

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Основне академске студије

Модул: Енергетика и процесна техника

Предмет: Пренос топлоте и масе

Број индекса: 704/2016

Милош П. Марковић
Савремене концепције размењивача
топлоте
завршни рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. Др Небојша Лукић - ментор
2. _____
3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог завршног рада кандидат треба да:

- Дефинише појам размењивача топлоте, објаснити њихову примену. Објаснити историјски развој.
- Класификовати размењиваче топлоте. Објаснити индиректне размењиваче топлоте, рекуперативне размењиваче топлоте, регенераторе као и размењиваче са флуидизованим слојем. Објаснити принципе рада директних размењивача топлоте као и њихово поређење са индиректним размењивачима топлоте.
- Објаснити плочасте размењиваче топлоте, где се они примењују, какав је њихов принцип рада. Лемљени размењивачи топлоте, размењивачи топлоте са заптивкама, плочасто добошасти размењивачи топлоте, спирални плочасти размењивачи топлоте као и ламеларни плочасти размењивачи топлоте.
- Упоредити плочасте размењиваче топлоте са цилиндричним. Објаснити који су размењивачи компактни.
- Објаснити савремену концепцију рекуператорских размењивача топлоте.

Препоручена литература:

[1] Лукић Н, Скрипте са предавања из предмета пренос топлоте и масе, Факултет инжењерских наука, Крагујевац, 2017.

[2] Бојић М., Хнатко Е., Термотехника, Машински факултет, Крагујевац, 1987.

[3] Kakaç S., Liu H., Pramuanjaroenkij A., Heat exchangers, CRC Press, New York, 2012.

Крагујевац, Јун 2017.

Ментор:
Др Небојша Лукић

САДРЖАЈ

УВОД.....	6
1 ТЕОРИЈСКЕ ОСНОВЕ РАЗМЕЊИВАЧА ТОПЛОТЕ.....	8
1.1 Појам и дефиниција разменјивача топлоте.....	9
1.2 Историјски развој	11
1.3 Примена размењивача топлоте	13
2 КЛАСИФИКАЦИЈА РАЗМЕЊИВАЧА ТОПЛОТЕ	16
2.1. Индиректни размењивачи топлоте	16
2.1.1. Регенератори	16
2.1.2. Рекуператори.....	17
2.1.3. Размењивачи топлоте са флуидизованим слојем	21
2.1.4. Основне једначине размене топлоте у размењивачу.....	22
2.2. Директни размењивачи топлоте.....	25
2.3. Поређење истосмерних и супротносмерних размењивача топлоте	26
2.4. Пад притиска у размењивачу топлоте	27
3 САВРЕМЕНЕ КОНЦЕПЦИЈЕ РЕКУПЕРАТОРСКИХ РАЗМЕЊИВАЧА ТОПЛОТЕ	35
3.1. Плочасти размењивача топлоте.....	35
3.1.1. Лемљени размењивачи топлоте	32
3.1.2. Размењивач топлоте са заптивкама	33
3.1.3. Плочасто добошасти размењивачи топлоте	33
3.1.4. Спирални плочасти размењивачи топлоте.....	35
3.1.5. Ламеларни плочасти размењивачи топлоте.....	36
3.1.6. Изрази за прорачун плочастог размењивача топлоте	38
3.2. Ваздушни размењивач топлоте	41
3.3. Размењивач топлоте цев и омотач	42
3.4. Размењивач топлоте за специјалне намене.....	43
4 ПРОРАЧУН КОЕФИЦИЈЕНТА ПРЕЛАЗА ТОПЛОТЕ КОД ЦЕВАСТИХ И ПЛОЧАСТИХ РАЗМЕЊИВАЧА ТОПЛОТЕ.....	44
4.1 Прва варијанта поређења коефицијента прелаза топлоте код цевастих и плочастих размењивача топлоте.....	46
4.2 Друга варијанта поређења коефицијента прелаза топлоте код цевастих и плочастих размењивача топлоте.....	48

4.3 Трећа варијанта поређења коефицијента прелаза топлоте код цевастих и плочастих размењивача топлоте.....	50
5 ЗАКЉУЧАК	52
6 ЛИТЕРАТУРА	53

Abstract

In this paper we present the basic principle, and ways of functions of heat exchangers. The most common and most usually, heat exchangers are determined. Beside tubular heat exchangers, special attentions are made plate heat exchanger, without a presence a contemporary way of life, would be inconceivable.

The comparison is show difference between direct and indirect heat exchangers, and special advantages of plate heat exchangers.

The modern conception of heat exchanger recuperator is also presented.

Wide applications in industry, household and tehnic, give it a special significance.

Key words: heat exchanger, tube heat exchanger, plate heat exchanger, applications of heat exchangers, industry.

Резиме:

У овом завршном раду су приказани основни принципи, начин рада и функционисање размењивача топлоте. Дефинисани су и класификовани најчешћи и најзаступљенији размењивачи топлоте. Поред цилиндричних размењивача топлоте посебну пажњу су заузели плочасти размењивачи топлоте, без чијег присуства савремен живот и индустрија би били другачији.

Приказано је поређење између директних и индиректних размењивача топлоте, као и посебне предности плочастих у односу на цилиндричне размењиваче топлоте.

Приказана је и савремена концепција рекуператорских размењивача топлоте.

Широка примена у индустрији, домаћинству, техници даје посебан значај размењивачима топлоте.

Кључне речи: Размењивачи топлоте, цилиндрични размењивачи топлоте, плочасти размењивачи топлоте, примена размењивача топлоте, индустрија.

УВОД

У данашње време свет и савремен живот, би био другачији без употребе размњивача топлоте, у разним сегментима, како у кућним условима тако и у индустријским постројењима. Свакодневно се сусрећемо са развојем што ефикаснијих, бољих и функционалнијих размњивача топлоте. Сличне примере у усавршавању и унапређењу налазимо путујући кроз историју. Сам развој технике, и унапређење комерцијалнијих прозивода није био равномеран. Смењивали су се периоди убрзаног развоја и стагнације. Сам развој науке, технике и технологије довео је до квалитетних промена у области производње и друштву уопште.

Размњивачи топлоте у најдаљој историји постоје онолико дуго, колико и сам човек кува и пече у лонцу. Да бисмо ово боље разумели, потсетићемо се да постоје три начина преноса топлоте кроз конвекцију, кондукцију и зрачење. Електрична пећница је класичан размњивач топлоте између хране и извора топлоте. Што се тиче ране историје најранији и први најпознатији размњивач топлоте давне историје је било камење у ватри. Камење би се загревало довољно дуго у ватри сачувало топлоту од ватре, потом би се померало у унутрашњост просторије, коју је требало да загреје својом површином, без страха од паљења. Исти начин размишљања довео је до развоја боце топлотом водом.

Прво “централно грејање” измислили су стари Римљани, мада постоје докази да су Индијанци користили ову технологију ”хипокауста” још 2.000 година пре нове ере. Простор је обухватао подрумску просторију испод пода главне просторије. Под је израђен од цемента у средини и два слоја плочица горе и доле. Врућ ваздух и дим ватре из подрума је пролазила кроз под, па је топлота зрачила у главну просторију и на тај начин је загревала. Иста технологија је коришћена за загревање јавних купатила.

Временом, Корејци су користили сличну технологију тзв. ”Ондол” грејање, последње хиљаде година. Са “Ондол” грејачима врућ ваздух би се канализирао из дрвених ватри, самим тим енергија би се користила за кување, печење у цевима испод подова. Прошло је 1700 година од тзв. ”хипокауста” пре него што се догодио већи напредак у технологији размњивача топлоте. Овај пут француски научник Jean Simon Bonnemain је користио систем топлоте за инкубацију кокошијих јаја. Marquis de Chabannes је користио сличну технологију за загревање стакленика у ком је узгајао грожђе. Потом су браћа Price први претставили топлу воду и парно грејање, и самим тим систем парног грејања кућа је патентиран у Енглеској, 1829 године. Током наредних пола века, топла вода и парни размњивач топлоте ће револуционирати свет.

