

IZMENJIVAČI TOPLOTE

ASISTENT: MILICA JANKOVIĆ

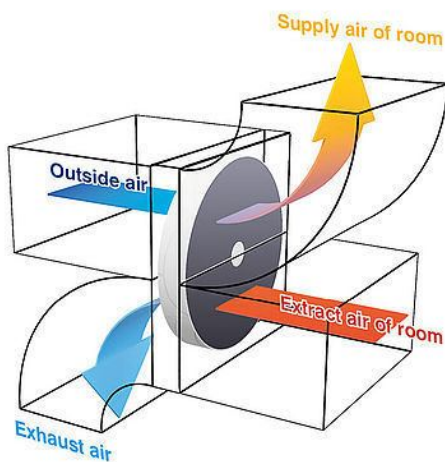
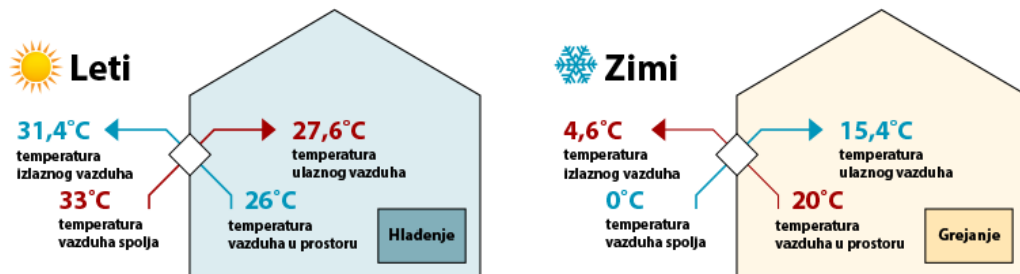
IZMENJIVAČI TOPLOTE

Izmenjivač toplote je uređaj koji služi za prenos toplotne energije (entalpije) između dva ili više fluida, između čvrste površine i tečnosti, ili između čvrstih čestica i tečnosti, koje se nalaze na različitim temperaturama i u međusobnom toplotnom kontaktu.

Tipične primene izmenjivača toplote uključuju zagrevanje ili hlađenje fluida, kao i isparavanje ili kondenzaciju jedno- ili višekomponentnih tokova fluida. Pored toga, izmenjivači toplote imaju široku primenu u industrijskim procesima kao što su:

- *donošenje ili odvođenje toplote iz procesa,
- *sterilizacija i pasterezacija,
- *frakcionisanje,
- *destilacija,
- *koncentrovanje i kristalizacija,
- *kontrola temperature procesne tečnosti.

Zahvaljujući svojoj univerzalnosti i efikasnosti, izmenjivači toplote se koriste u različitim industrijama – od prehrambene i farmaceutske, do hemijske, energetske i naftne industrije.



- U mnogim izmenjivačima toplote, fluide razdvaja površina za prenos toplote, pri čemu je idealno da se fluide ne mešaju. Takvi izmenjivači nazivaju se izmenjivačima sa direktnim prenosom toplote, ili jednostavno – **REKUPERATORI**. Kod rekuperatora, toplotna energija se prenosi direktno kroz čvrstu površinu koja razdvaja topli i hladni fluid, pri čemu oba fluida istovremeno struje kroz izmenjivač.
- Nasuprot tome, izmenjivači sa povremenom razmenom toplote, u kojima dolazi do naizmeničnog prolaska toplih i hladnih fluida kroz istu strukturu (matricu), nazivaju se izmenjivačima sa indirektnim prenosom toplote, odnosno – **REGENERATORI**. U ovim sistemima, materijal unutar izmenjivača prvo apsorbira toplotnu energiju iz toplijeg fluida, a zatim je oslobađa hladnijem fluidu u sledećem ciklusu.

Rekuperatori (izmenjivači sa direktnim prenosom toplote)

Prednosti:

- Kontinuiran prenos toplote bez mešanja fluida
- Visoka efikasnost u stabilnim uslovima rada
- Jednostavna konstrukcija i pouzdanost
- Lako se održavaju (nema pokretnih delova)

Mane:

- Manje efikasni pri velikim temperaturskim razlikama ako je razmena kratkotrajna
- Ograničenja u radu sa zagađenim ili viskoznim fluidima
- Potrebna veća površina za efikasan prenos toplote

Regeneratori (izmenjivači sa indirektnim prenosom toplote)

Prednosti:

- Veća efikasnost u cikličnim ili periodičnim procesima
- Moguće skladištenje i naknadno oslobađanje toplote
- Pogodni za visoke temperature (npr. u metalurgiji)

Mane:

- Kompleksnija konstrukcija (posebno kod rotacionih regenerativnih izmenjivača)
- Prisustvo pokretnih delova povećava potrebu za održavanjem
- Potencijalno mešanje fluida pri zaptivanju kod rotacionih modela

-
- Izmenjivač toplote sastoji se od dva osnovna sklopa: elemenata za razmenu toplote i elemenata za distribuciju fluida.
 - Elementi za razmenu toplote uključuju jezgro ili matricu, koje sadrže površine kroz koje se prenosi toplota između fluida. S druge strane, elementi za distribuciju fluida obuhvataju kolektore, razdeljivače, rezervoare, kao i ulazne i izlazne mlaznice, cevi i zaptivke, koji omogućavaju pravilan tok fluida kroz uređaj.
 - U većini slučajeva, izmenjivači toplote nemaju pokretne delove, što ih čini jednostavnim za održavanje i pouzdanim u radu.
 - Ipak, postoje izuzeci – na primer, rotacioni regenerativni izmenjivači toplote, kod kojih se matrica mehanički pokreće i rotira unapred određenom brzinom. Ovakva rotacija omogućava efikasnu i povremenu razmenu toplote između toplog i hladnog fluida.

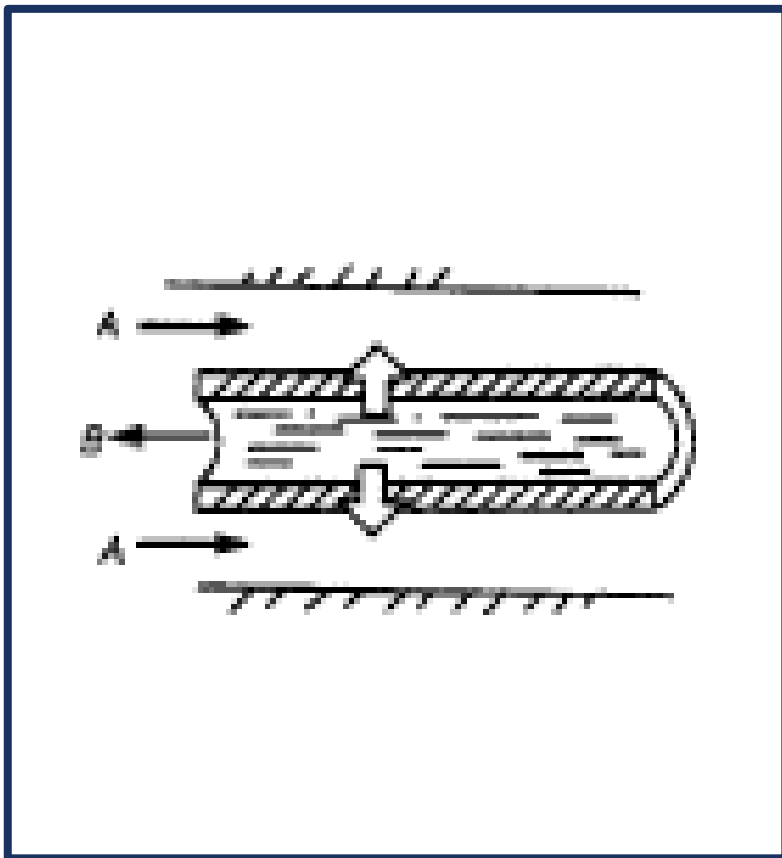
KLASIFIKACIJA PREMA PROCESIMA PRENOSA

- Izmenjivači toplote se, prema načinu prenosa toplote, dele na izmenjivače sa indirektnim i direktnim kontaktom.

Izmenjivači toplote sa indirektnim kontaktom

Kod ovih izmenjivača, fluide međusobno razdvaja čvrsta, nepropusna pregrada, kroz koju se toplota prenosi. U ovakvom sistemu nema direktnog mešanja fluida – oni ostaju fizički odvojeni tokom celog procesa.

- Toplota se prenosi kontinuirano kroz zid iz jednog fluida u drugi, ili privremeno – tako što se najpre skladišti u zidu izmenjivača, a zatim prenosi na drugi fluid. Ovaj princip prenosa omogućava stabilan i kontrolisan proces, što je posebno važno u aplikacijama gde nije dozvoljeno mešanje medija (npr. u prehrambenoj, farmaceutskoj i hemijskoj industriji).



