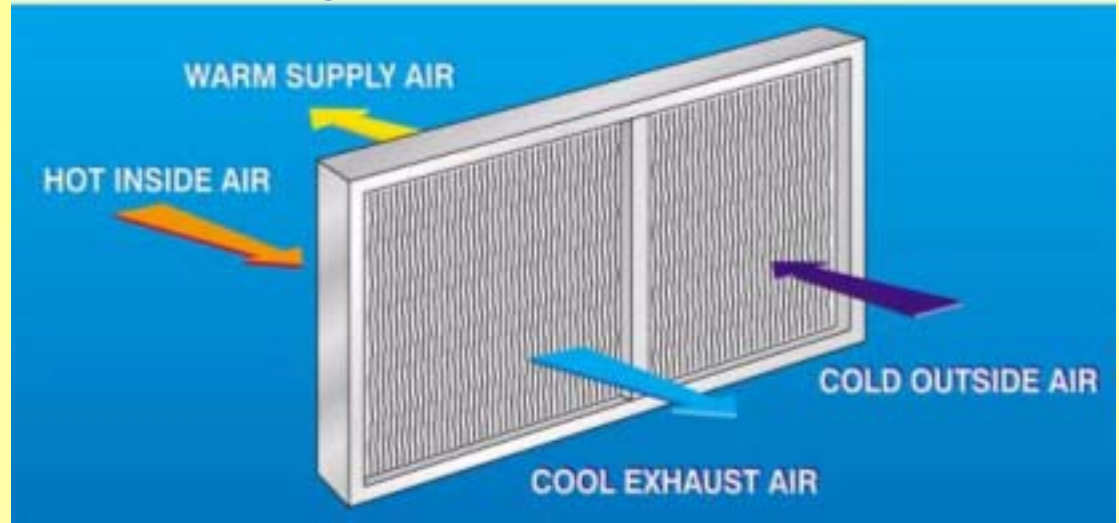
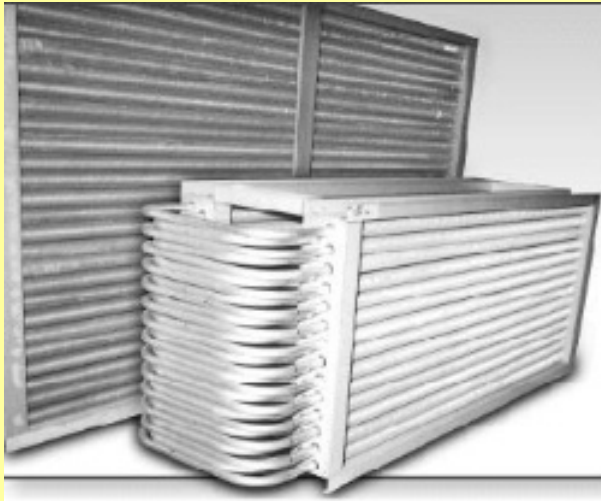
- upotrebom protusmjernih slojevitih izmjenjivača

- $\Phi_2=70...85\%$

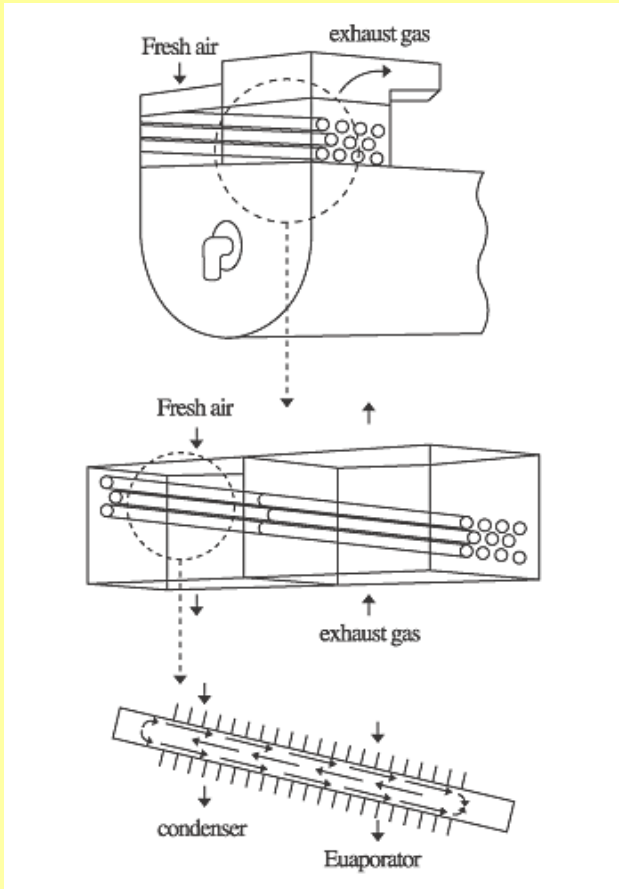
GSWT® SEW



TOPLINSKE CIJEVI (eng. HEAT PIPES)



TOPLINSKE CIJEVI



Osnovne značajke:

- protusmjerno strujanje
- upotreba za prijelaz topline između plinova
 $40 \leq t \leq 80^\circ\text{C}$
- vakuumirane cijevi izmjenjivača punjene posrednim medijem – bira se prema radnom području (alkoholi ili radne tvari)
- materijali – **Cu-Al**, Cu-Cu, Al-Al
- broj redova cijevi u smjeru strujanja 2...8
- pad tlaka na strani svježeg zraka 100...200 Pa
- stupanj povrata topline $\Phi_2=50...60\%$
- nema pokretnih dijelova, nema održavanja
- nema mogućnosti regulacije učinka u uspravnoj izvedbi

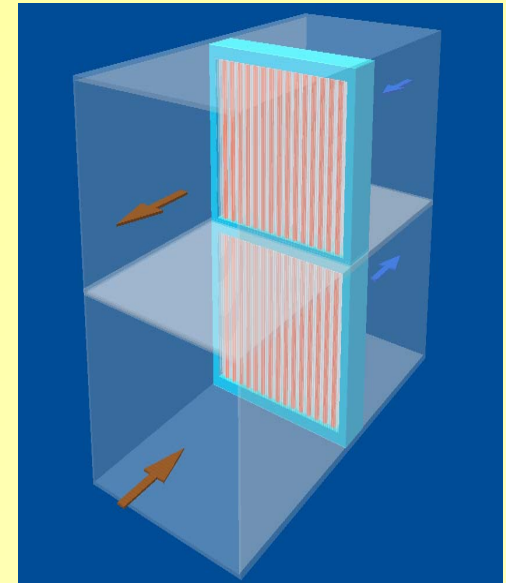
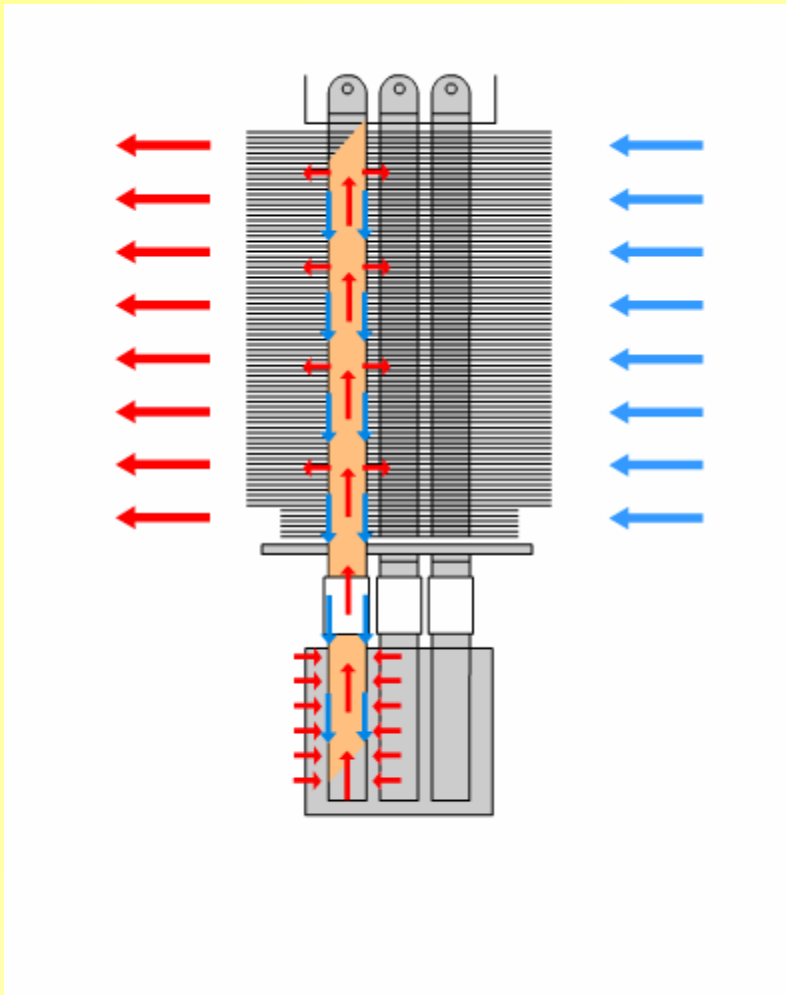
Princip rada:

- dio cijevi nalazi se u jednoj, a dio u drugoj struji plina međusobno različitih temperatura.
- radna tvar unutar cijevi isparava na jednoj, a kondenzira na drugoj strani, prenoseći tako toplinu s jednog medija na drugi

TOPLINSKE CIJEVI

Dva osnovna tipa:

1. Uspravna izvedba



Princip rada:

- Gravitacijski

Radna tvar kondenzira u gornjem dijelu izmjenjivača, kondenzat se slijeva gravitacijski i isparava u donjem dijelu.