Спојени размњивачи топлоте су најмањи и најкомпетентнији који се и данас користе. Први пут су представљени, 1920 године, плоче спојене могу да се користе на знатно високим вредностима притиска, и могу бити безбедни за разне токсичне и корозивне материје. Због велике способности да се праве у малим димензијама, али са огромном ефикасношћу употреба површине плочастих размњивача топлоте, је највећа у расхладним и HVAC системима.

Размњивачи топлоте данас се креирају у величинама које су тако мале да могу стати на длан руке, а толико снажни да су авионима и кранерима неопхони да би се покренули. На пример највећи размњивач топлоте стоји на висини 81 метар и тежак 450 тона. Употреба размњивача топлоте је веома велика и широка почевши од лаптопова у нашим домовима, петрохемијској рафинерији, индустрији хране, пића, фармацеутским производима. Чување и поновно распоређивање енергије штеди милијарде долара сваке године.

Размењивачи топлоте се праве у разним сортама, од којих свака задовољава своју специфичну намену и потребу на тржишту. Облика су цеви, љуске, плоче, шкољке, а даље се могу категоризирати на основу врсте флуида, броја флуида, начина проласка флуида и слично.

Размењивачи топлоте су прешли велики пут од кантица и пећи, али поставља се питање где ће нас одвести у наредним годинама? Размислимо о масовним соларним пољима у Мароку, пустињама Мохаве и Војенсу. Ова три соларна поља сама производе довољно енергије за подршку неколико милиона људи. Са напретком у технологији подземниог складишта, који се усавршава у Војенсу, снага сунца се ускоро може користити и ускладиштити без коришћења батерија у земљи. Док неки извори енергије долазе споља од сунца, други долазе из саме земље. Размењивачи топлоте користе геотермалне изворе топлоте за снабдевање целих хотела на Новом Зеланду а и читавих заједница попут Форт Полка и Луизијана.

Главни циљ научника и свих нас како у садашњости, тако и у будућности, је усмерен на што већој уштеди новца, смањеној емисији угљеника и повећаној ефикасности производње.

1 ТЕОРИЈСКЕ ОСНОВЕ РАЗМЕЊИВАЧА ТОПЛОТЕ

Размењивачи топлоте су уређаји чија је улога размена топлоте између два или више флуида. Размена топлоте (енталпија) могућа је између два или више флуида, између чврсте површине и флуида, као и између чврстих честица и течноти, на различитим температурама. У размењивачу топлоте увек постоји топлија и хладнија зона. Топлији флуид је грејни флуид, а хладнији флуид је грејани флуид. И грејни и грејани флуид могу бити гасовити или течни. У размењивачима топлоте може да се обави процес провођења и прелаза топлоте. Топлотна размена међу флуидима може бити непосредна (директна) и посредна (индиректна). Код непосредног контакта у размењивачима топлоте између два флуида нема препрека, они су у директном контакту. У неким случајевима их је лако раздвојити, а у неким пак се мешају у хомоген флуид. Пример су расхладне куле у термоелектранама у директном контакту са атмосферским ваздухом хлади се вода која је неопходна за хлађење кондезатора парне турбине. Кула је грађена као висока лимена шкољка до 100 метара висине, вода која се хлади одозго улази у кулу, а ваздух који је ту кроз кулу тече природним потиском. Главни недостатак у овим и сличним врстама расхладног торња је стална потреба за надокнадом хладне воде, због испаравања.

Други пример је комора за хлађење ваздуха у климатизованим постројењима где се директним мешањем воде и ваздуха повећава његова релативна и апсолутна влажност.

Предност директних у односу на индиректне је веома велика брзина преноса топлоте, знатно су јефтинији, проблем замагљивања готово и да не постоји јер нема преградног зида међу флуидима.

Размењивачи топлоте са посредним контактном (индиректним) у пракси су знатно чешћи. Два флуида су раздвојена чврстом преградом којом размењују топлоту. Са једне стране преграде је један, а са друге стране преграде је други флуид. Грејна површина је од материјала са великим коефицијентом проводљивости топлоте (бакар, алуминијум и њихове легуре). Понекад је и челик у комбинацији са алуминијумом, а понекад и делови могу бити од пластике где је то могуће, како би се штитили од корозије, која је једна од недостатака. Али и временом сви материјали подлегну оксидацији и таложењу честица и других депозита.

Уопштено говорећи, прелаз топлоте се односи на кретање течности са једног на други крај уређаја различите температуре. Најефикаснији размењивач топлоте је онај уређај који функционише у оквиру оптималних граница за притисак и граница за брзину. Број пролаза на примарном колу се може прилагодити како би се оптимизирали топлотни учинци и избегли евентуални недостаци.

Ефикасност размењивача топлоте се може дефинисати на више начина, али у смислу топлотне перформансе треба размотрити неколико фактора:

- Температурна разлика: то је (разлика између вруће течности и рахладног средства), ова разлика је веома важна приликом пројектовања размењивача топлоте. Расхладна течност мора бити на нижој температури него врућа течност. Самим тим ниже температуре расхладне течности узмеће више топлоте из вреле течности, (пример је чаша воде на собној температури), коју је лакше охладити уз помоћ леда, него само хладном водом. Исти принцип је и на нивоу функционисања размењивача топлоте.

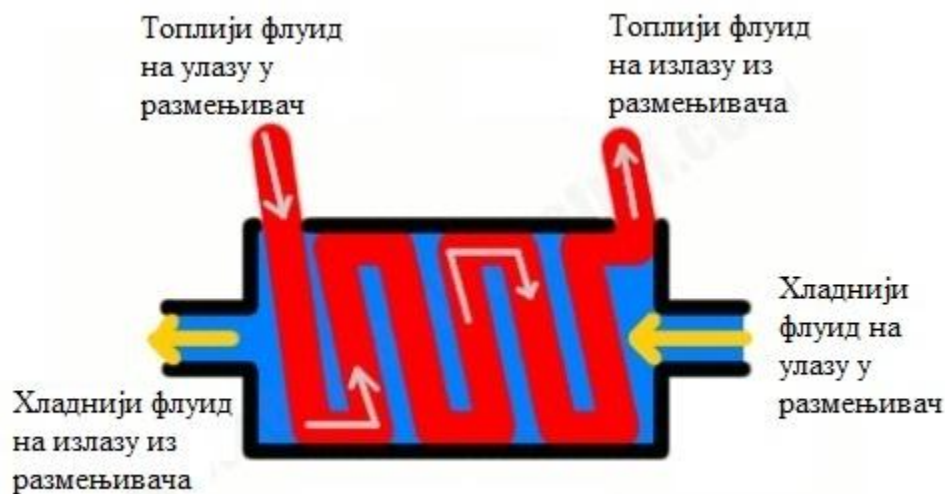
- Проток: ток флуида је битан фактор, а већа брзина протока повећаће и способност размењивача топлоте да пренесе топлоту. Али, већа брзина протока може да доведе до пада притиска, о чему треба водити рачуна.
- Инсталација: идеални размењивачи су са супротносмерним током, ако је расхладна течност путовала с лево на десно, врућа течност путује у супротном смеру, из десног у лево.

1.1. Појам и дефиниција

Размењивач топлоте је сложен уређај, који обезбеђује пренос топлотне енергије између два или више флуида на одређеној температури. Када говоримо о преносу топлоте требамо пре свега појснити, да грана инжењерства проучава процесе стварање, коришћење, конверзију и размену топлотне енергије и топлоте физичког система. Покретна снага преноса топлоте је резултат температурног градијента између два простора. Током преноса топлоте, топлотна енергија се увек креће у истом правцу. Када говоримо о механизму преноса топлоте, постоје три типа преноса топлоте, а то су:

- Кондукција или спровођење топлоте (Температура неке материје је пропорционална кинетичкој енергији молекула. Уколико кинетичка енергија молекула буде већа, то је температура те материје виша),
- Конвекција (при конвекцији топлота се простира кретањем делова самог флуида, течности или гаса кроз флуид, а флуида на чврсту површину, а чврсте површине на флуид),
- Зрачење (пored спровођења или конвекције, зрачење је још један начин простирања топлоте. Такво простирање топлоте се дешава између било која два објекта која се налазе на различитим температурама, без обзира да ли је између њих вакуум или није).