Izmenjivači toplote sa direktnim kontaktom

- Kod izmenjivača sa direktnim kontaktom, dve struje fluida dolaze u neposredan fizički kontakt, razmenjuju toplotu i nakon toga se razdvajaju. Za razliku od indirektnih izmenjivača, ovde ne postoji pregradni zid između fluida, što omogućava efikasniji prenos toplote, ali pod uslovom da je mešanje fluida prihvatljivo ili poželjno u datoj primeni.
- Ovi izmenjivači se često koriste u procesima gde dolazi do prenosa mase uz prenos toplote, kao što su:
 - isparavanje (hlađenje isparavanjem),
 - apsorpcija,
 - refluks i rektifikacija u procesima destilacije.
- Zahvaljujući direktnom kontaktu, ovi sistemi omogućavaju brzu i intenzivnu razmenu energije, ali se njihova primena ograničava na slučajeve kada kontakt fluida ne ugrožava krajnji proizvod ili proces.

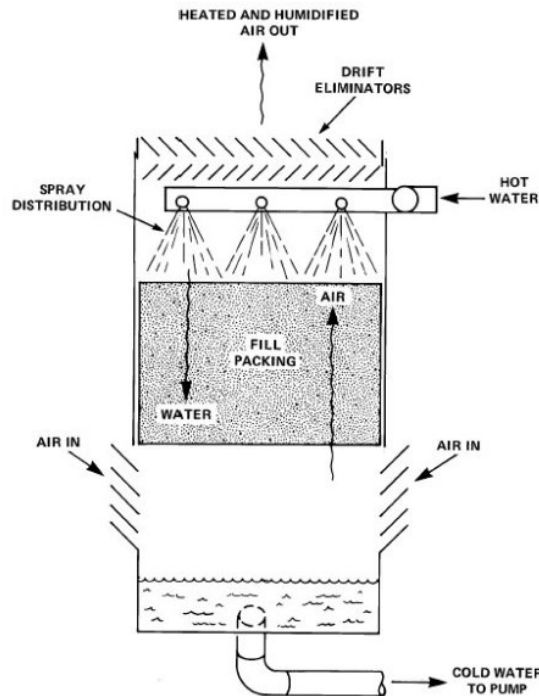


Fig. 3 Direct-Contact or Open Evaporative Cooling Tower

KLASIFIKACIJA PREMA BROJU FLUIDA

- Većina procesa grejanja, hlađenja, dovođenja i odvođenja toplote podrazumeva prenos toplote između dva fluida, zbog čega su dvofluidni izmenjivači toplote najčešći u praksi. U takvim sistemima, jedan fluid predaje toplotu, dok drugi prima, pri čemu su često razdvojeni čvrstom pregradom (kod indirektnih izmenjivača) ili u direktnom kontaktu (kod direktnih izmenjivača).
- U složenijim industrijskim aplikacijama koriste se i trifluidni izmenjivači toplote, u kojima učestvuju tri fluida u međusobnoj razmeni toplote. Ovi sistemi nalaze primenu u specijalizovanim oblastima, kao što su:
 - kriogeni procesi,
 - procesi odvajanja vazduha i helijuma,
 - prečišćavanje i ukapljivanje vodonika,
 - sinteza amonijaka i drugih gasova.
- U posebno kompleksnim hemijskim procesima, razvijeni su i izmenjivači toplote sa više od tri fluida – čak i sa do 12 tokova fluida. Ovi izmenjivači omogućavaju višestruke simultane prenose toplote i koriste se tamo gde je potreban visoko integrisan i efikasan proces.

KLASIFIKACIJA PREMA KONSTRUKCIJSKIM OSOBINAMA

Izmenjivači toplote se često klasifikuju prema **konstruktivnom rešenju**, jer njihov oblik i struktura direktno utiču na efikasnost prenosa toplote, održavanje i primenu u praksi.

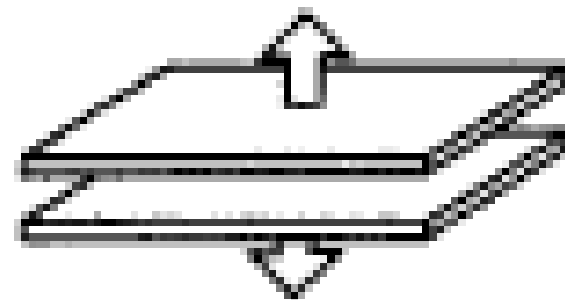
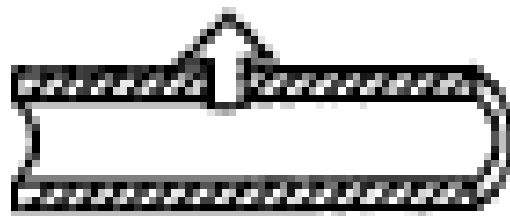
Četiri osnovna tipa konstrukcije izmenjivača toplote su:

1. Pločasti izmenjivači toplote

Sastoje se od niza tankih, talasastih metalnih ploča kroz koje protiču fluide. Zahvaljujući velikoj površini za prenos toplote i kompaktnosti, idealni su za primenu u prehrambenoj, farmaceutskoj i HVAC industriji.

2. Cevasti izmenjivači toplote

Najčešće korišćeni tip u industriji. Sastoje se od snopa cevi smeštenih unutar omotača, kroz koje protiče jedan fluid, dok drugi prolazi oko cevi. Pogodni su za visoke pritiske, temperature i zagađene fluide.

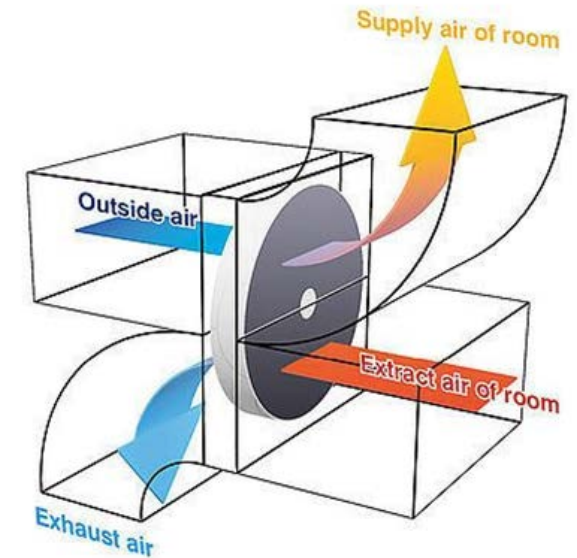


3. Izmenjivači sa rebrastim površinama

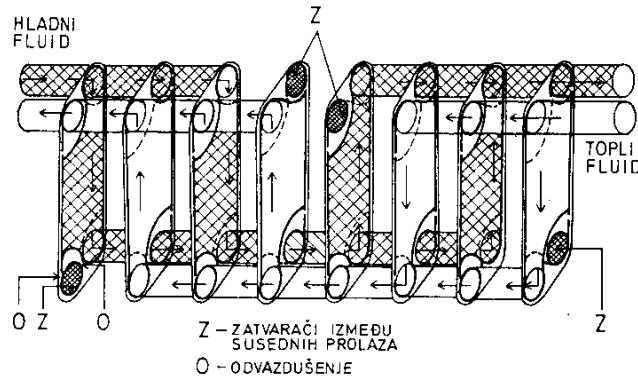
Kod ovih izmenjivača, na osnovnu površinu dodaju se rebra kako bi se povećala površina za prenos toplote. Često se koriste u sistemima za klimatizaciju, rashladnim uređajima i automobilima.