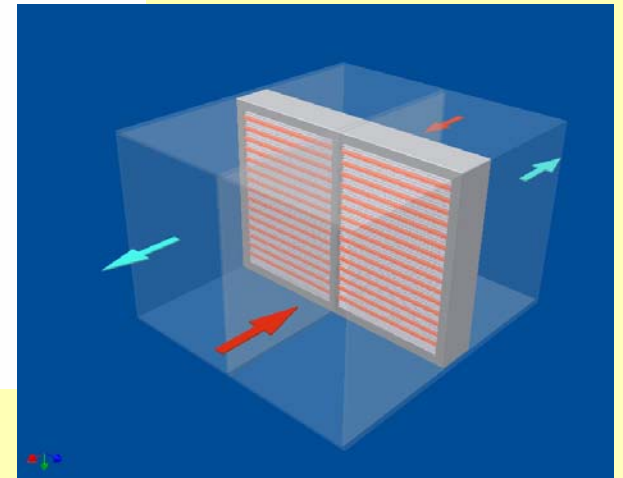
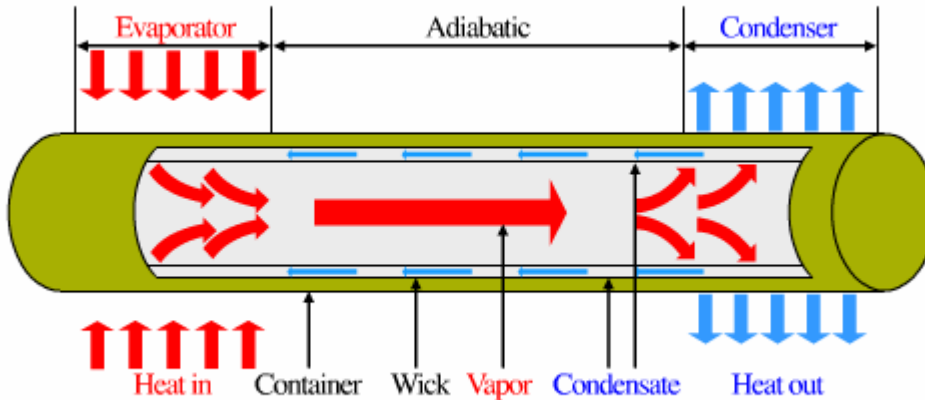
Tako se **struja** koja prolazi preko **gornjeg dijela** izmjenjivača **zagrijava**, a **struja** koja prolazi preko **donjeg dijela** se **hladi**.

- povrat topline samo u režimu grijanja (dobavna struja preko gornjeg dijela izmjenjivača).

- regulacija premosnicom.

TOPLINSKE CIJEVI

2. Vodoravna izvedba



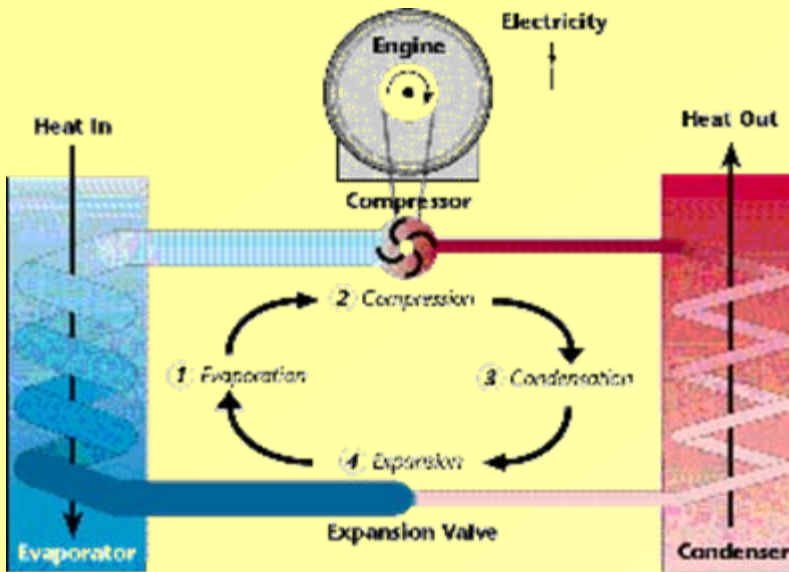
Princip rada:

- **Kapilarni**

Cijevi na unutarnjoj površini prevučene poroznim slojem. Radna tvar kondenzira u jednom, a isparava u drugom dijelu izmjenjivača. Kondenzat se kapilarnim silama kroz porozni sloj kreće prema zoni isparavanja. Tako se struja koja prolazi preko jednog dijela izmjenjivača zagrijava, a struja koja prolazi preko drugog dijela se hladi.

- uz **promjenu nagiba izmjenjivača**, moguć povrat topline u režimu grijanja i hlađenja te regulacija učinka.

DIZALICA TOPLINE



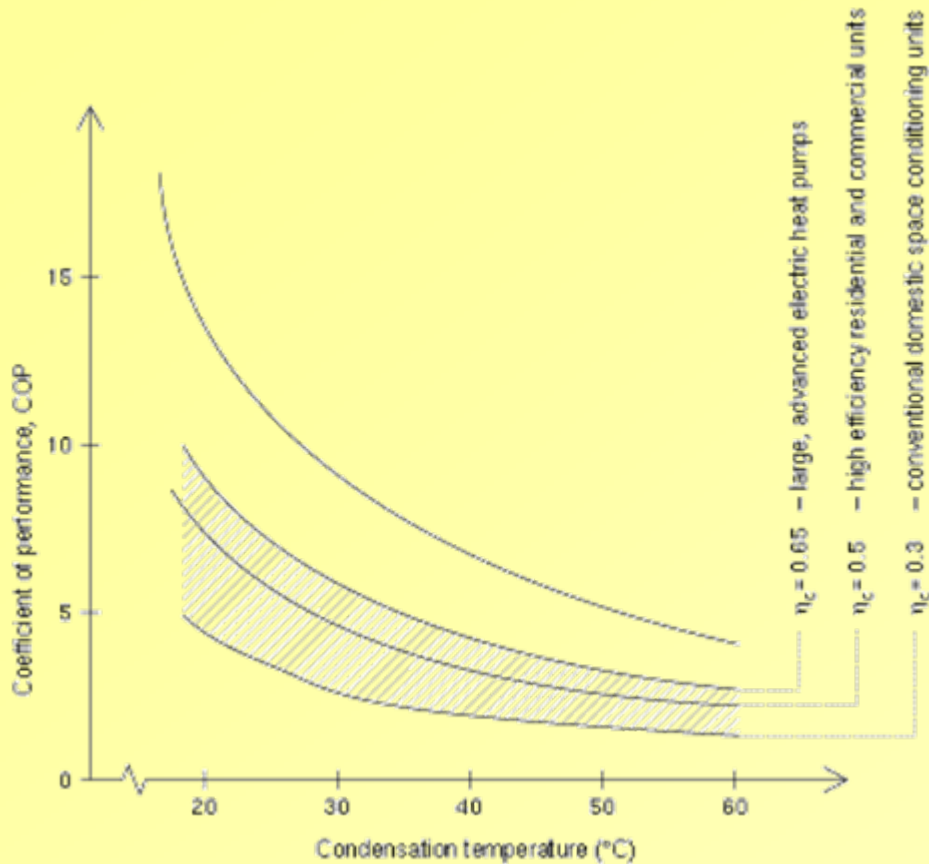
Osnovne značajke:

- nije klasični SPT, učinkovitost se ne izražava preko stupnja povrata topline Φ_2
- mnogo različitih izvedbi – elektromot. pogon, pogon motorom s un. izgaranjem, apsorpcijski tip
- tri osnovna toplinska izvora/ponora:
 1. Voda
 2. Zrak
 3. Zemlja

Princip rada:

- poput rashladnog stroja (**isparavanje- kompresija – kondenzacija - ekspanzija**), no na višoj temperaturnoj razini.
- pogodno za objekte koji istovremeno trebaju grijanje i hlađenje – korištenje topline kondenzacije.