Принцип рада једноставног размењивача топлоте (слика 1.1). Врућ флуид је приказан црвеном бојом, он путује унутар цеви од једне до друге, док хладнији флуид који је обележен плавом бојом путује у супротном смеру. Размена топлоте се дешава међу флуидима, тако што се топли флуид хлади, а хладан флуид загрева, док флуиди међусобом не долазе у контакт и не мешају се. Овом шемом је објашњен процес рада на једноставним цевастим размењивачима, док постоји веома велики број размењивача са доста цеви унутар љуске.



Слика 1.1 - Принцип рада размењивача топлоте [1]

Размењивачи топлоте се користе или као појединачни уређаји или као компоненте већих термичких система, у широком спектру индустријских, комерцијалних производа и апликација за домаћинство, нпр. систем за хлађење, грејање, климатизацију, вентилацију, производњи лекова, као и о областима заштите животне средине. Размењивач топлоте преноси топлоту из врућег у хладнији флуид. У многим инжењерским функцијама неопходно је повећати температуру у једној течности, а омогућити хлађење у другој. Ово двоструко економично дејство постиже се управо помоћу размењивача топлоте. Међу његовим функцијама је и хлађење једне фракције нпр. нафте, док се друга загрева, потом хлађење ваздуха или других гасова са водом између фаза компресије и прегревања ваздуха за сагоревање које је доведено у котловску пећ, користећи топлоту димног гаса као грејни медиум. Друга употреба укључује пренос топлоте из метала у воду атомске електране и враћање енергије из издувне гасне турбине преносом топлоте на компримовани ваздух до коморе за сагоревање. Размењивачи топлоте имају различита имена и служе бројним наменама. Производе се у различитом дизајну и за различите протоке и намене. Наједноставнији је концентрична цев или двоцевни размењивач топлоте. Улазни и излазни канали су обезбеђени за два флуида. Хладна течност тече кроз унутрашњост цеви а топла течност је у истом правцу кроз простор између спољашњих и унутрашњих цеви. Овакав вид протока се назива паралелни проток. Топлота се преноси из топле течности кроз зид унутрашње цеви тзв. грејне површине до хладне течности. Размењивач топлоте може радити и у односу на проток, где су паралелни токови али у супротним смеровима. Најучесталији размењивач топлоте је у облику шкољке или цеви. Дизајниран је као сноп цеви кроз коју тече флуид. Ове цеви су међусобом заварене у шкољку, а други флуид тече у слободном простору између цеви. У нуклеарним реакторима шипке за гориво могу заменити цеви, а расхладна течност тече око шипки, уклања топлоту генерисану поступком физије. Размењивач топлоте је уређај који је дизајниран да ефикасно преноси или размени топлоту. Када се течност користи за пренос топлоте, течност може бити вода, уље. Најпознатији

размењивач топлоте је хладњак аутомобила. Раствор воде и етилен гликола антифриз, преноси топлоту од мотора до хладњак, а потом из хладњака у ваздух, који тече кроз њега. Овај процес помаже да се мотор не прегреје. Размењивачи топлоте су дизајнирани тако, да, отклањају вишак топлоте из авионких мотора, рендген цеви, ласера, војне опреме и многе друге врсте опреме која захтева хлађење. У широким индустријским процесима губитак топлоте је расипан и неефикасан, размењивачи топлоте су створени за хватање и поновно коришћење топлоте која би била изгубљена у околини. Генерално, функција омогућава врућем флуиду да протиче кроз зид, поред хладне течности, без мешања. Топлота тече од врућег до хладног флуида, греје хладан флуид и уједно хлади врућ флуид. То омогућава топлоти да се транспортује и поново користи, а не само да се одбаци. Два флуида ће пролазити један поред другог, у којима је један у цевима, а други излази из цеви у околину шкољке. Постоји много различитих размењивача топлоте, од којих су неки погоднији за једну намену, од других. Неки у самом дизајну имају уграђене преграде за одвајање, складиштење топлоте, док други омогућавају мешање топлоте.

Материјали од кога су направљени размењивачи топлоте су од врло квалитетних материјала, како би испунили све своје радне задатке. Челик у комбинацији са алуминијумом је најчешће употребљавана материја, као и нерђајући челик, титанијум, а понекад се направе и одређени делови од пластике, како би се додатно штитили од корозије. Временом, сви подлегну оксидацији и таложењу депозита. Стандардни размењивачи топлоте су погони за већину флуида, међутим за корозивне течности, хлорисану слану воду, расхладна средства и киселине, потребно је да се направе од чврстих материјала, попут челика и титанијума.

1.2.Историјски развој

Са историјског аспекта посматрано дуг је и трновит пут који су прешли размењивачи топлоте у својм дизајну, намени и модернизацији, све док нису добили улогу коју данас имају у свакодневном животу, како за појединца у домаћинству, тако и за огромна индустријска постројења. Као што смо и навели раније, примарни праисторијски и најједноставнији размењивач је било камење у ватри, које се потом користило за загревање простора. Око 2000 година пре нове ере први импровизиован вид централног грејања у виду “хипокауста” , примењивали су Кинези и Корејанци, а на наше просторе донели Римљани. (Слика 1.2)



Слика 1.2 - Археолошки парк Андаутонија у Загребу [2]

Последњих хиљаду година, Корејанци су почели да примењују технологију са Ондол грејачима. Прошло је доста година, па тек 1829 године, је направљен велики помак у историји размењивача топлоте, када је у Енглекој патентиран први ситем за грејање кућа. Подно грејање је први сигнал почео да испољава на прелазу између 19. И 20. - ог века, а прва комерцијализација и глобално ширење настаје проналаском стабилног полиетилена и развојем индустрије цеви, а то се догодило у задњој четвртини 20.-ог века.

Фабричка произвођа првих радијатора, у Европи, у различитим земљама, започиње скоро у исто време. 1927-е године R.Bloksma старији, је основао прву импровизовану фабрику, у подруму у Амстердаму, која је примарно било усмерена на поправку примитивних радијатора, а већ 1930-е године започиње сопствену линију производа, да би након Другог светског рата, компанија развила и сопствене машине за производњу. А с напретком посла и ширењем подручја 1954-е године је отворен и погон за производњу радијатора за извоз, направљен први радијатор широког капацитета за возове, а 1950-е године алуминијумски радијаторе налазе своју путању и до аутомобилске индустрије.

1938-е године Pontus Hytte, син познатог шведског сликара Carl Larssona, започиње производњу размењивача топлоте у Шведској и премешта погон и производњу у Лунд.

Исто тако, прва потреба и примитивна креација првог расхладног клима уређаја, датира још од 1840-е године, лекар и проналазач доктор John Gorrie, са Флориде, први је предвидео идеју за хлађење великих градова, како би се становништво ублажило "звих температура". Gorrie је веровао да је хлађење кључни фактор за сузбијање опасних заразних болести, попут маларије, а уједно би пацијентима у болесничким собама било знатно удобније за боравак. Основни систем за хлађење болесничких соба била је идеја која је захтевала да се лед из замрзлих језера и вода Северне Америке доведе до Флориде. Да би се импровизовали логистички изазови, Gorrie је започео експеримент са концептом вештачког хлађења. Дизајнирао је прву машину која је стварала лед уз помоћ компресора, и први патент је конструисан 1851 - е године. Gorrie је био неуспешан да патентира своју технологију на тржиште-због смрти финансијског помагача. Његов изум је поставио темељ модерне климатизације и хлађења.