4. Regenerativni izmenjivači toplote

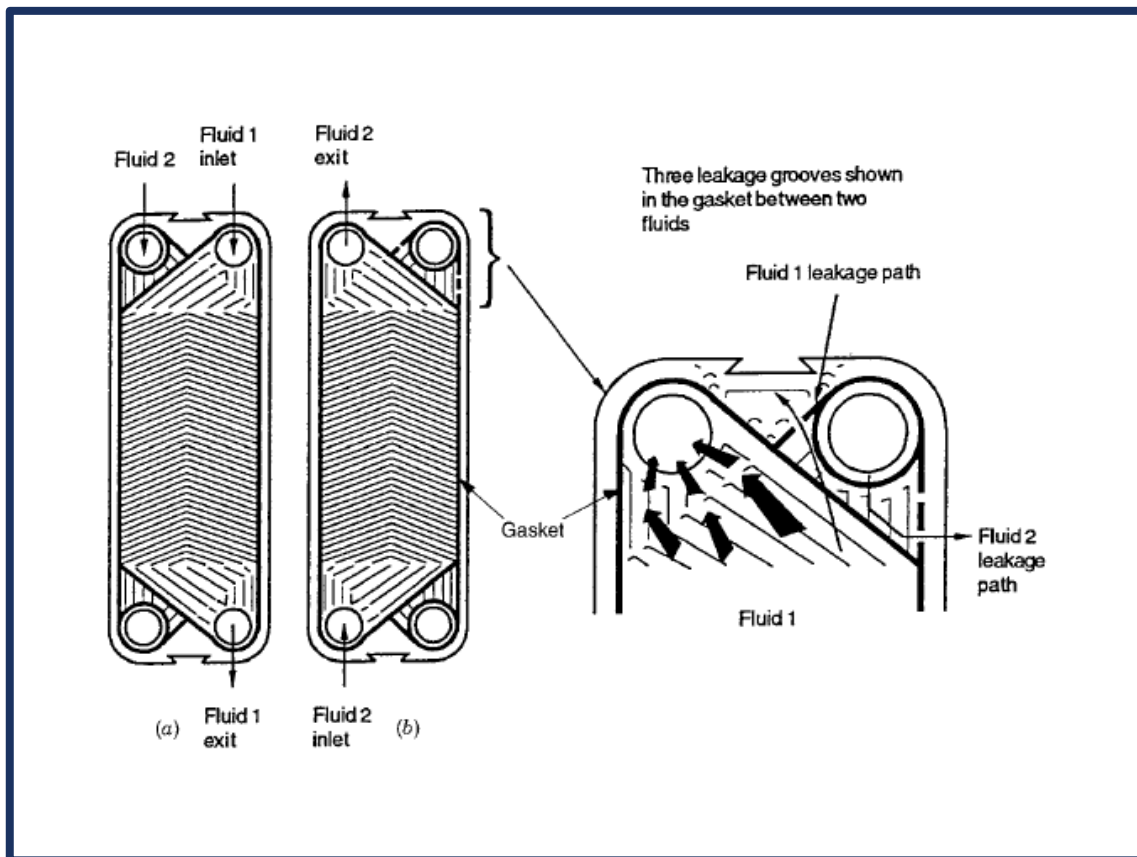
Funkcionišu tako što se toplota iz jednog fluida najpre privremeno skladišti u čvrstom materijalu (matrici), a zatim se prenosi na drugi fluid. Koriste se u procesima sa cikličnim protokom, kao što su visoke peći i sistemi za povraćaj toplote iz izduvnih gasova.



PLOČASTI IZMENJVAČI TOPLOTE

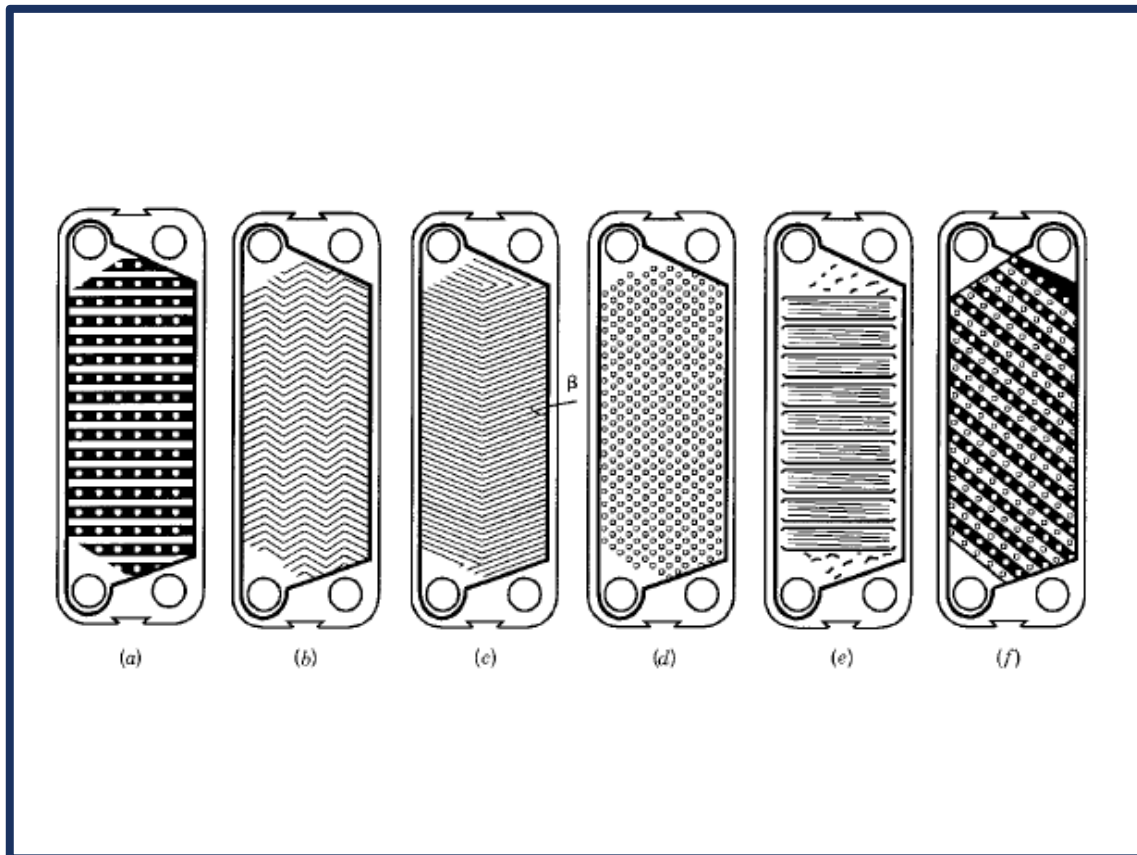


- Pločasti izmenjivači toplote sastoje se od niza tanko-profilisanih, paralelno postavljenih metalnih ploča, koje razdvajaju grejni fluid od fluida koji se greje. Fluide protiču između ploča u naizmeničnim slojevima, što omogućava veoma efikasan prenos toplote.
- Zahvaljujući relativno velikim brzinama fluida koje se mogu postići u uskim kanalima između ploča, ovi izmenjivači ostvaruju visoke vrednosti koeficijenta prenosa toplote, što ih čini izuzetno pogodnim za procese gde je potreban efikasan prenos energije na malom prostoru.
- Međutim, osnovni nedostaci pločastih izmenjivača toplote su:
 - otežano zaptivanje, naročito pri visokim pritiscima i temperaturama, zbog složenih spojeva između ploča,
 - relativno visoki padovi pritiska u oba fluida (grejnom i grejanom), što može zahtevati snažnije pumpe i povećati potrošnju energije.
- Uprkos tim ograničenjima, pločasti izmenjivači se široko koriste u industrijama gde je potrebna kompaktna oprema sa visokom efikasnošću – kao što su prehrambena industrija, farmacija, sistemi daljinskog grejanja i klimatizacije (HVAC).



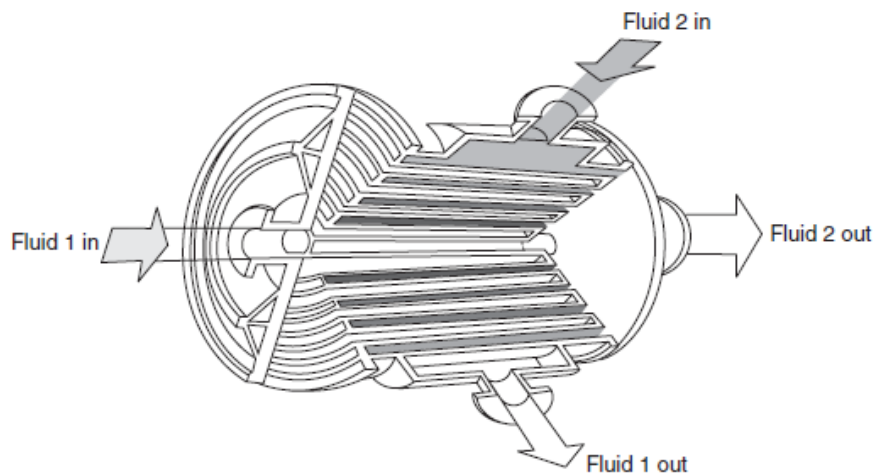
- Svaka ploča u pločastim izmenjivačima toplote izrađena je utiskivanjem ili valjanjem valovitog (ili talasastog) površinskog paterna na metalnom limu. Ovaj oblik omogućava poboljšanu tok fluida kroz uređaj, što doprinosi boljoj efikasnosti prenosa toplote.
- Na jednoj strani svake ploče predviđeni su posebni žlebovi duž periferije ploče i oko otvora za zaptivače. Ovi žlebovi igraju ključnu ulogu u formiranju čvrstih i efikasnih spojeva između ploča, sprečavajući curenje fluida i obezbeđujući pravilnu cirkulaciju. Zaptivači su dizajnirani tako da obezbede maksimalnu hermetičnost, čime se smanjuje rizik od mešanja fluida i gubitka energije.
- Ovaj detalj konstrukcije, uz valovitu površinu ploča, omogućava povećanje površine za prenos toplote, čineći pločaste izmenjivače toplote efikasnijim u procesu grejanja i hlađenja.