DIZALICA TOPLINE



Karakteristična veličina:

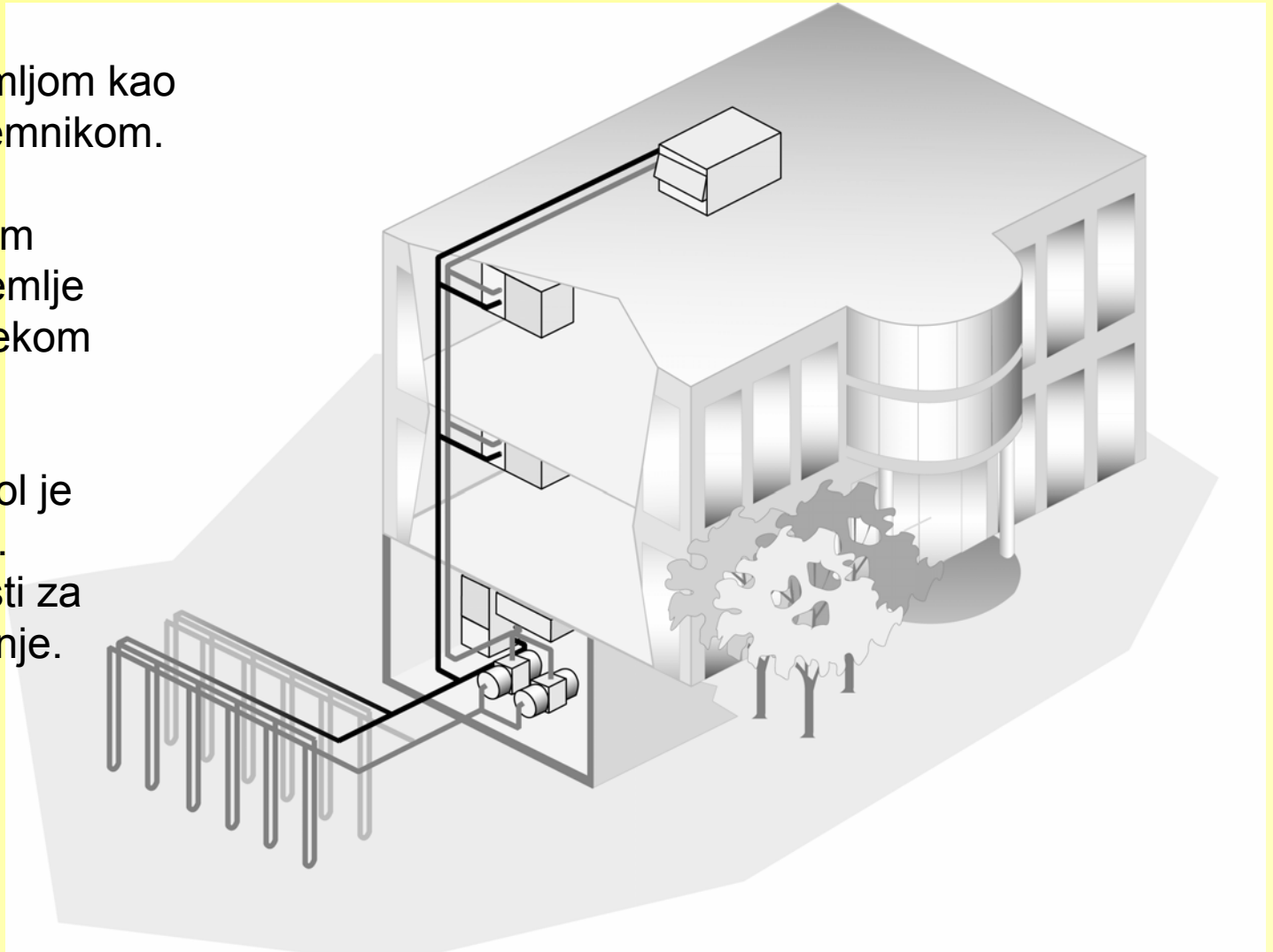
- faktor grijanja (*eng.* COP) – predstavlja omjer topline dobivene na kondenzatoru i snage utrošene na pogon kompresora.

$$COP = \frac{Q_K}{P_C}$$

DIZALICA TOPLINE

Primjer

- izvedba sa zemljom kao toplinskim spremnikom.
- na dubini $z \geq 2\text{m}$ temperatura zemlje $5 \leq t \leq 14^\circ\text{C}$ tijekom čitave godine.
- voda-etilenglikol je posredni medij.
- sustav se koristi za grijanje i hlađenje.



Regenerativni sustavi povrata topline

- PRIJELAZ TOPLINE PREKO AKUMULACIJSKE MASE UZ MEĐUSOBNI KONTAKT MEDIJA – MOGUĆ **POVRAT OSJETNE I LATENTNE TOPLINE.**

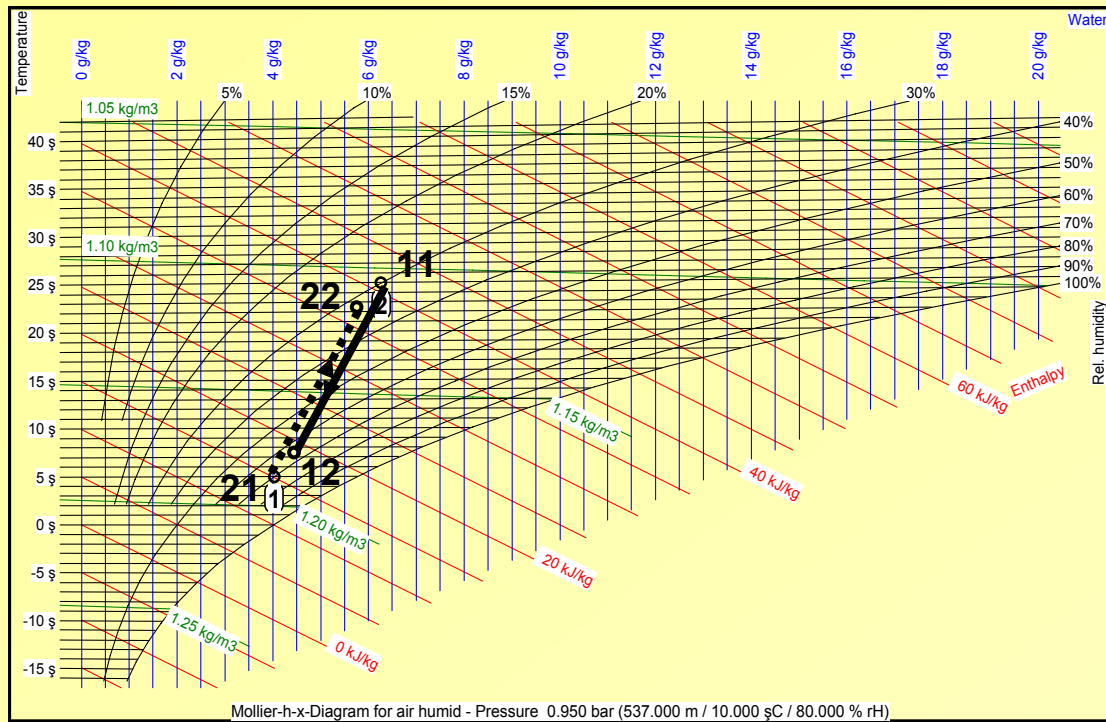
PREDNOST:

- povrat topline i vlage
- veći stupanj iskorištenja
- kompaktna izvedba

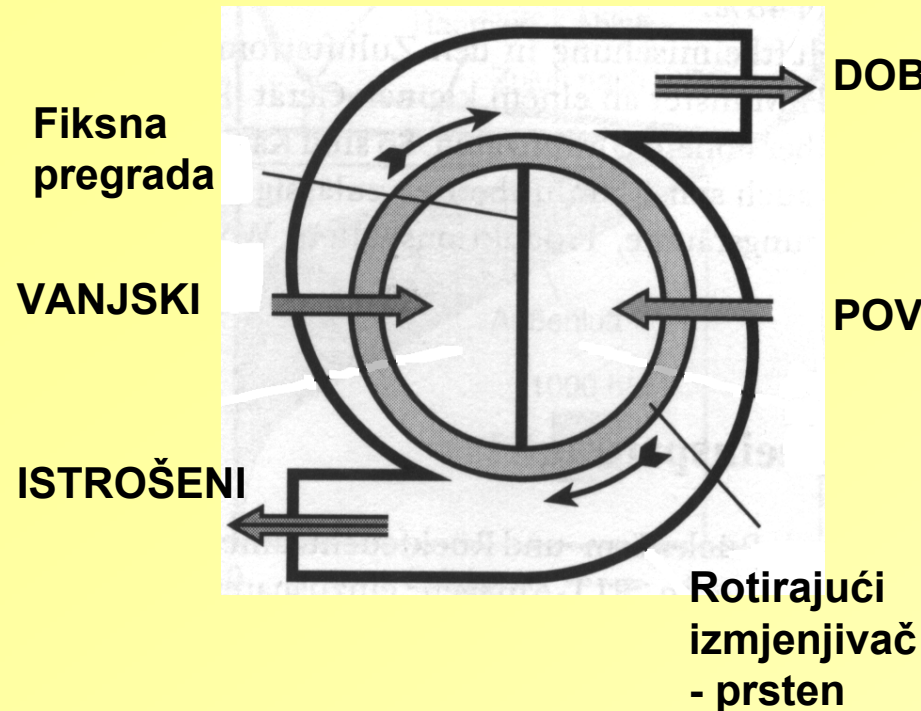
NEDOSTATAK:

- nema potpunog razdvajanja struja fluida
- izmjena topline samo između plinova

Regenerativni sustavi povrata topline



BRZOROTIRAJUĆI KAPILARNI VENTILATOR



Osnovne značajke:

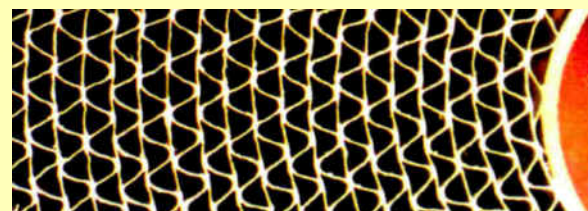
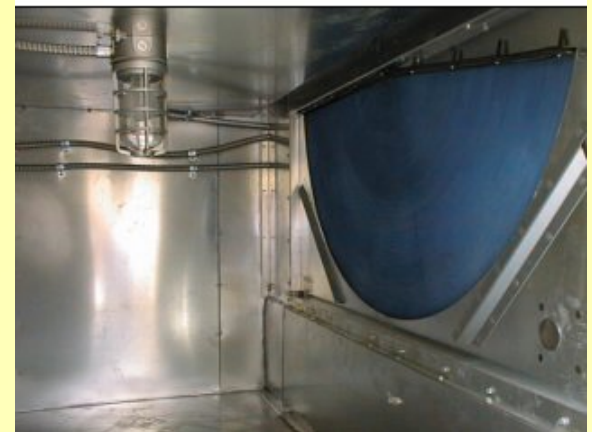
- aksijalni usis / radijalni ispuh
- upotreba za prijelaz topline između plinova
- materijali – metalno kućište, poliuretanski rotirajući prsten
- broj okretaja 700...2400 min⁻¹
- protok do 2 x 15.000 m³/h
- predtlak na strani vanjskog zraka 100...400 Pa
- stupanj povrata topline $\Phi_2=45...50\%$
- rotirajući prsten je ujedno i grubi filter (moguća zamjena i čišćenje)

- miješanje povratnog zraka u dobavnu struju 5...10%

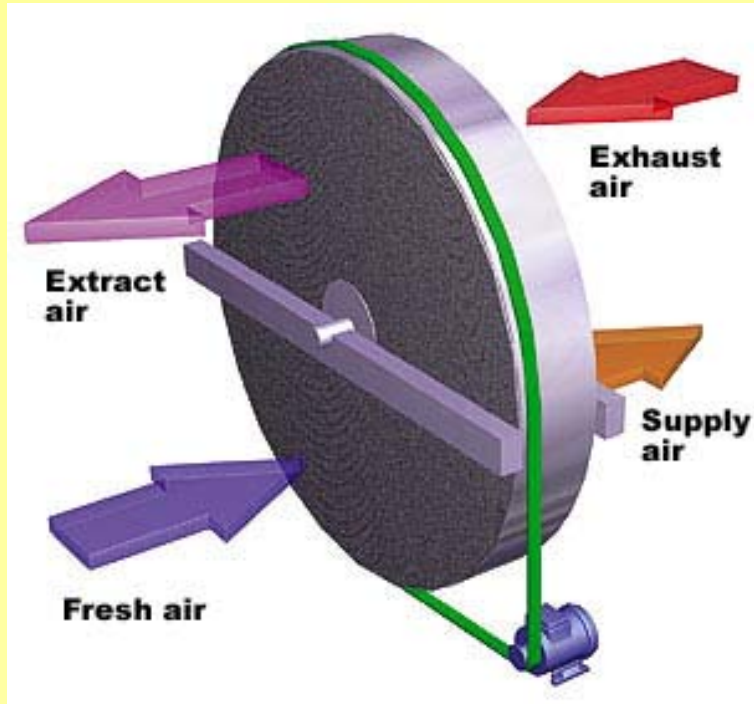
Princip rada:

- vanjski i povratni zrak usisavaju se aksijalno u središnju komoru, podijeljenu fiksnom pregradom. Oko komore rotira izmjenjivač od poroznog materijala koji akumulira toplinu i prenosi je s povratne struje na vanjski zrak.

ROTIRAJUĆI REGENERATOR



ROTIRAJUĆI REGENERATOR



Osnovne značajke:

- protusmjerno strujanje
- upotreba za prijelaz topline između plinova
- temperaturno područje primjene $t \leq 200^{\circ}\text{C}$
- materijali – Al-saće, Č-kućište
- broj okretaja rotora $5 \dots 20 \text{ min}^{-1}$
- promjer rotora do 6 m
- protok plina do $150.000 \text{ m}^3/\text{h}$
- pad tlaka na strani vanjskog zraka $50 \dots 300 \text{ Pa}$
- stupanj povrata topline $\Phi_2 = 70 \dots 90\%$
- stupanj povrata vlage $\Psi_2 = 70 \dots 90\%$

Princip rada:

- rotirajuća akumulacijska masa prenosi toplinu s povratne na vanjsku struju zraka
- rotor se ne smije zaustavljati niti u vremenu kada termotehnički sustav ne vrši povrat topline, već rotira na min. broju okretaja ili se uključuje povremeno.
- dvije osnovne izvedbe – **sorpcijski i kondenzacijski**.

ROTIRAJUĆI REGENERATOR

Problemi:

- opasnost od smrzavanja pri niskim vanjskim temperaturama
- osjetljivost na onečišćenje saća → smanjenje Φ_2, Ψ_2 i porast Δp_2
- miješanje povratnog i vanjskog zraka (2...5%)

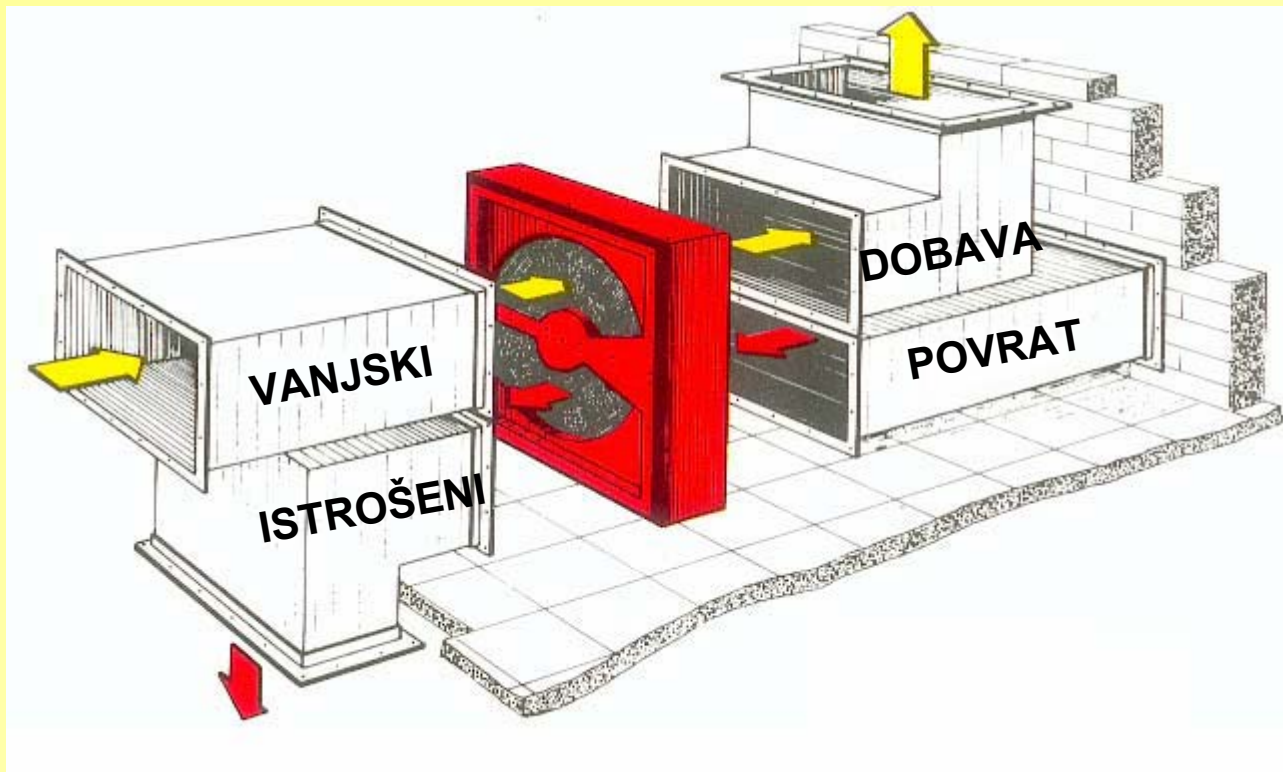
Protumjere:

- smanjenje broja okretaja
- ugradnja brtvenice i ustave (miješanje $\leq 0,5\%$)
- izvedba s “plinskim jastukom” (nema miješanja)

Regulacija učinka:

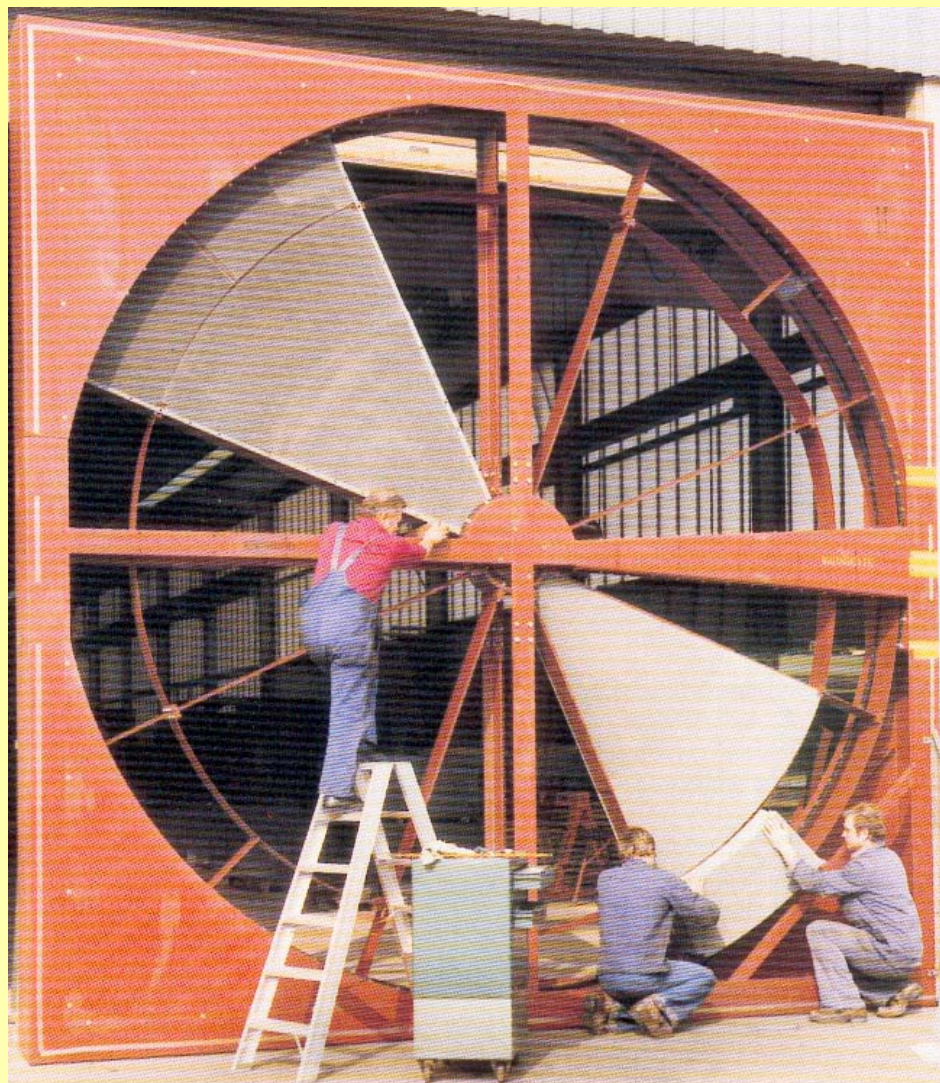
- promjenom brzine vrtnje rotora

ROTIRAJUĆI REGENERATOR



Primjer ugradnje

ROTIRAJUĆI REGENERATOR



Primjer montaže saća velikog regeneratora

ROTIRAJUĆI REGENERATOR

Sorpcijski regenererator:

- površina saća presvučena higroskopnim materijalom (npr. na bazi silicija)
- higroskopna ispuna preuzima vlagu sa vlažne struje plina i predaje je suhoj struji
- povrat osjetne i latentne topline zimi, hlađenje i odvlaživanje ljeti.

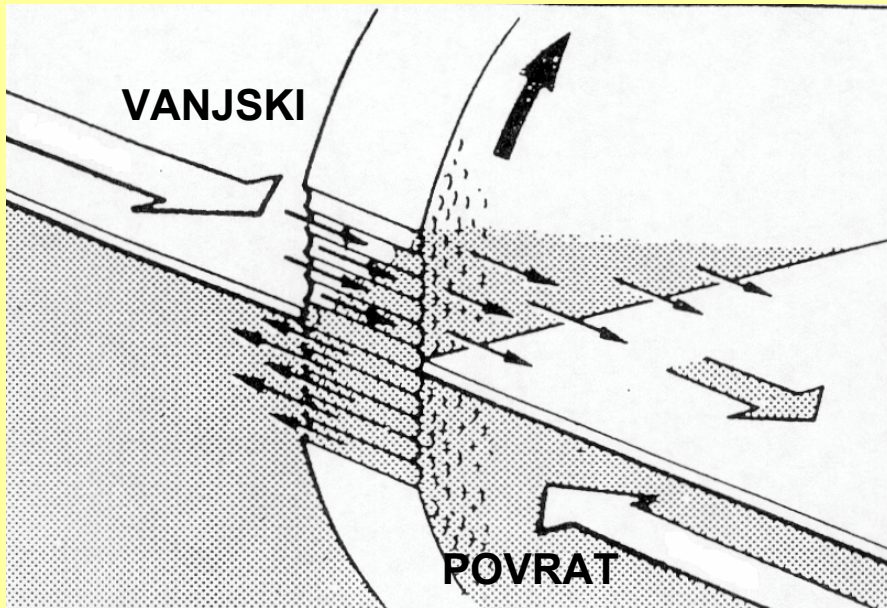
Kondenzacijski regenererator:

- glatka površina saća (Al, Č)
- povrat latentne topline samo u slučaju hlađenja ispod rosišta – vlaga kondenzira u toploj i isparava u hladnoj struji
→ povrat latentne topline (vlage) samo zimi.