Идеја о вештачком хлађењу је стагнирала неколико година, све док рад инжењера Willis Carrier је резултирао креацијом првог модерног електричног клима уређаја. Преко серије експеримената, дизајнирао је коначно и систем који је контролисао влажност ваздуха уз помоћ расхладних клема, и обезбедио патент за свој “Апарат за третирање ваздуха”, који би могао да влажи ваздух помоћу грејане воде, или уз помоћ расхладне воде. Тестирањем и додатним пречишћавањем своје технологије, осмислио је аутоматску контролу система за регулисање влажноти и у температуре ваздуха, а овај апарат је нашао примену у текстилној индустрији. Прошло је доста времена, пре него што је Carrier схватио да би контрола влаге и климатизација, користила и у другим индустријама, и на крају је формирао компанију са још шест инжењера (Carrier Engineering Corporation).

1922-е године уграђен је први добро дизајниран клима ситем за хлађење позоришта у Metropolitan Theatru, у Лос Анђелесу.

Од 1970-е употреба клима уређаја је веома распрострањена широм света. Радило се на што бољем унапређењу рада, а уједно и смањењу трошкова.

Унапређења у будућности односе се на производе који неће у свом раду користити HFC (хидрофлуорокарбон), који је штетан по околину. Процењује се да технологије без компресије, могу смањити потрошњу енергије и до 50 процената.

1.3. Примена размењивача топлоте

Данашњи савремен живот, не би био у могућности да функционише у било којој сфери, почевши од кућне технике, превозних средстава, индустријске производње, без употребе размењивача топлоте. Широка употреба, савремен дизајн, неопходност даншњице дали су размењивачима топлоте посебно место међу уређајима. Потоји велики број размењивача топлоте, њихова подела на основу бројних карактеристика, примене, намене, дизајна дала је велику палету производа од којих је сваки нашао своју намену и улогу. Размењивачи топлоте имају широку примену, а она укључује и обухвата производњу електричне енергије, процесе у хемијској и фармацеутској индустрији, процесе у прехранбеној индустрији, електроници, авиоиндустрији, примена у еколошком инжењерству, улога у рециклажи, индустрији за грејање и хлађење хидрауличних уља, у термоелектранама, у котловима, нуклеарним генераторима, парним кондензаторима, регенераторима и расхладним кулама, улога је у пастеризацији млека и индустрији хране уопште, као и производња у разним другим фабрикама.

Поред велике примене у индустрији, живот свакодневни и примена у домаћинству је назамилива без употребе размењивача топлоте и то као систем даљинског грејања, расхладна техника, односно радијатори и клима уређаји.

Размењивачи топлоте често се користе у процесу производње нафте, транспорту, енергетици, климатизацији, процесима у алтернативном гориву, и у производној индустрији њихова примена је широка и чак кључна компонента многих индустријских производа, доступних на тржишту. Генерално гледано, размењиваче топлоте можемо видети на готово свим местима, у кућним системима најчешће су у склопу ситема за грејање и хлађење, имају улогу у моторима фрижидера и замрзивача, да раде боље и ефикасније. Фрижидери и клима системи на пример функционишу на тај начин што размењивачи топлоте уклањају вишак топлоте, одводе је и испуштају у течност, а потом одводе даље у атмосферу.

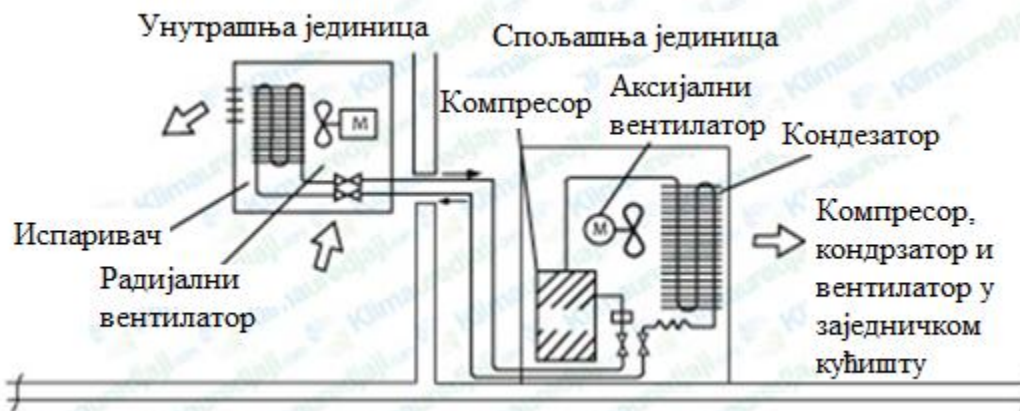
Код фрижидера и замрзивача размењивач топлоте се налази позади уређаја. Принцип рада је такав да се у хладњаку сабија гас за хлађење, односно фреон, који приликом преласка из гасовитог у течно стање ослобађа топлоту, која напушта хладњак и одлази у атмосферу,

како би се унутар уређаја постигла ниска температура. У електранама или моторима, издувни гасови често садрже топлоту која се бескорисно креће у отвореном простору. Тај губитак енергије из топлоте смањује се (не елиминише у потпуности јер се ипак одређена количина увек губи).

Течност која се користи за хлађење дизел мотора често пролази кроз размењивач топлоте, а топлота која се враћа користи за загревање хладног ваздуха. На тај начин се штеди на додатним електричним грејачима, који би загревали кабину превозног средства нпр, аутобуса. Примена у аутомобилима је још једна врста размењивача топлоте без ког превозно средство не би функционисало, наиме у току рада аутомобила, вода или антифриз, који хлади мотор протиче кроз хладњак који је грађен од доста алуминијумких плоча са отворима за ваздух, док аутомобил ради, хладни ваздух који пролази кроз хладњак уклања топлоту, хлади воду и одржава мотор ефикасним.

Широка је индустријска примена размењивача топлоте, као компоненте система за климатизацију, хлађење, систем за грејање.

Систем рада клима система је такав (слика 1.3), да код њих постоје по два размењивача топлоте. Први је у кућној просторији која се хлади, а вентилатором се преноси хладноћа у просторију. Други размењивач је постављен ван куће, најчешће на тераси или око прозора, он се загрева из затвореног система, вентилатором се износи топлота ван просторије. На овај начин, уз помоћ размењивача се топлота” износи” из стана у атмосферу, односно” уноси” хладноћа у стан. Појам клима уређаја се најчешће односи на расхладни систем. Климатизација је могућност управљања температуром, количином влаге, чистоћом и дистрибуцијом ваздуха и сходно томе поседује бројне функције: хлађење, грејање, пречишћавање, одvlaживање, вентилација.



Слика 1.3 - Рад клима уређаја заснован на кружном процесу радног флуида који кроз цев кружи у затвореном систему. При томе радни флуид мења агрегатно стање. [3]

Многи индустријски процеси захтевају размењивач топлоте, да би могли да функционишу. У индустријским потројењима су обавезни за многе машине, хемикалије, воду, гас и друге супстанце, унутар сигурне радне температуре. Могу наћи примену још у хватању и преносу парних или издувних гасова, који се ослобађају као нуспродукт у току процеса, па се могу искористити на неком другом месту, самим тим повећава им се ефикасност и штеди новац.

Улога размењивача топлоте у хлађењу се може појаснити улогом за хлађење ваздуха или гасова водом, између фаза компресије и спречавање прегревања ваздуха за сагоревање доведено у котловску пећ, користећи топлоту димног гаса као грејни медиум.

Друга употреба укључује пренос топлоте из метала у воду у електранама, и поновно враћање енергије из издувне гасне турбине, преносом топлоте на компримовани ваздух до коморе за сагоревање.

Систем даљинског грејања у градовима функционише, тако што топлана загрева воду, сагоревањем угља, нафте, мазута. Та вода у затвореном систему, кружи градом, долази до зграде пролази кроз размењивач топлоте и враћа у топлану. У згради, вода путује и кружи од подстанице до радијатора у становима, на тај начин предаје се топлота да би се станови грејали. У овом примеру размењивач топлоте је сам радијатор јер предаје топлоту из воде ваздуху у стану који се греје на овакав начин.