Tipične geometrije ploča u pločastim izmenjivačima toplote često imaju valovite uzorke, koji su prikazani na slici. Na globalnom nivou, razvijeno je više od 60 različitih obrazaca ovih valovitih površina, svaki sa specifičnim karakteristikama koje omogućavaju optimalnu efikasnost prenosa toplote u različitim industrijskim aplikacijama.



- Naizmenične ploče u ovim izmenjivačima toplote se sastavljaju tako da se valovi na uzastopnim pločama dodiruju ili ukrštaju, čime se stvara mehanička potpora paketu ploča kroz veliki broj kontaktnih tačaka. Ovaj dizajn pruža stabilnost i čvrstinu celokupnoj strukturi, što je posebno važno pri visokim pritiscima ili temperaturama.
- Prolazi između ploča postaju uski, isprekidani i vijugavi, što doprinosi povećanju turbulencije fluida i ubrzava razmenu toplote. Ovaj dizajn poboljšava brzinu prenosa toplote, čineći pločaste izmenjivače toplote efikasnijim u postizanju željenih temperaturnih uslova.

SPIRALNI PLOČASTI IZMENJIVAČI TOPLOTE



- Spiralni pločasti izmenjivač toplote sastoji se od dve relativno dugačke trake lima, obično opremljene zavarenim klinovima koji obezbeđuju razmak između ploča. Ove trake su spiralno omotane oko podeljenog trna, čime se formiraju dva spiralna kanala za dve tečnosti, kao što je prikazano na slici.
- Ivice naizmeničnog prolaza su zatvorene, što znači da je svaki kanal odvojeni sistem, gde svaka tečnost ima dugački, pojedinačni prolaz raspoređen unutar kompaktne spirale. Ovaj dizajn omogućava efikasan prenos toplote kroz uske i turbulentne kanale.
- Da bi izmenjivač bio funkcionalan, na svaki kraj se postavljaju poklopci, čime se zatvara sistem i omogućava pravilna distribucija fluida.
- Za ovaj tip izmenjivača može se koristiti bilo koji metal koji se može hladno oblikovati i zavariti. Uobičajeni metali koji se koriste su ugljenični čelik i nerđajući čelik, koji obezbeđuju potrebnu čvrstinu i otpornost na koroziju u industrijskim uslovima.

CEVNI IZMENJIVAČI TOPLOTE

- Cevni izmenjivači toplote obično se sastoje od kružnih cevi, iako se u nekim specifičnim primenama koriste i eliptične, pravougaone ili okrugle/ravne uvijene cevi. Ovaj dizajn nudi značajnu fleksibilnost, jer se geometrija jezgra može lako prilagoditi promenom prečnika, dužine i rasporeda cevi, što omogućava optimizaciju sistema prema specifičnim zahtevima.
- Cevasti izmenjivači mogu biti dizajnirani za visoke pritiske u odnosu na okolnu sredinu, kao i za visoke razlike u pritiscima između fluida. Ovo ih čini idealnim za primene u kojima je potrebno izdržati teške radne uslove, poput industrijskih postrojenja sa visokim temperaturama i pritiscima.

- Cevasti izmenjivači se prvenstveno koriste za prenos toplote između tečnosti (tečnost-tečnost) i za procese u kojima je potrebno preći iz jedne faze u drugu (npr. kondenzacija ili isparavanje). Takođe se koriste u aplikacijama koje uključuju prenos toplote između gasa i tečnosti ili gasa i gasa, posebno kada su radne temperature i/ili pritisci izuzetno visoki ili kada obrastanje predstavlja ozbiljan problem na jednoj od strana fluida.
- Ovi izmenjivači se mogu klasifikovati u nekoliko tipova:
 - Cevovodni izmenjivači,
 - Dvocevni izmenjivači,
 - Spiralni cevni izmenjivači.

Svi ovi izmenjivači predstavljaju glavne površinske izmenjivače, osim kada se koriste rebra na spoljašnjim ili unutrašnjim stranama cevi, što dodatno poboljšava efikasnost prenosa toplote.

Najčešće korišćeni tipovi cevnih izmenjivača toplote

Među cevnim izmenjivačima toplote, najčešće se koriste sledeći tipovi:

1. Izmenjivači tipa "cev u cevi"

Ovaj tip izmenjivača sastoji se od jedne cevi koja je postavljena unutar druge, pri čemu tečnosti protiču kroz unutrašnju i spoljašnju cev. Ovaj dizajn omogućava visok pritisak i često se koristi u aplikacijama sa visokim temperaturama i specifičnim radnim uslovima.

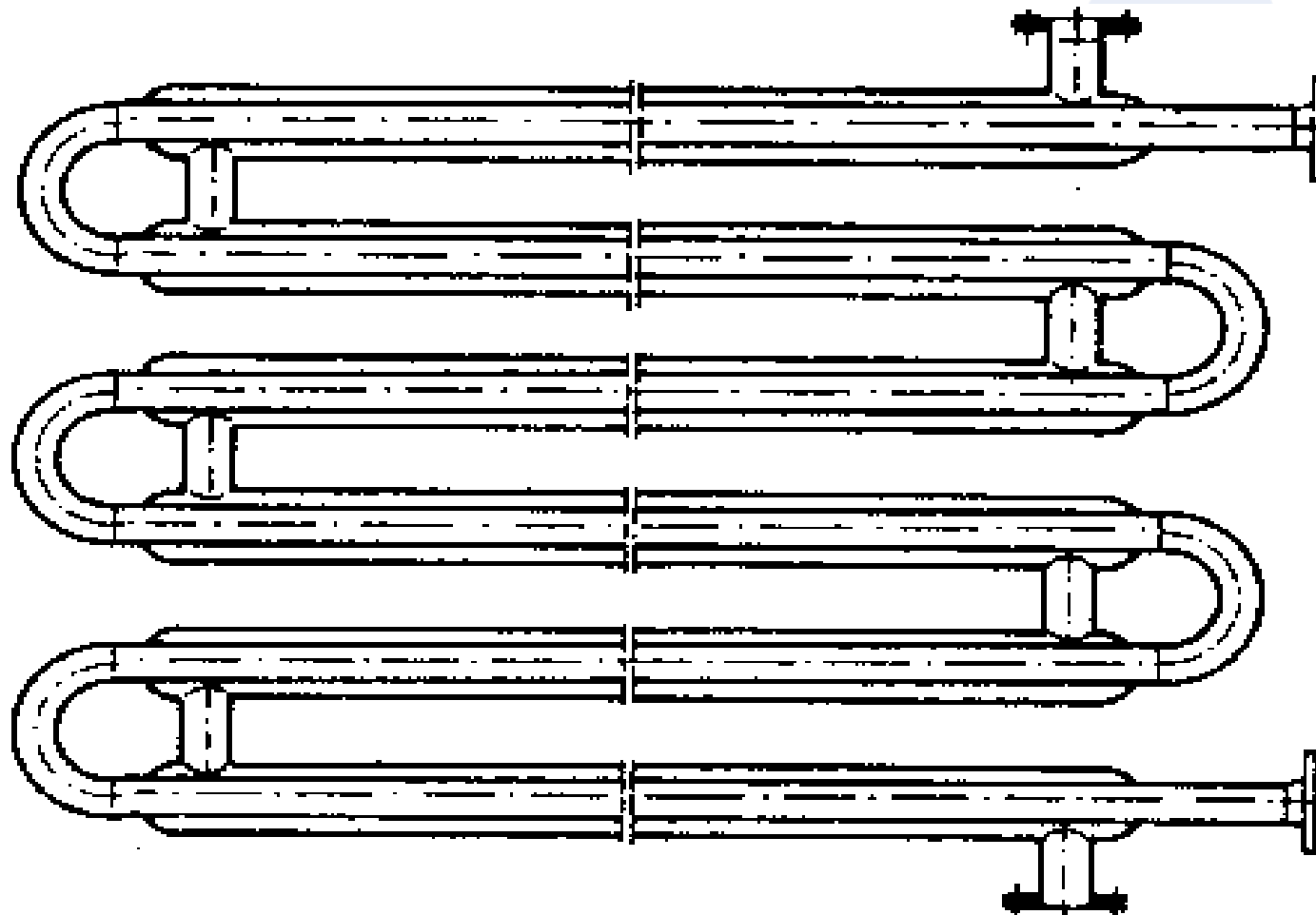
2. Zmijasti izmenjivači

Zmijasti izmenjivači toplote koriste uvijene cevi u obliku spirale, što omogućava kompaktne dimenzije i efikasnu cirkulaciju fluida. Ovaj dizajn je posebno koristan za visoke pritiske i temperaturne razlike, kao i za procese koji zahtevaju visoku turbulenciju za bolji prenos toplote.