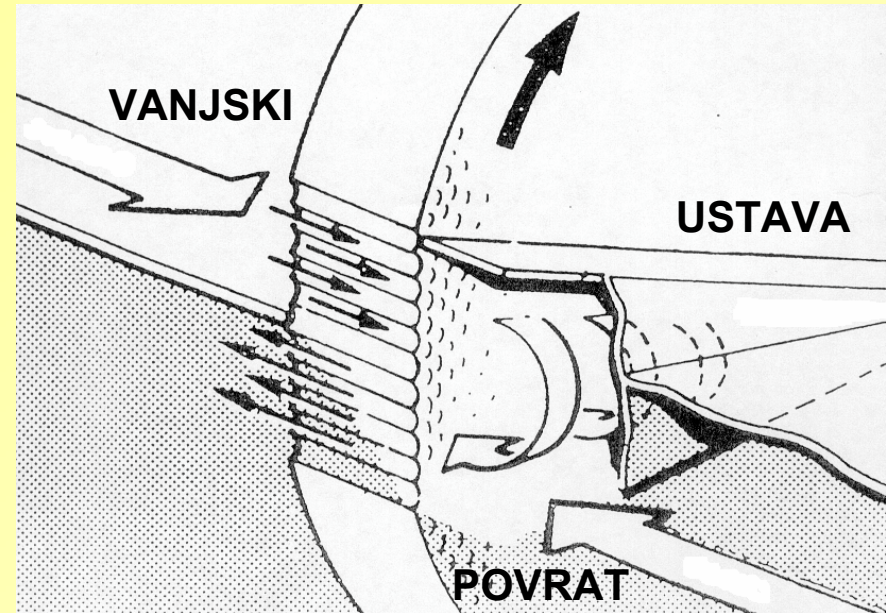


Sorpcijski regenererator

ROTIRAJUĆI REGENERATOR

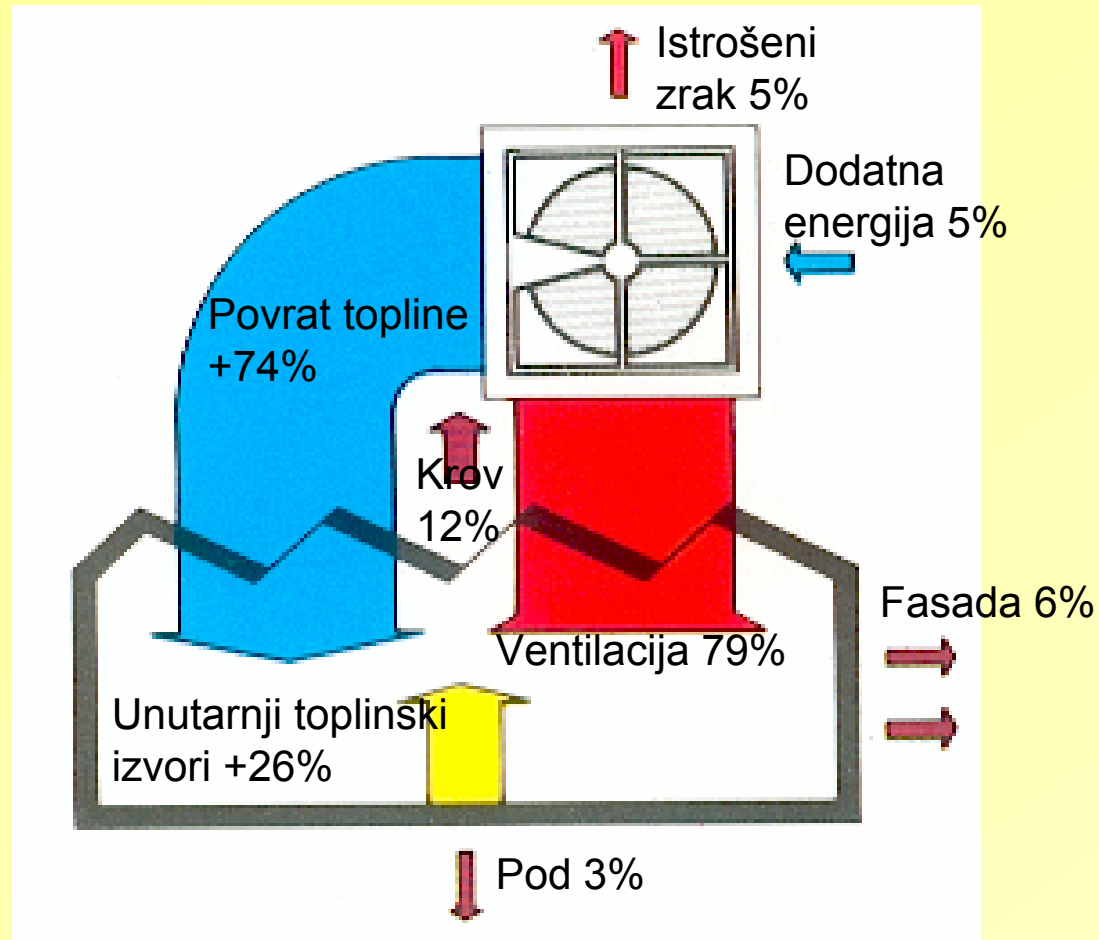


Prijenos zraka iz povratne u dobavnu struju



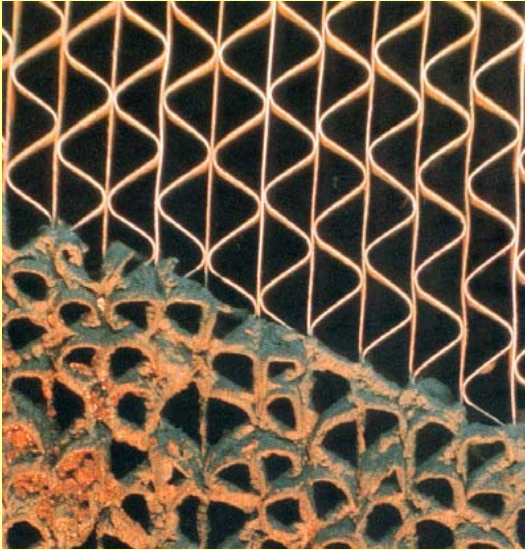
Sprječavanje miješanja pomoću ustave

ROTIRAJUĆI REGENERATOR

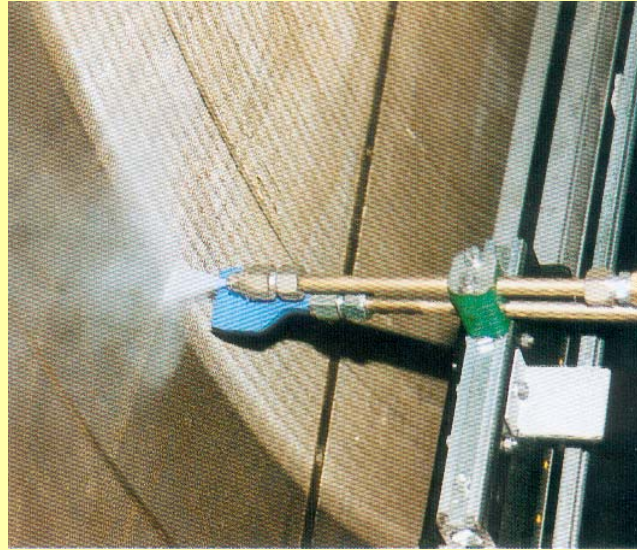


Primjer toplinske bilance tvorničke hale

ROTIRAJUĆI REGENERATOR



Čišćenje saća u pogonu lakirnice

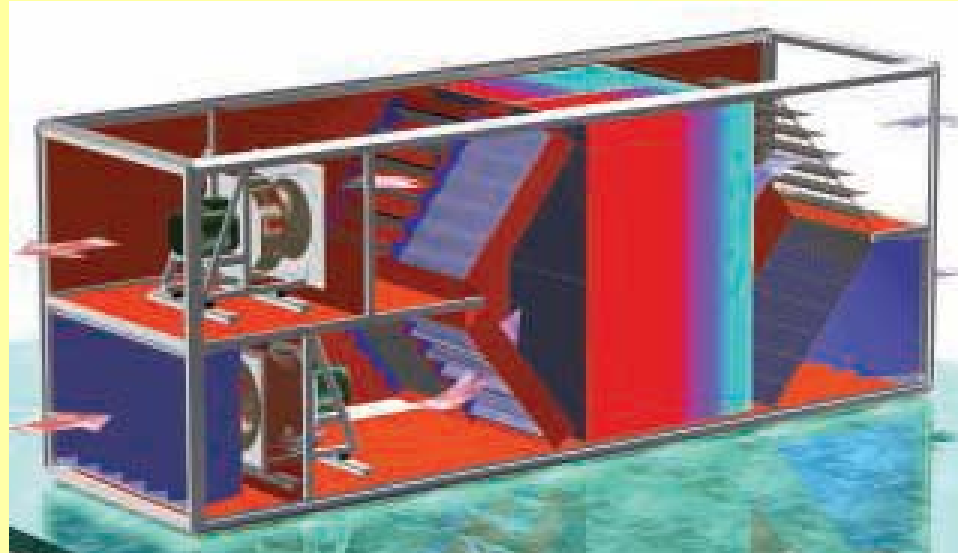


Dvokomponentni sustav čišćenja - usisna strana



Dvokomponentni sustav čišćenja - tlačna strana

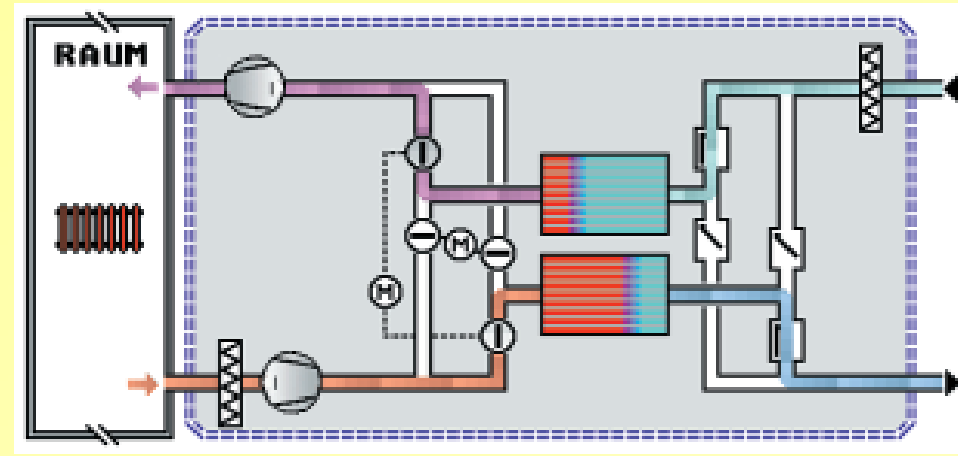
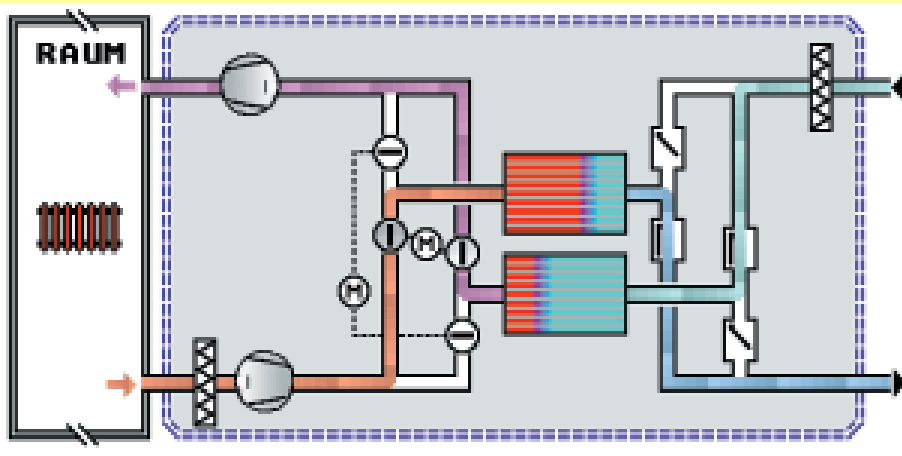
REGENERATOR S AKUMULIRAJUĆIM PLOČAMA



Osnovne značajke:

- protusmjerno strujanje
- upotreba za prijelaz topline između plinova
- dva paketa akumulirajućih ploča
- materijal – plastika
- ukupno vrijeme trajanja jednog ciklusa (punjenje+pražnjenje) ≈ 80 s
- miješanje povratnog i vanjskog zraka $\leq 2\%$
- stupanj povrata topline $\Phi_2=70\dots90\%$
- stupanj povrata vlage $\Psi_2=70\dots90\%$

REGENERATOR S AKUMULIRAJUĆIM PLOČAMA



Princip rada:

- sustavom zaklopki se povratni zrak usmjeri preko jednog paketa, te ga “punji” (grije/hladi), a istovremeno vanjski zrak struji preko drugog paketa koji je prethodno “napunjen” (grije se/hladi se).

Regulacija učinka:

- promjenom vremena trajanja “punjenja” i “pražnjenja” unutar jednog ciklusa.