Такође, сврха им је и отклањање вишак топлоте авионских мотора, рендген цеви, ласера, војне опреме и многе друге врсте опрема које захтевају хлађење, и на тај начин спречавају додатно прегревање.

Размењивачи топлоте се производе у различитим облицима, саграђени су од различитих материјала, у различитом дизајну, по различитим именима и за разне протоке.

2 Класификација размењивача топлоте

Размењивачи топлоте се могу поделити по више критеријума: по начину размене топлоте, према начину протицања флуида кроз размењивач, начин конструкције, механизам рада...

Размењивачи топлоте се деле на:

- Размењивач топлоте са непосредним контактом флуида и
- Размењивач топлоте са посредним контактом флуида.

На основу начина размене топлоте размењиваче топлоте делимо на (индиректне и директне).

На основу броја флуида (два флуида, три флуида или више од три флуида).

На основу преноса (гас-течност, течност-течност).

На основу конструкције могу бити (цилиндрични, плочасти).

На основу броја пролаза (са једним, или више пролаза).

На основу механизма преноса топлоте (једна фаза на обе стране, једна фаза на једној док је друга фаза на другој страни, две фазе на обе стране, или комбинован пренос).

2.1. Индиректни размењивачи топлоте

У размењивачима топлоте са посредним индиректним контактном флуида, који су у пракси знатно чешћи, два флуида су раздвојена чврстом преградом преко које размењују топлоту (пролаз топлоте). Они се могу поделити на:

- регенератори,
- рекуператори и
- размењиваче са флуидизованим слојем.

2.1.1. Регенератори

Код регенератора флуиди су раздвојени али они не струје истовремено кроз уређај. Флуиди се наизменично пропуштају кроз масу размењивача који акумулира топлотну енергију и у следећем кораку предаје је другом флуиду. По конструкцији регенератори могу бити ротациони (на пример предгрејач ваздуха у котловима, ЛУВО пакет) или непокретни. У регенераторима проточни пут се састоји од матрице, која се загрева када врела течност пролази тзв. “врућ удар.” Ова топлота се потом пушта у хладну течност када протиче кроз матрицу “хладан удар”. Добар преглед о регенераторима даје Валкер 1982. Регенератори се углавном користе за проток гаса у електранама и другим индустријским постројењима. Два главна типа регенератора су статички и динамички. Оба типа, доводе до унакрсне контаминације, па се мора пажљиво надгледати њихова примена и употреба.

Употреба регенератора ће се вероватно повећати у будућности, јер се ради на побољшавању енергетске ефикасности и што бољем искоришћавању веће количине топлоте. Обзиром да се регенеративни размењивачи топлоте користе за специфичне апликације, чешћа је употреба рекуператора.

Статични регенератори су фиксног споја, немају покретне делове, сем вентила. Врућ гас пролази кроз матрицу у фиксним временским интервалима. На крају се догоди преокрет тако што врућ гас излази из матрице а хладни пролази кроз матрицу. Главни недостатак је што се и врући и хладни токови прекидају. Да би се ово превазишло и да би имали

непрекидан рад, неопходно је да поседују два статичка регенератора или ротацијски регенератор.

Ротацијски регенератор је цилиндрично обликован који се ротира око своје осе. Врућ и хладни гас протичу истовремено кроз канал са обе стране ротирајућег цилиндра. Повратком у историју, регенератори су имали улогу у грејању током развоја индустријске револуције. Потом су имали примену у високим пећима, па у производњи стакла.

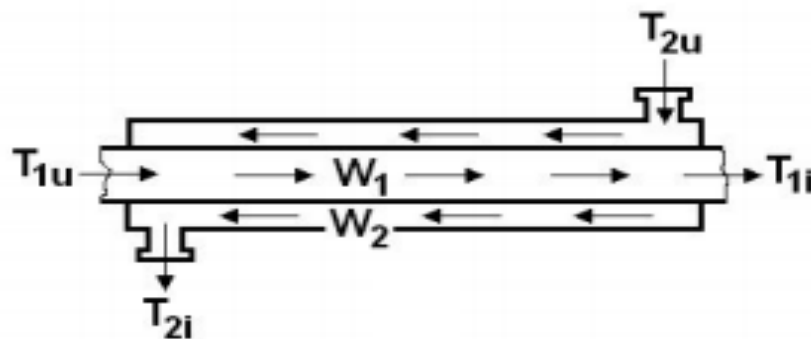
2.1.2. Рекуператори

Код рекуператора флуиди су раздвојени преградом и струје истовремено. Постоји јако велики број конструкција рекуператора. Неке оновне групе су размењивачи топлоте са цевним снопом и омотачем, плочасти и размењивачи топлоте са оребреним површинама. Могућ је јако велики број конструктивних решења рекуператора, тако да не могу бити сврстани само у једну од наведених категорија. Рекуператори су далеко најбројнија група размењивача топлоте.

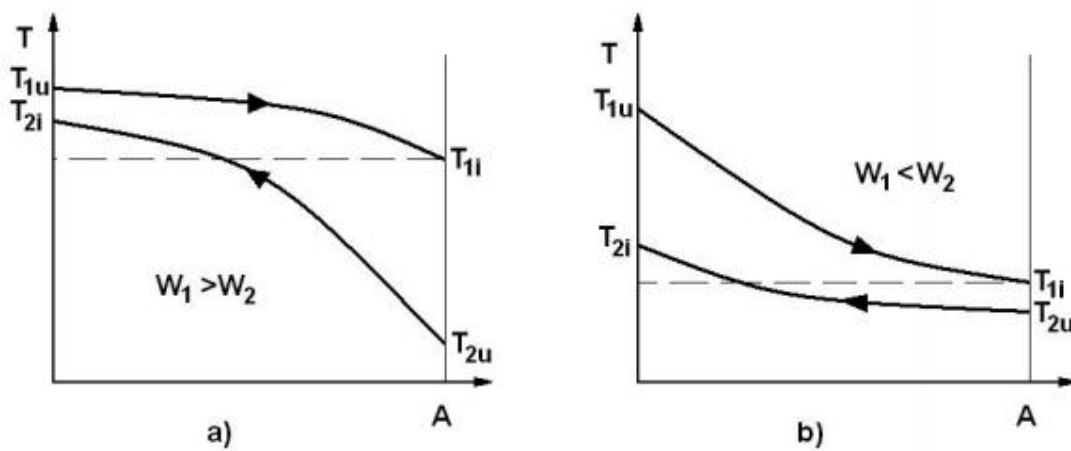
Правац и смер струјања флуида су један од критеријума по којима се размењивачи топлоте деле. Само промена смера струјања флуида, уз све друге непроменљиве услове размене топлоте, може значајно променити ефикасност размењивача. Основни смерови струјања флуида су истосмерни, супротносмерни и унакрсни.

Истосмерни и супротносмерни ток флуида се најлакше сагледавају у једноставном рекуперативном размењивачу топлоте састављеном од две цеви, смештених једна у другу. Кроз ужу цев струји топлији флуид, а кроз прстенасти попречни пресек шире цеви струји хладнији флуид. Топлији флуид, је онај који предаје топлоту у размењивачу је обележен индексом 1, а хладнији флуид индексом 2. Следећи индекс означава да ли се ради о улазном (u), или излазним (I) параметрима посматраног флуида. Тако су на слици 2 и 2.2: T_{1u} (K) улазна температура топлијег флуида, T_{1i} (K) излазна температура топлијег флуида, T_{2u} (K) улазна температура хладнијег флуида и T_{2i} (K), излазна температура хладнијег флуида. Даље су W_1 , W_2 (W/K) водени еквивалент топлијег и хладнијег флуида, респективно.