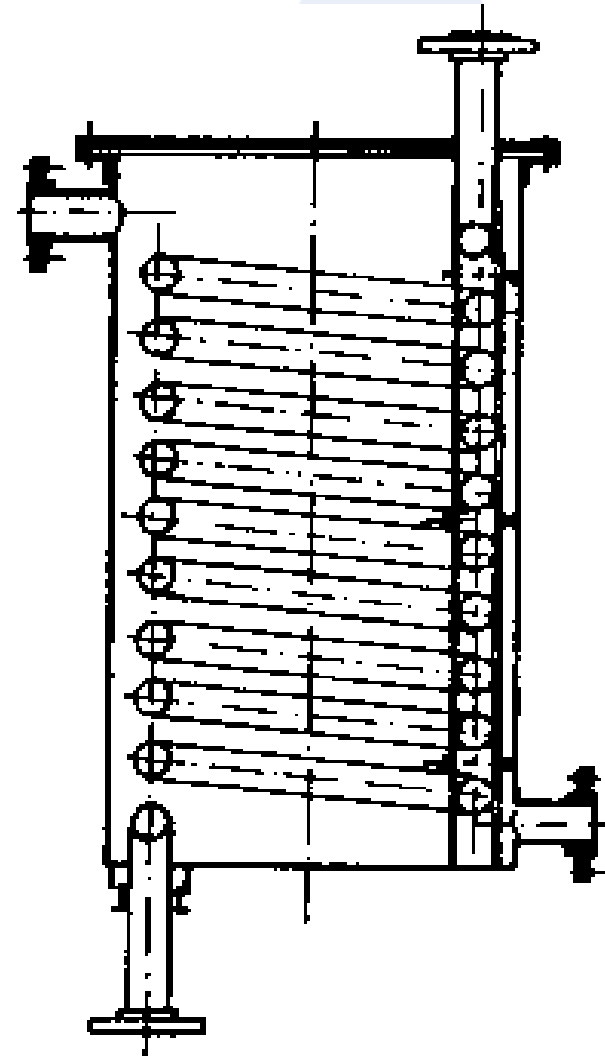
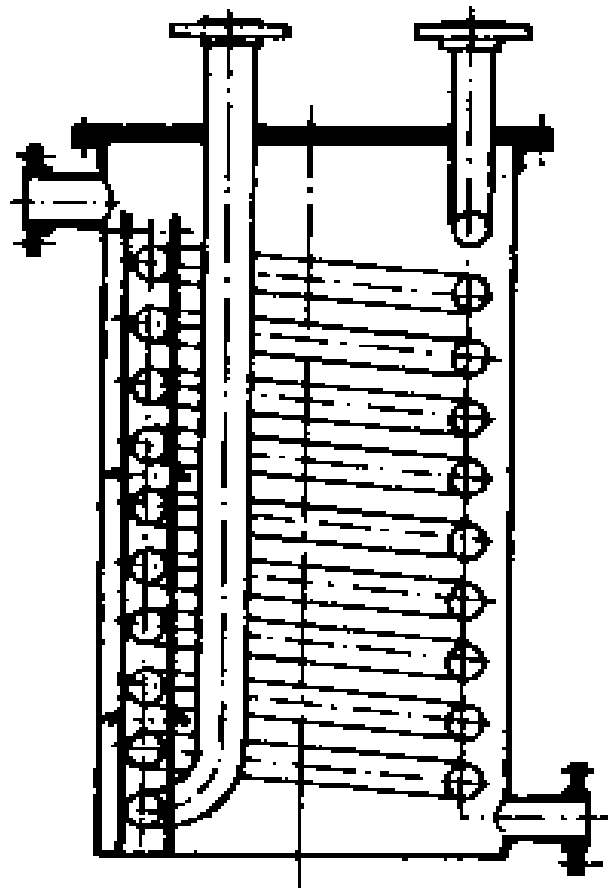
3. Izmenjivači sa omotačem

Ovi izmenjivači se sastoje od jedne ili više cevi unutar omotača u kojem se nalazi drugi fluid. Omotač može biti linični ili spiralni, a ovaj dizajn je idealan za primene sa različitim temperaturama i fluidima sa velikim razlikama u viskozitetu.

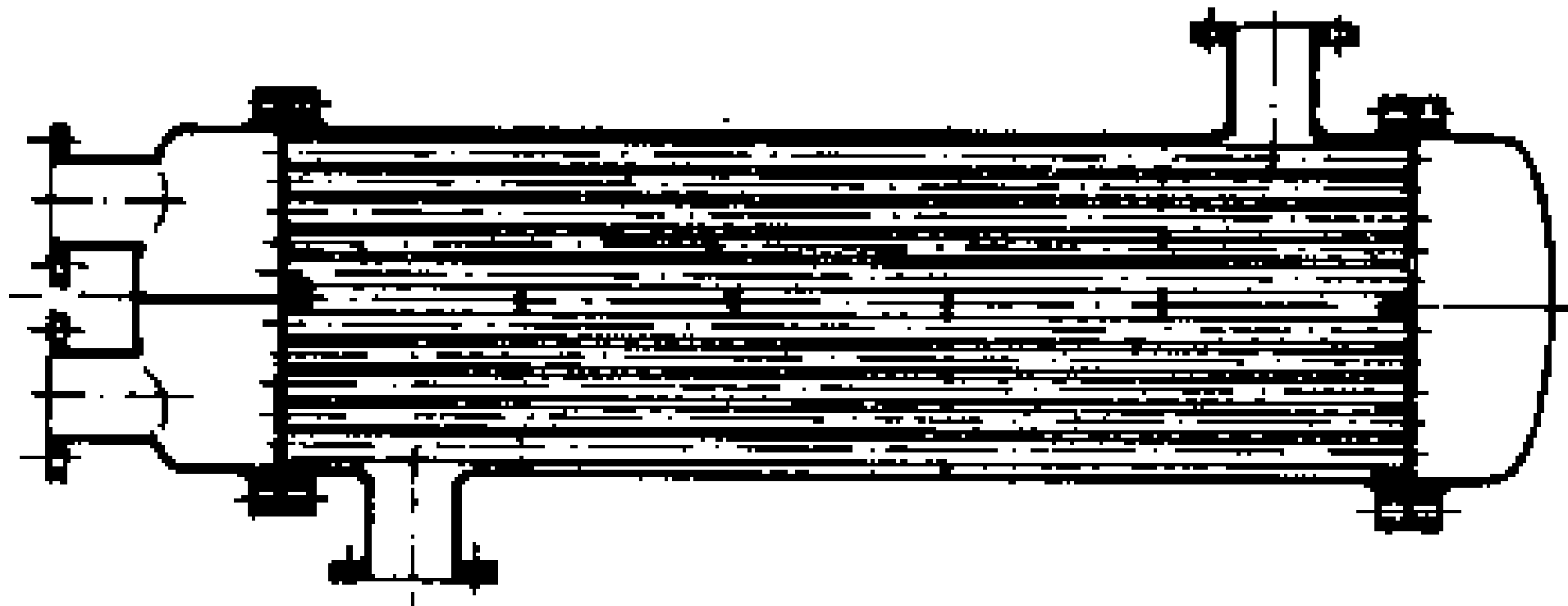
Izmenjivači timpa "cev u cev"