GOSPODARSKA ISPLATIVOST

<u>Gosp. isplativost SPT ovisi o:</u>	Vrsta objekta	Dnevni pogon [h/a]	Noćni pogon [h/a]	Ukupno [h/a]
- vrsti i namjeni objekta	Poslovni objekt (6:00 - 20:00)	2800	400	3200
- geografskoj lokaciji	Poslovni objekt (0:00 - 24:00)	3100	3100	6200
- vrsti pogona KGH sustava (trajanje pogona , brzina strujanja, potrebna temperatura dobavne struje)	Industrijski pogon: 1 smjena	2200	400	2600
	Industrijski pogon: 2 smjene	3100	1600	4700
- tipu SPT (stupanj povrata topline, stupanj povrata vlage, padovi tlaka i dr.)	Industrijski pogon: 3 smjene	3150	3150	6300
	Trgovina	3750	1550	5300
	Restaurant	1900	3400	5300
	Hotel / Bolnica	4380	4380	8760

GOSPODARSKA ISPLATIVOST

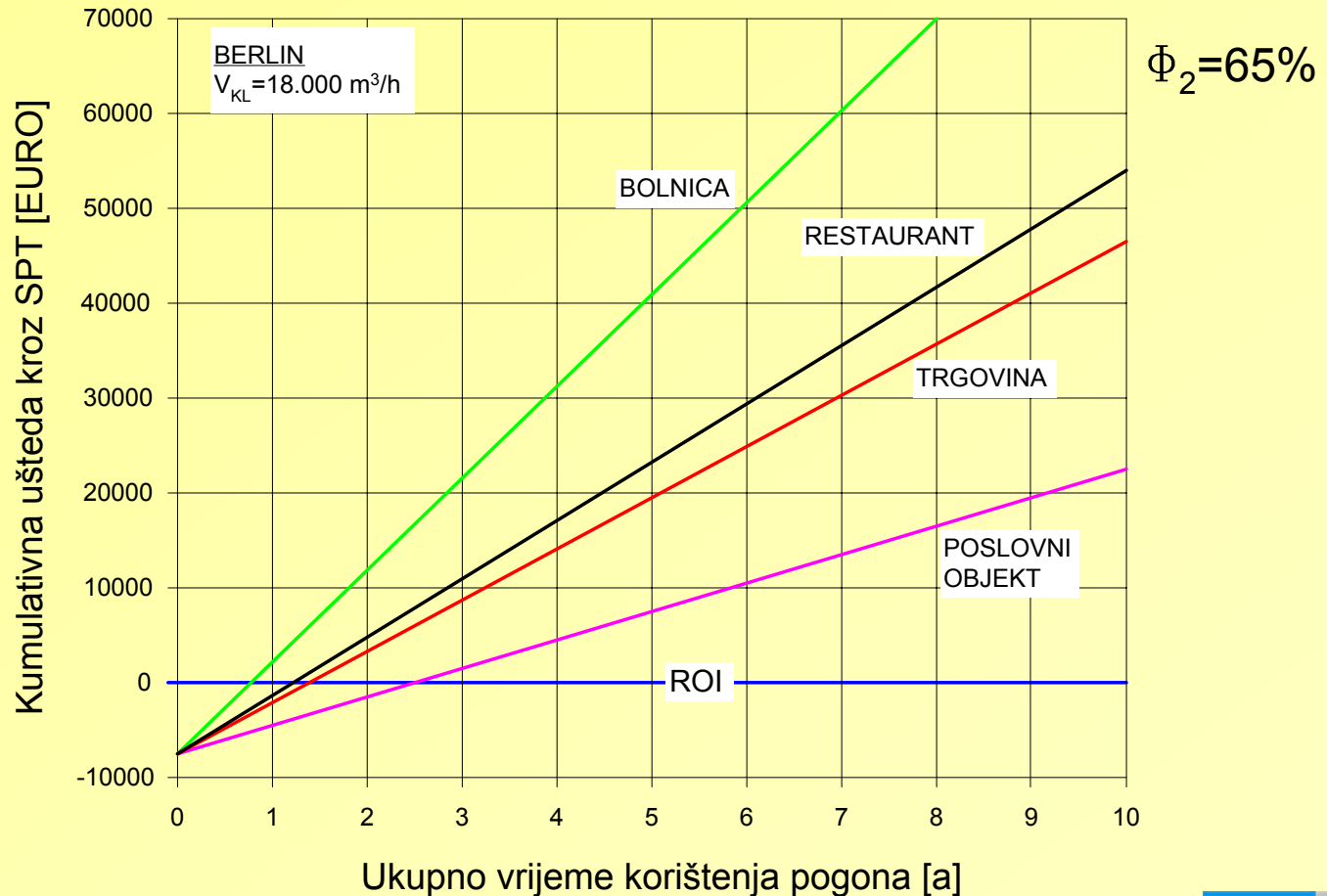
Karakteristična veličina:

VRIJEME AMORTIZACIJE
(eng. Return of Investment)

$$\text{ROI} = \frac{\text{Investicijski troškovi SPT}}{\text{Godišnja ušteda energije} - \text{Troškovi održavanja SPT}}$$