Супротносмерни ток флуида је онај када два флуида, при размени топлоте у размењивачу, струје паралелно али у супротним смеровима. (Слика 2.1)

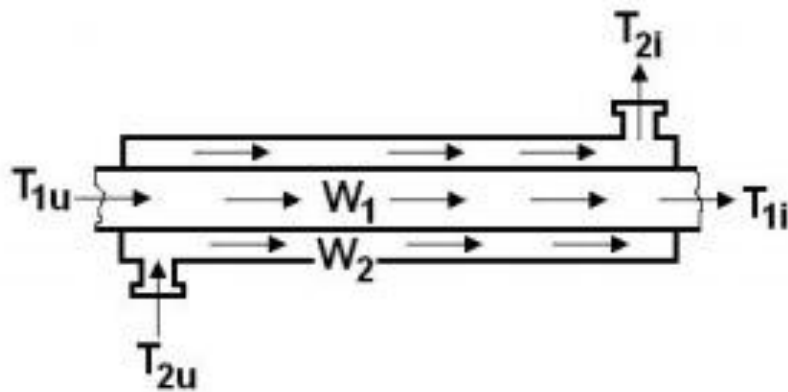


Слика 2.1 - Приказ супротносмерног тока [4]

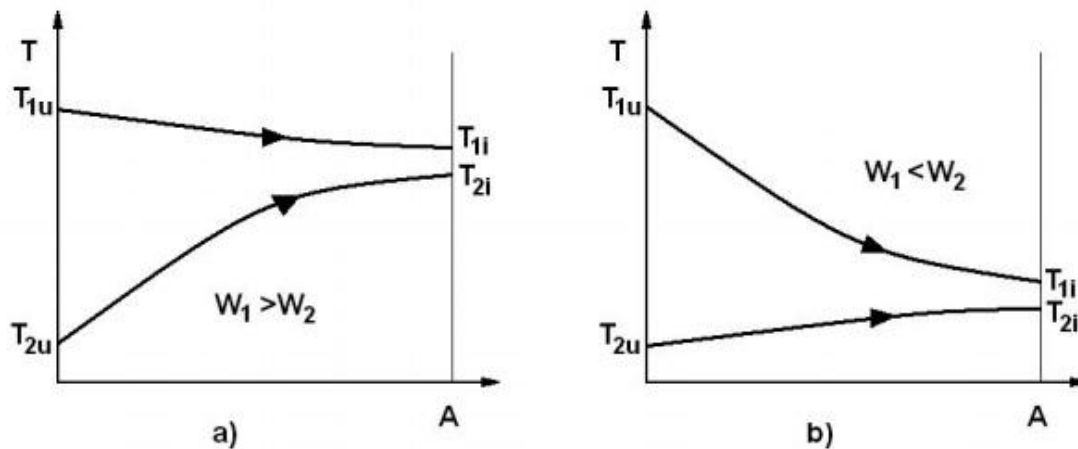


Слика 2.2 - Промена температуре топлијег и хладнијег флуида у размењивачу топлоте са супротносмерним током [4]

Истосмерни ток флуида је онај када два флуида, при размени топлоте у размењивачу струје паралелно у истом смеру (слика 2.3).

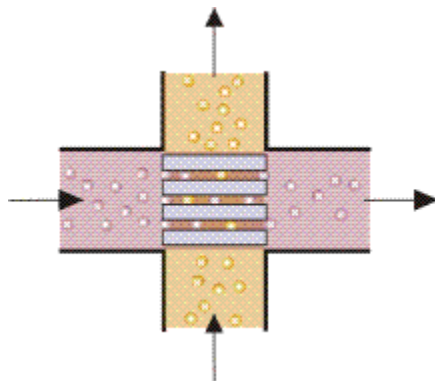


Слика 2.3 - Приказ истосмерног тока флуида [5]



Слика 2.4 - Промена температуре топлијег и хладнијег флуида у размењивачу топлоте са истосмерним током [4]

Унакрсни ток флуида је онај када два флуида у размењивачу топлоте струје под углом већим од 0 степени, најјешће 90 степени (Слика 2.5).



Слика 2.5 - Унакрсни ток флуида [6]

Улаз у размењивач топлоте је увек дефинисан местом где у њега улази топљији флуид, а излаз тамо где излази топлији флуид.

У размењивачима топлоте често се комбинују ови наведени смерови тока флуида, па се не може рећи, на пример да је размењивач чисто супротносмерни, истосмерни или унакрсни.

Флуиди који има велики топлотни капацитет имаће мали пад температуре дуж размењивача топлоте и обрнуто. Величина A (m^2), представља површину размене топлоте у размењивачу. На сликама се види да при већим разликама температуре топлији - хладнији флуид, топлотни флуks се интензивније размењује, па температура топлијег флуида убрзано опада, а хладнијег расте. У случају када је ова разлика мала, пад и пораст температуре флуида је успорен. На величину разлике температура од улаза у размењивач до његовог излаза директно утиче вредност воденог еквивалента флуида. Тако флуид са малом вредношћу W има значајну промену температуре дуж размењивача и обрнуто.

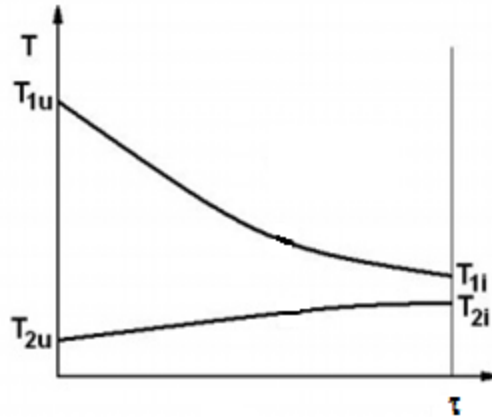
Са слике се види да је температура топлијег флуида увек виша од температуре хладнијег флуида, без обзира који део размењивача посматрали. На излазу из оваквих размењивача топлоте, разлика температуре топлији-хладнији флуид је најчешће мала и интензитет размене топлоте је низак.

Са слике се види да је температура топлијег флуида у супротносмерном размењивачу топлоте може да буде и нижа од температуре хладнијег флуида. Наравно да не може бити случај на истој позицији у размењивачу али са слике 2.1 се види да је температура топлијег флуида на излазу нижа од температуре хладнијег флуида на излазу. Наравно излаз топлијег и хладнијег флуида у овом распореду није на истој страни размењивача. Због тога је у супротносмерном размењивачу разлика температуре топлији - хладнији флуид равномернија. Касније ће се показати да је то оновни разлог зашто су супротносмерни размењивачи топлоте ефикаснији од истомерних при истим условима функционисања.

Са аспекта пролаз топлоте у размењивачу, може се посматрати размена топлоте на елементарној површини

Флуиди који мирују је занимљив случај размене топлоте између два флуида, на пример у два резервоара, где је мањи смештен у већи. Топлотни флуks ће се размењивати све до тренутка када се не изједначе температуре флуида у резервоарима (систем се посматра изоловано од околине). У овом случају температуре флуида се неће мењати по површини резервоара (размењивача), већ по времену. Мерења су показала да је промена

температуре топлијег и хладнијег флуида у времену идентична промени температура у истосмерном размењивачу топлоте по површини. (Слика 2.6)