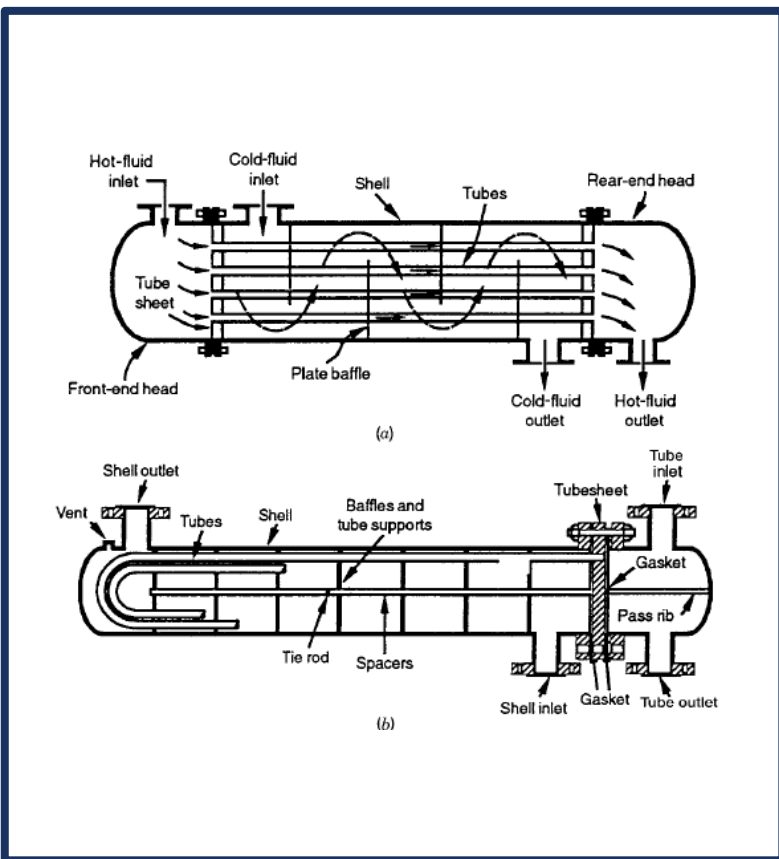


Spiralni (zmijasti) izmenjivači toplote



Izmenjivači sa omotačem

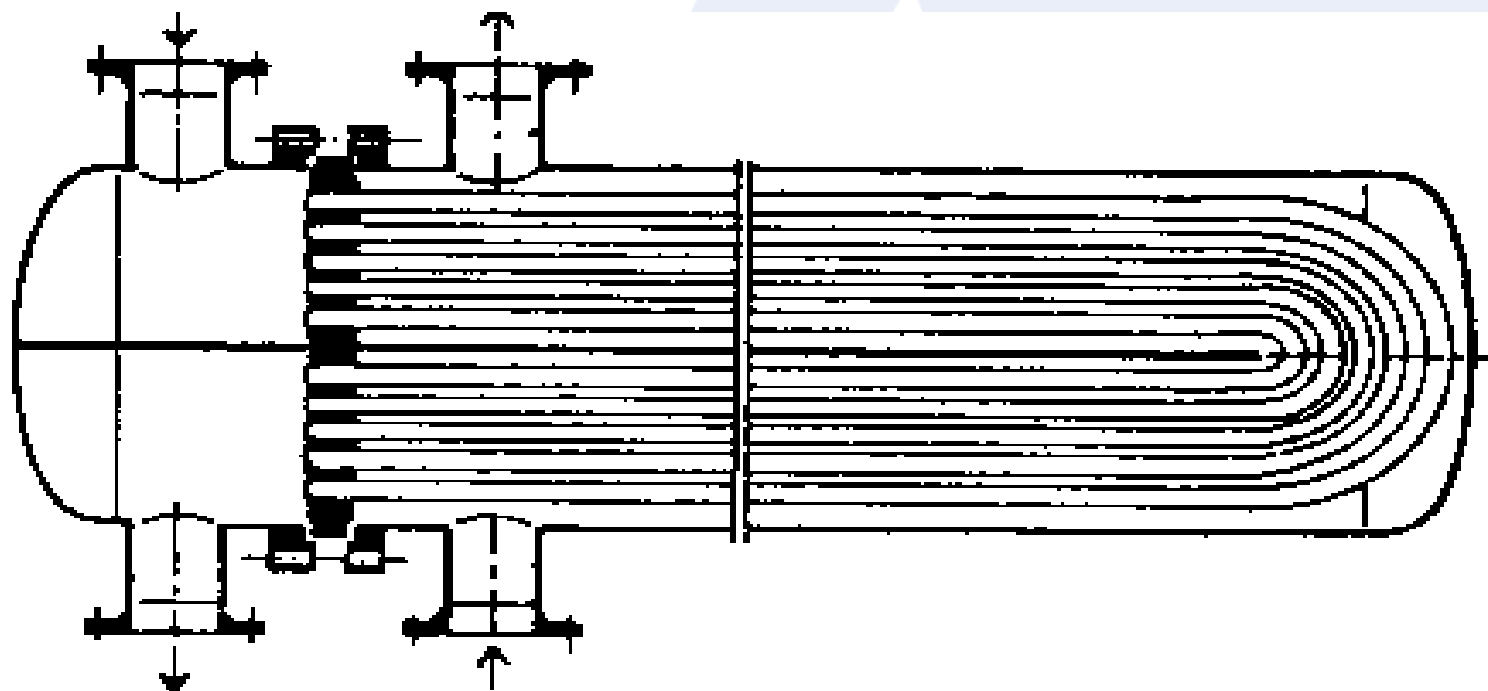




■ **Cevni izmenjivači toplote sa omotačem (BEM) sa jednim prolazom ljuske i jednim prolazom cevi**
 Ovaj tip izmenjivača toplote se sastoji od jedne cevi unutar omotača, kroz koju prolazi tečnost, dok druga tečnost protiče kroz prostor između omotača i cevi. U ovom slučaju, oba fluida prolaze kroz jedan prolaz unutar omotača i cevi. Ovi izmenjivači su često korišćeni u industrijama koje zahtevaju jednostavan prenos toplote, uz relativno niske pritiske i temperaturne razlike.

■ **Cevni izmenjivači toplote sa omotačem (BEU) sa jednim prolazom ljuske i dva prolaza cevi**
 Ovaj tip izmenjivača ima jedan prolaz ljuske (omotača) i dva prolaza cevi. Fluidi se kreću kroz dva prolaza unutar cevi, dok druga tečnost cirkuliše između omotača i cevi. Ovaj dizajn omogućava veću efikasnost prenosa toplote u poređenju sa izmenjivačima sa jednim prolazom, jer se povećava površina za prenos toplote i optimizuje tok fluida.

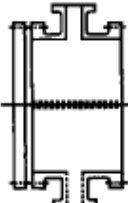
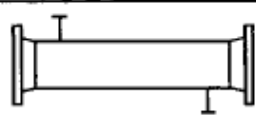
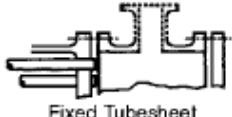
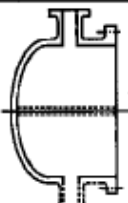
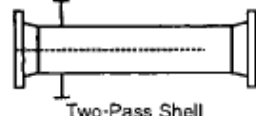
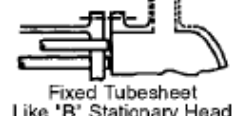
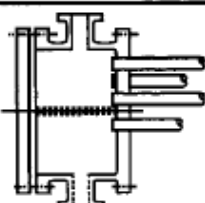
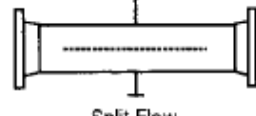
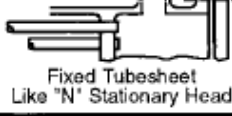
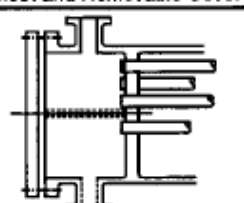
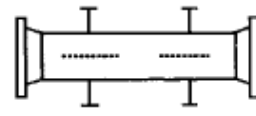
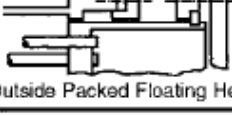
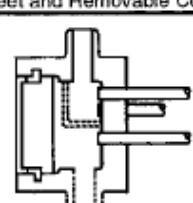
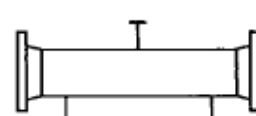
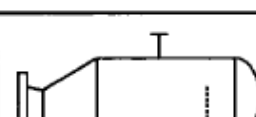
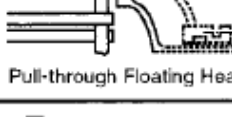
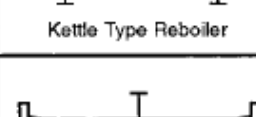
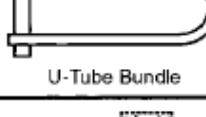
Nedostatak konstrukcije izmenjivača toplote sa nepokretnim cevnim pločama, koji je vezan za pojavu termičkih naprezanja, prevazilazi se korišćenjem snopova u obliku U-cevi ili izmenjivača sa takozvanom plivajućom glavom.