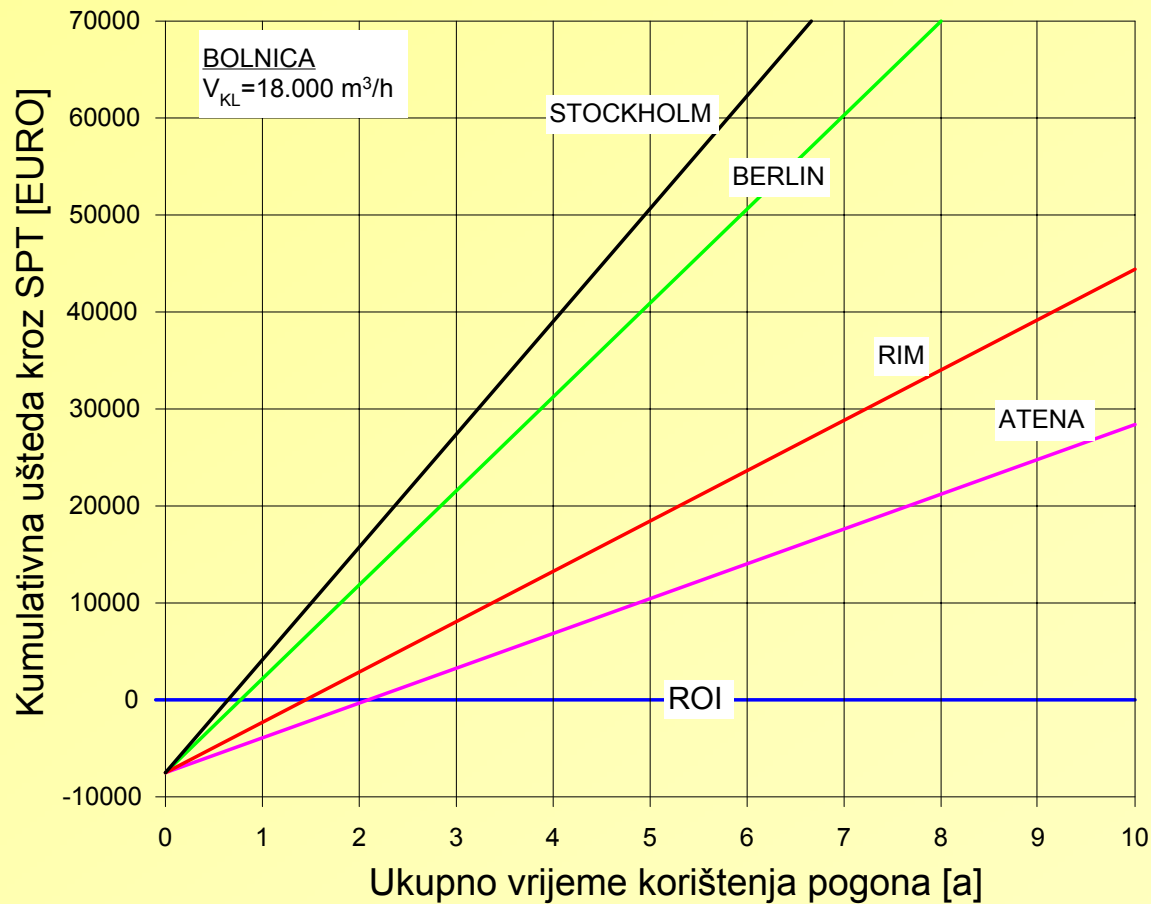
GOSPODARSKA ISPLATIVOST

Gospodarska isplativost SPT u ovisnosti o namjeni objekta i trajanju pogona



GOSPODARSKA ISPLATIVOST

Gospodarska isplativost SPT u ovisnosti o geografskoj lokaciji



BOLNICA
 $V_{KL} = 18.000 \text{ m}^3/\text{h}$

STOCKHOLM

BERLIN

RIM

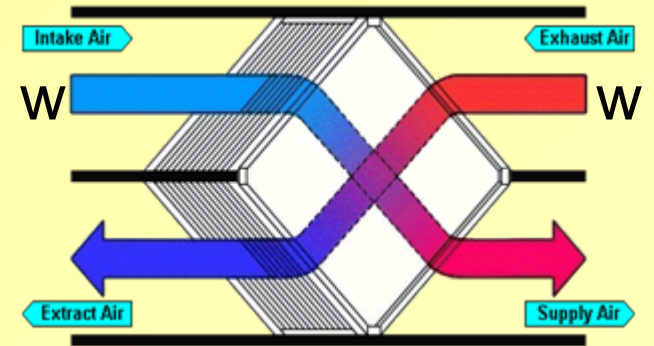
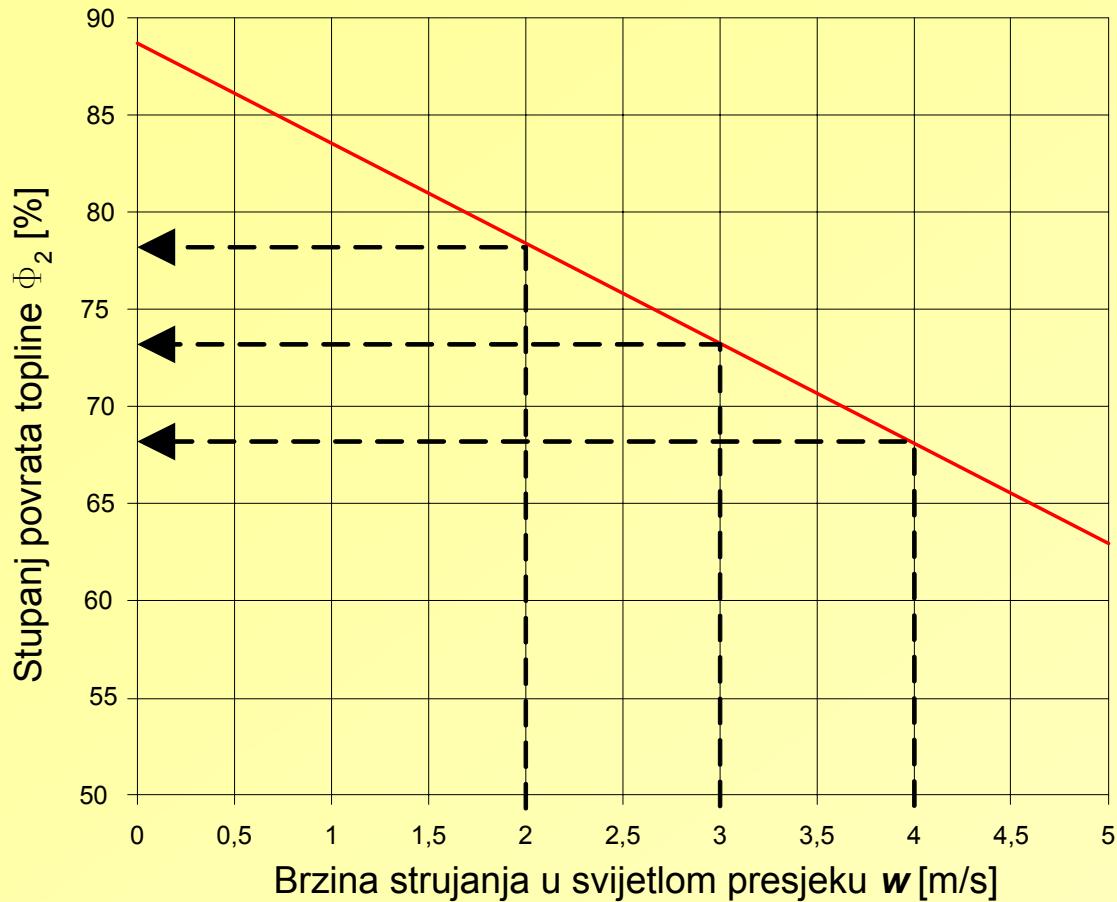
ATENA

ROI

$\Phi_2 = 65\%$
 $t_{OP} = 8760 \text{ h/a}$

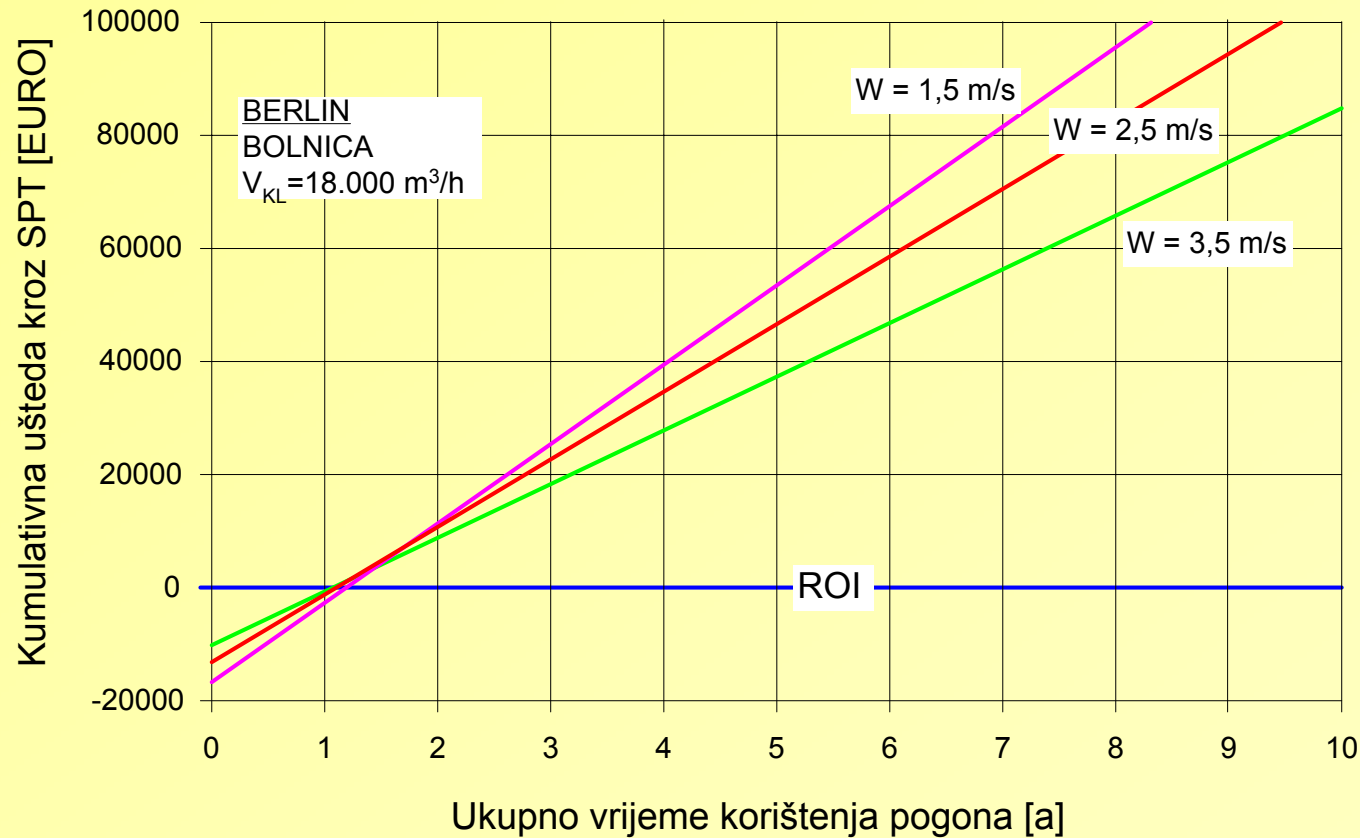
GOSPODARSKA ISPLATIVOST

Gospodarska isplativost SPT u ovisnosti o brzini strujanja zraka



GOSPODARSKA ISPLATIVOST

Gospodarska isplativost SPT u ovisnosti o brzini strujanja zraka



GOSPODARSKA ISPLATIVOST

Primjer

Ventilacija i toplozračno grijanje $\Phi_2=60\%$

- protok zraka $V_{KL}=10.000 \text{ m}^3/\text{h}$, $w=3.5 \text{ m/s}$
- trajanje pogona 8:00-18:00, 5 dana u tjednu
- tip pogona - 100% svježiji zrak
- učinak grijača 125kW
- cijena klasičnog GViK sustava (bez SPT) 150 EUR/kW
- cijena GViK sustava s npr. pločastim SPT 180 EUR/kW
- godišnji konzum topline 82 MWh/a
- cijena topline 30EUR/MWh

Vrsta troška	Trošak [EUR/a]	UKUPNI TROŠAK TOPLINE:	[EUR/a]
Postrojenje		- klasični sustav	2.460
-klasični sustav	18.750	- sustav sa SPT	1.470
-sustav sa SPT	22.750		
Toplinska energija			
- klasični sustav	2.460		
- sustav sa SPT 40%	980		
- održavanje i pogon SPT 20%	490		

$$ROI = \frac{22.750 - 18.750}{2.460 - 1.470} \approx 4 \text{ godina}$$

Povrat toplinske energije

Analize i praksa pokazuju:

1. Povrat toplinske energije pomoću sustava povrata topline u pravilu je **isplativ**.
2. Optimiranje stupnja povrata topline vezanjem SPT u seriju znatno povećava pad tlaka, što dovodi do produljenja vremena amortizacije (povrata investicije).
3. Gospodarska analiza SPT temelji se na pogonskim uvjetima GViK sustava, geografskoj lokaciji i namjeni objekta.

Povrat toplinske energije

U pravilu – DA!

Za optimalan izbor sustava provesti sveobuhvatnu analizu za konkretan slučaj ugradnje.