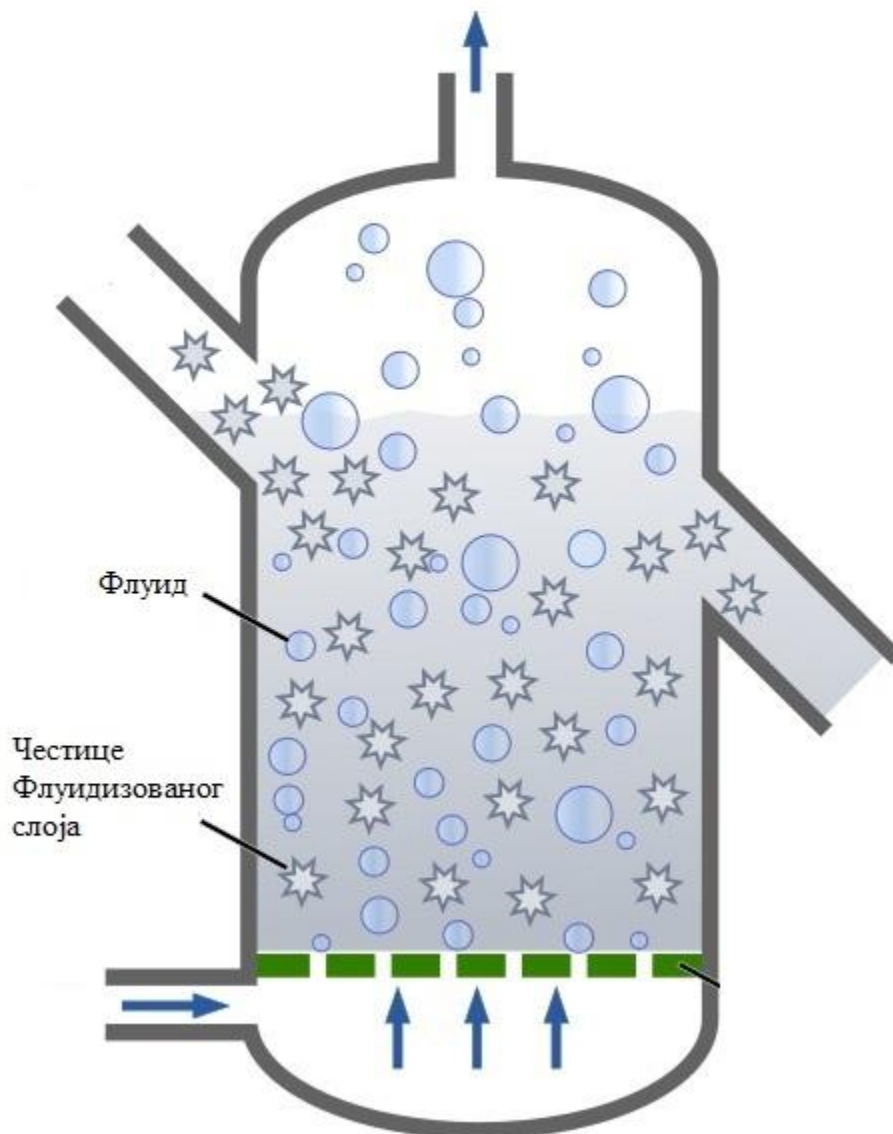


Слика 2.6 - Промена температуре топлијег и хладнијег флуида који мирују [4]

2.1.3. Размењивачи топлоте са флуидизованим слојем

Размењивачи топлоте са флуидизованим слојем су специфични размењивачи где се у процес размене топлоте између два раздвојена флуида, који струје истовремено, уводи и уситњена маса чврстог материјала, који ствара, такозвану флуидизовану средину и повећава коефицијент прелаза топлоте. Данас се користе у многим технолошким процесима, хемијским и физичким на пример карбонизација и гасификација уља, печење руде, производња полиетилена, производња алуминијум анхидрида, гранулација, производња винил хлорида, сагоревање отпада, припрема нуклеарног горива, сагоревање чврстог и течног горива, сушење, адсорпција, хлађење, грејање, замрзавање, транспортовање, складиштење и термичку обраду различитих материјала у чврстом стању.

Материјали за флуидизовани слој су углавном мешавина различитих чврстих честица (слика 2.7). Честице могу потицати од природних или технолошких процеса. Геоматријска, физичка, аеродинамичка својства честица утичу на почетак флуидизације. Најважније карактеристике честица су: густина, порозност, облик и брзина кретања честица.



Слика 2.7 - Размењивач топлоте са флуидизованим слојем [7]

2.1.4. Основне једначине размене топлоте у размењивачу

Дуж површине размењивача топлоте температура топлијег флуида опада, а а хладнијег расте, што је разумљиво. Према првом закону термодинамике, уколико се занемаре топлотни губици размењивача топлоте према околини, могу се написати две једначине за размењени топлотни флуks (топлотну снагу). Према слици 2 и слици 2.2:

$$Q = m_1 C_1 (T_{1u} - T_{1i}) \quad (1)$$

$$Q = m_2 C_2 (T_{2i} - T_{2u}) \quad (2)$$

где су Q (W) размењени топлотни флуks у размењивачу топлоте између два флуида, m_1 , m_2 (kg/s) масени проток топлијег и хладнијег флуида, респективно, C_1 , C_2 (J/kg) специфична топлота при константном притиску топлијег и хладнијег флуида, респективно.

Како је за топлији флуид размењена количина топлоте негативна (одводи се) у једначини (1) је промењен редослед температура у загради, како би се добио позитиван топлотни флуks. Јеначине (1) и (2) дефинишу чињеницу да сву количину топлоте коју преда топлији флуид мора да прими хладнији (губици се занемарују). Једначине (1) и (2) се могу написати као:

$$Q = W_1(T_{1u} - T_{1i}) \quad (3)$$

$$Q = W_2(T_{2i} - T_{2u}) \quad (4)$$

где су $W_1=m_1c_1$ (W/K) топлотни капацитет топлијег флуида и $W_2=m_2c_2$ (W/K) топлотни капацитет хладнијег флуида. Величина W_1 и W_2 се често називају и воденим еквивалентима. Из једначине (3) и (4) се може закључити да је однос разлика температура топлијег и хладнијег флуида дуж размењивача топлоте обрнуто пропорционалан њиховим воденим еквивалентима:

$$\frac{W_2}{W_1} = \frac{T_{1u} - T_{1i}}{T_{2i} - T_{2u}} \quad (5)$$

Са аспекта пролаза топлоте у размењивачу, може се посматрати размена топлоте на елементарној површини

$$\delta Q = K \Delta T dA \quad (6)$$

где су: δQ (W) елементарно размењени топлотни флуks у размењивачу топлоте, K (W/m²K) коефицијент пролаза топлоте у размењивачу и dA (m²) елементарна површина размене топлоте.

Интеграцијом по целокупној површини размењивача топлоте, A (m²) се добија размењени топлотну флуks Q (W):

$$Q = \int_0^A K \Delta T dA = K \int_0^A \Delta T m dA \quad (7)$$

где је $\Delta T m$ (K) средња разлика темературе дуж размењивача топлоте. Може се показати да је та средња разлика температуре јенака:

$$\Delta T_m = \frac{\Delta T_u - \Delta T_i}{\ln \frac{\Delta T_u}{\Delta T_i}} \quad (8)$$

За истосмерни размењивач топлоте, средња логаритамска разлика температуре је једнака:

$$\Delta T_M = \frac{(T_{1u} - T_{2u}) - (T_{1i} - T_{2i})}{\ln \frac{T_{1u} - T_{2u}}{T_{1i} - T_{2i}}} \quad (9)$$

а за супротносмерни је једнака:

$$\Delta T_M = \frac{(T_{1u} - T_{2i}) - (T_{1i} - T_{2u})}{\ln \frac{T_{1u} - T_{2i}}{T_{1i} - T_{2u}}} \quad (10)$$

За унакрсни ток флуида, како постоји велики број могућих конструкција и случајева, користи се следећи израз за средњу логаритамску разлику температура.

$$\Delta T_M = \Delta T_{mi} = \varepsilon_{\Delta T} \Delta T_{ms} \quad (11)$$

где је $\varepsilon_{\Delta T}$ (-) корекциони фактор за унакрсни ток флуида (у односу на супротносмерни ток, ΔT_{ms}), функција од израза W_1/W_2 и $P = (T_{2i} - T_{2u}) / \Delta T_{ui}$ као и констрикција размењивача са унакрсним током. У различитим приручницима се могу наћи дијаграми за одређивање овог корекционог фактора, у зависности од наведених фактора и конструкције размењивача топлоте

Када су при прорачуну размењивача познате само две улазне температуре T_{1u} и T_{2u} онда се из система једначина (1), (2) и (7) могу израчунати преостале две температуре и топлотни флуks за истосмерни ток.