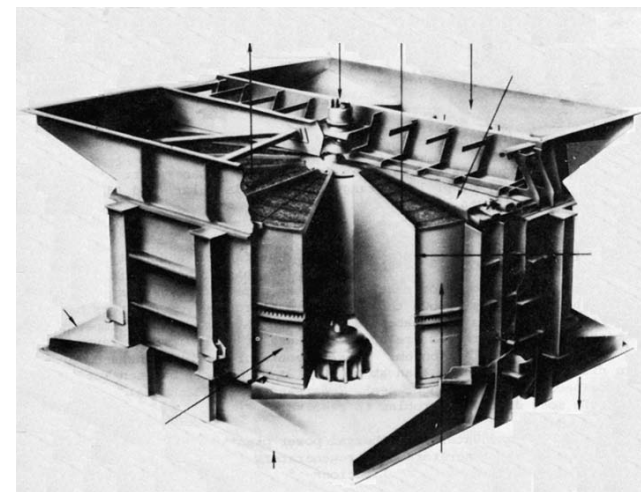
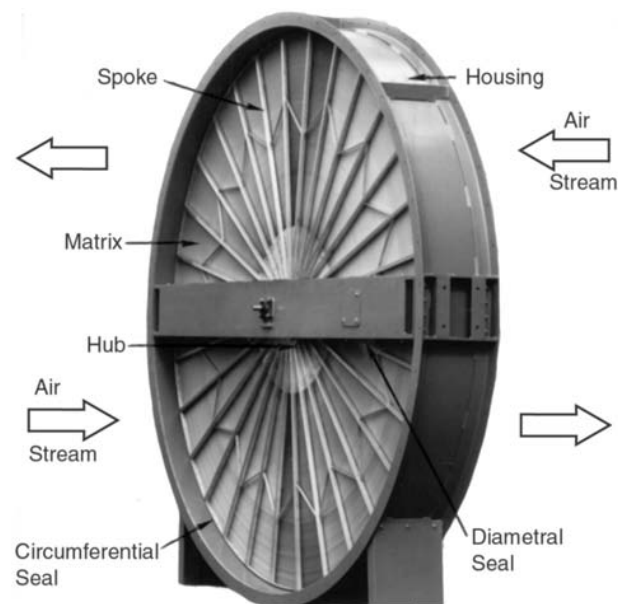
Standardni tipovi omotača i tipovi glava sa prednje i zadnje strane (TEMA, 1999)

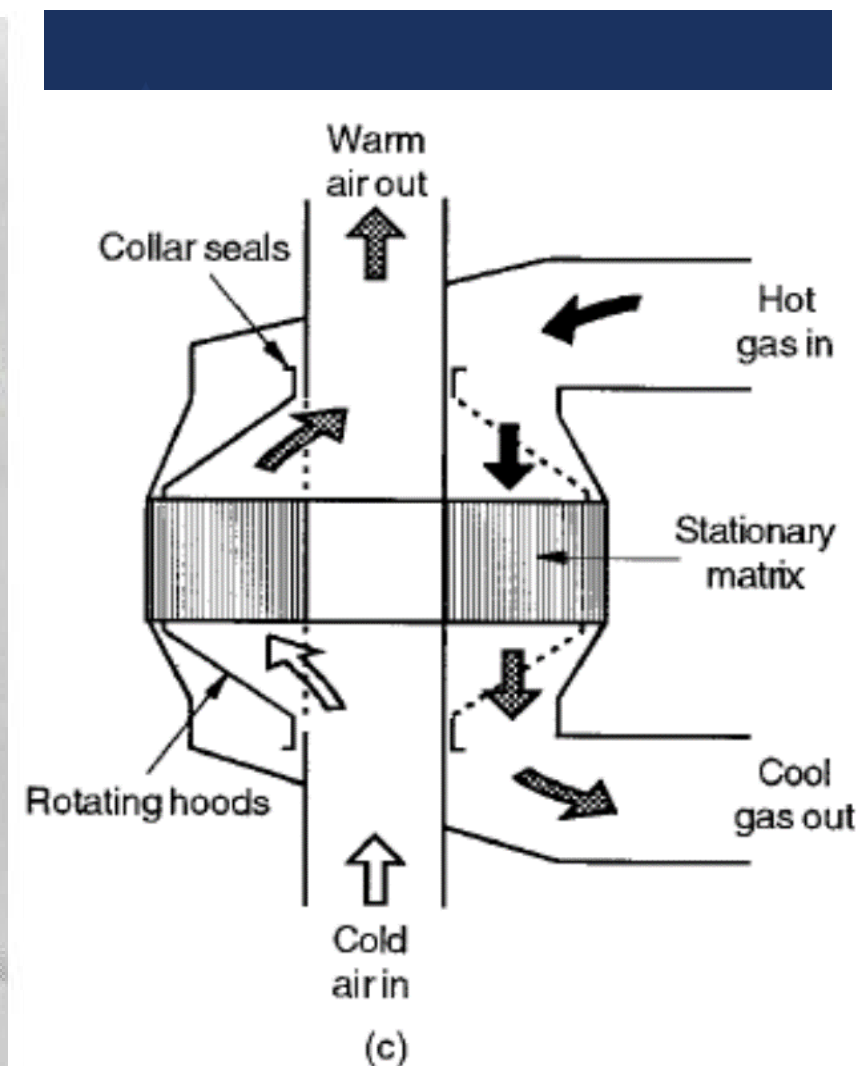
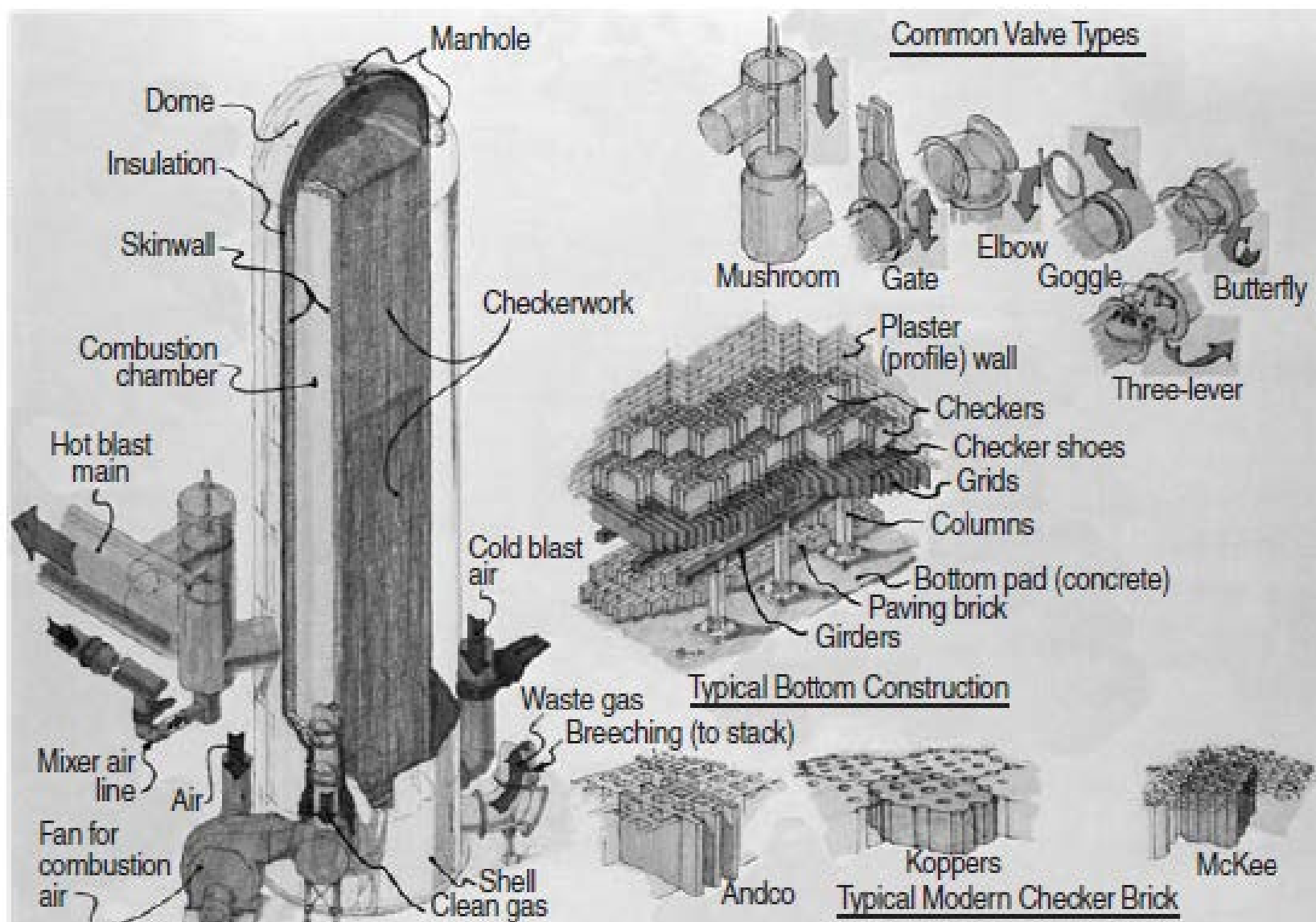
Izmenjivači toplote sa ljuskom i cevima klasifikovani su i izrađuju se u skladu sa široko korišćenim standardima, kao što su TEMA (Tubular Exchanger Manufacturers Association, 1999), DIN (nemački industrijski standardi), kao i drugi standardi u Evropi i širom sveta, uključujući ASME (Američko društvo mašinskih inženjera).

U ovom sistemu svaki izmenjivač označen je trocifrenom slovnom kombinacijom: prvo slovo označava tip prednje glave, drugo slovo označava tip omotača, a treće slovo tip zadnje glave. Neki uobičajeni tipovi izmenjivača sa ljuskom i cevima su: AES, BEM, AEP, CFU, AKT i AJW.

Front-End Stationary Head Types		Shell Types		Rear-End Head Types	
A	 Channel and Removable Cover	E	 One-Pass Shell	L	 Fixed Tubesheet Like 'A' Stationary Head
B	 Bonnet (Integral Cover)	F	 Two-Pass Shell with Longitudinal Baffle	M	 Fixed Tubesheet Like 'B' Stationary Head
C	 Channel Integral with Tube-Sheet and Removable Cover	G	 Split Flow	N	 Fixed Tubesheet Like 'N' Stationary Head
N	 Channel Integral with Tube-Sheet and Removable Cover	H	 Double Split Flow	P	 Outside Packed Floating Head
D	 Special High-Pressure Closure	J	 Divided Flow	S	 Floating Head with Backing Device
		K	 Kettle Type Reboiler	T	 Pull-through Floating Head
		X	 Crossflow	U	 U-Tube Bundle
				W	 Externally Sealed Floating Tubesheet

Regenerator je izmenjivač toplote akumulacionog tipa, kao što je ranije opisano. Površina ili elementi za prenos toplote u regeneratorsu obično se nazivaju matrica. Da bi radio kontinuirano, matrica se mora periodično premeštati u i iz fiksnih tokova gasova — kao kod rotacionog regeneratorsa — ili se protok gasa mora preusmeravati pomoću ventila kroz fiksne matrice, kao u slučaju regeneratorsa sa fiksnom matricom.





Regenerator sa fiksnom matricom

KLASIFIKACIJA NA OSNOVU MEHANIZMA ZA PRENOS TOPLOTE

Klasifikacija na osnovu mehanizma prenosa toplote

Osnovni mehanizmi prenosa toplote koji se koriste za prenos termalne energije sa fluida na jednoj strani zida izmenjivača su:

- **monofazna konvekcija** (prinudna ili slobodna),
 - **dvofazna konvekcija** (kondenzacija ili isparavanje, uz prinudnu ili slobodnu konvekciju),
 - i **kombinovani prenos** toplote konvekcijom i zračenjem.
- Bilo koji od ovih mehanizama, pojedinačno ili u kombinaciji, može biti aktivan sa svake strane izmenjivača.

Jednofazna konvekcija

se javlja sa obe strane kod sledećih dvofluidnih izmenjivača:
automobilskih hladnjaka, grejača putničkog prostora, regeneratora, interkulera, ekonomajzera i sličnih uređaja.

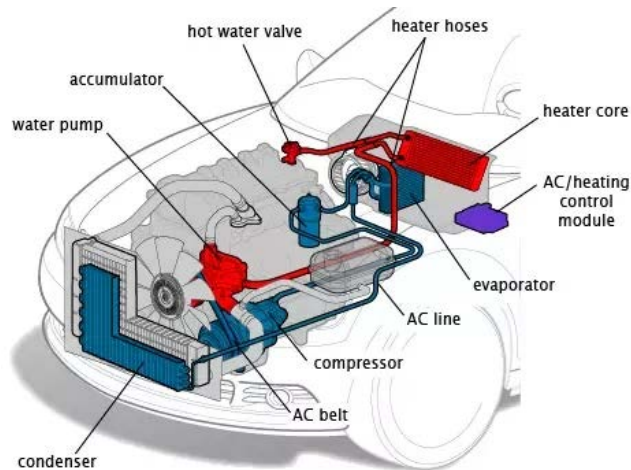
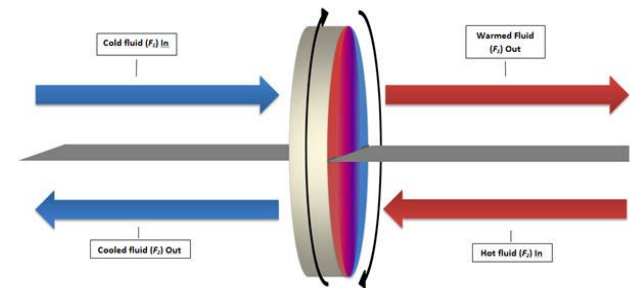


Image courtesy of ClearMechanic.com



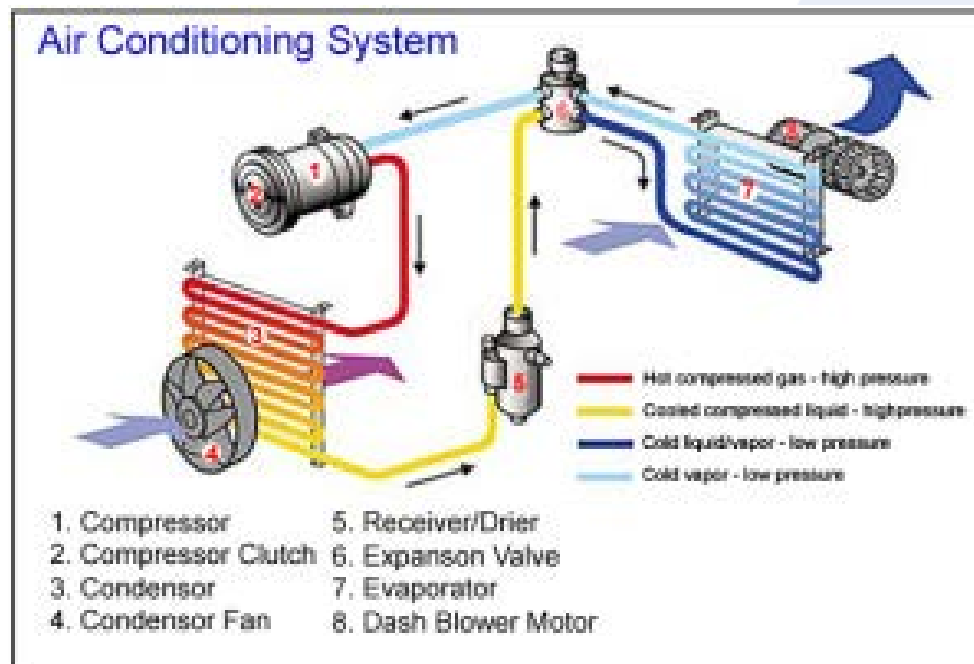
Jednofazna i dvofazna konvekcija u dvofluidnim izmenjivačima

Kombinacija jednofazne konvekcije na jednoj strani i dvofazne konvekcije na drugoj strani (sa ili bez pregrevanja, podhlađanja i prisustva nekondenzabilnih gasova) javlja se u sledećim dvofluidnim izmenjivačima toplote:

- kondenzatori u termoelektranama,
- automobilske i procesne kondenzatori,
- kondenzatori sa vazdušnim hlađenjem u termoelektranama,
- isparivači zagrevani gasom ili tečnošću,
- generatori pare,
- ovlaživači i odvlaživači, itd.

Dvofazna konvekција u izmenjivačima toplote

- Dvofazna konvekција podrazumeva prenos toplote između fluida koji menja agregatno stanje — obično iz tečnog u gasovito (isparavanje) ili iz gasovitog u tečno (kondenzacija). Ovaj proces je posebno efikasan jer se tokom promene faze oslobađa ili apsorbuje latentna toplota, što omogućava veliki prenos energije uz relativno male temperaturne razlike.



Vrste dvofazne konvekcije:

1. Isparavanje (evaporacija)

- Javlja se kada tečnost prima toplotu i prelazi u gasovitu fazu.
- Primer / isparivači u rashladnim sistemima (klima uređaji, zamrzivači, rashladne vitrine).
- Može biti uz:
 1. prinudnu konvekciju (kretanje fluida uz pomoć pumpe ili ventilatora),
 2. slobodnu konvekciju (kretanje izazvano razlikom u gustini zbog temperature).

2. Kondenzacija

- Javlja se kada para gubi toplotu i prelazi u tečno stanje.
- Primer / kondenzatori u termoelektranama, frižiderima, sistemima toplotnih pumpi.
- Postoji film kondenzacija (kondenzat formira film po površini) i kapljičasta kondenzacija (kapljice se formiraju direktno na površini).

3. Kombinovani režimi

- Neki izmenjivači rade u režimu kondenzacije na jednoj strani i isparavanja na drugoj, kao što su:
 - Isparivači klima uređaja (isparavanje rashladnog fluida sa jedne strane, kondenzacija vlage iz vazduha s druge),
 - Generatori pare u energetske postrojenjima (isparavanje vode pomoću toplote iz dimnih gasova ili drugog fluida),
 - Toplotne pumpe (jedna strana za kondenzaciju, druga za isparavanje, u zavisnosti od režima grejanja ili hlađenja).



**HVALA NA
PAŽNJI!**