$$T_{1u} - T_{1i} = \psi_i (T_{1u} - T_{2u}) \quad (12)$$

и супротносмерни ток флуида у размењивачу топлоте:

$$T_{1u} - T_{1i} = \psi_s (T_{1u} - T_{2u}) \quad (13)$$

где су: ψ_i и ψ_u (-) помоћне функције за истосмерни и супротносмерни ток, респективно. Ове помоћне функције су једнаке:

$$\psi_i = \frac{1 - e^{1 + \left(\frac{W_1}{W_2}\right) \frac{KA}{W_1}}}{1 + \frac{W_1}{W_2}} \quad (14)$$

$$\psi_s = \frac{1 - e^{-(1 - \frac{W_1}{W_2}) \frac{KA}{W_1}}}{1 + \frac{W_1}{W_2} - e^{-(1 - \frac{W_1}{W_2}) \frac{KA}{W_1}}} \quad (15)$$

2.2 Директни размењивачи топлоте

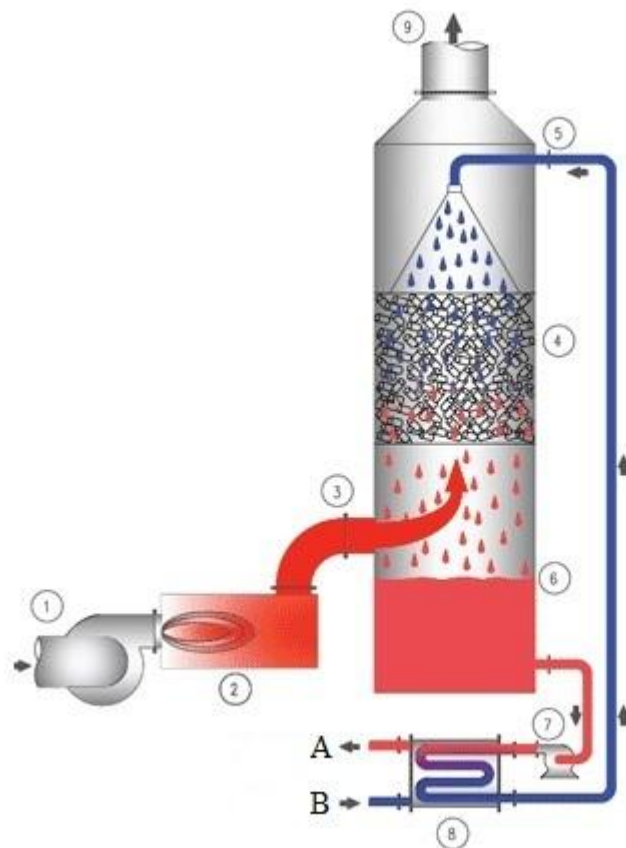
У размењивачима топлоте са непосредним контактом флуида, између два флуида нема препрека, већ су они у директном контакту. У неким случајевима их је лако раздвојити, а у неким случајевима они се мешају у један хомогени флуид. Пример за први случај су расхладне куле у термоелектранама, где се у директном контакту са атмосферским ваздухом хлади вода потребна за хлађење кондезатора парне турбине. Други случај би била комора за влажење ваздуха у климатизационом постројењу, где се директни мешањем воде и ваздуха повећава његова релативна и апсолутна влажност.

Директни размењивачи топлоте се користе више од сто година у пракси. Почетак индустријске револуције има велике везе са употребом директних размењивача топлоте од стране James Watt-а, у стварању потребног вакуума за парне машине. Поред употребе као расхладне куле, имају још и као грејачи воде у термоелектранама, кондезатори у нафтној индустрији, у потројењима за сепарацију гаса, процеима сушења итд.

У поређењу са индиректним размењивачима топлоте директни:

- имају добар пренос топлоте,
- конструкција им је релативно јефтина,
- проблем замагљивања не постоји, због непостојања преградног зида између флуида.

1. ваздух испоручује компресор, 2. подиже на одговарајућу температуру уз помоћ извора топлоте 3. врућ гас улази у директан размењивач топлоте 4. путује на горе до активне површине за размену топлоте 5. хладна вода се уводи на врху уређаја кроз распршивач течности долази до контакта врућ гас и хладна вода, гас путује на доле. Долази до преноса топлоте између хладне воде и врућег гаса што доводи до брзог загревања воде 6. одводи се загрејана вода 7. испушта кроз плочасте или цевасте размењивач топлоте 8. поновно загревање течности и поновни повратак топлоте у комплетни циклус 9. гас који је засићен воденом паром излази из врха уређаја. А. Врућ гас, В. Хладна вода. (Слика 2.8).



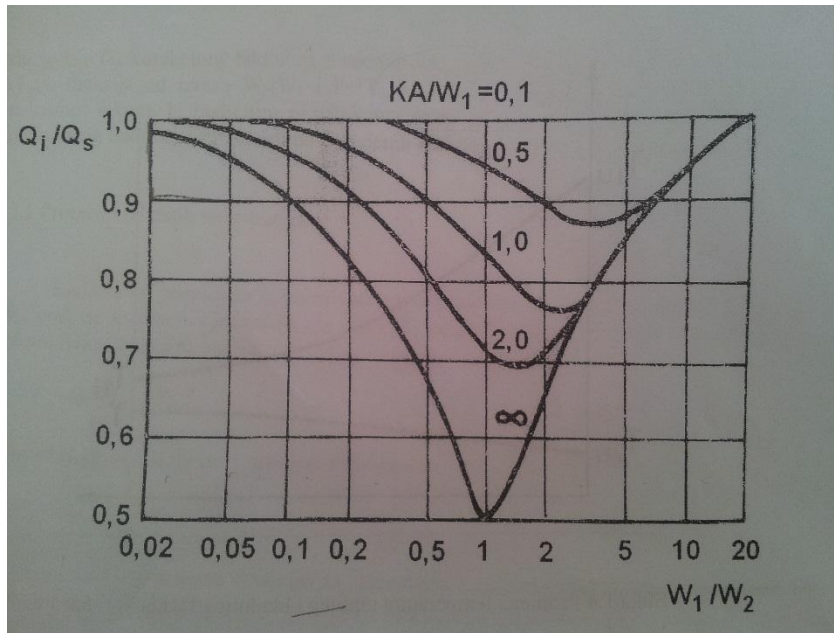
Слика 2.8 - Директни размењивачи топлоте [8]

2.3 Поређење истомерних и супротносмерних размењивача топлоте

На основу поређења, испитивања су показала а су супротносмерни размењивачи топлоте, при истим условима функционисања ефикаснији од истомерних. Разлог, како је већ речено, лежи у равномернијој разлици температура топлији-хладнији флуид дуж површине, код супротносмерних размењивача топлоте. Само у специјалним случајевима истосмерни размењивачи достижу ефекте размене супротносмерних.

За мале вредности коефицијента пролаза топлоте и површине размењивача (KA), у односу на топлотни капацитет топлијег флуида (W_1), размењене топлотне снаге (флуксеви) супротносмерног и истосмерног размењивача топлоте у практично једнаки ($KA/W_1 < 0.1$). То важи и за случајеве када је топлотни капацитет (водени еквивалент) једног флуида знатно већи од другог ($W_1 > W_2$ или $W_1 < W_2$). Међутим, када су топлотни капацитети флуида слични и када размењивач топлоте има велику површину и потенцијал (K) да размењује топлоту, супротносмерни размењивач топлоте показује знатне предности у одноу на истосмерни. Истосмерни размењивач топлоте ће размењивати 50 % мање топлотне снаге у случају једнакости водених еквивалената ($W_1=W_2$) и виоких вредности израза KA/W_1 .

Величина топлотног капацитета флуида се директно одражава на његов пад температуре дуж размењивача. За веома велике топлотне капацитете, промена температуре је минимална. Случај кондезације топлијег флуида, кога хлади флуид без промене фазе је случај $W_1 > W_2$. Случај кључања хладнијег флуида, кога греје флуид без промене фазе је случај $W_1 < W_2$. У овим случајевима супротносмерни размењивач топлоте нема предност у односу на истосмерни. Другим речима, што се тиче размењене топлоте, није битан смер флуида који кључа или се кондензује.



Слика 2.9 - Поређење истосмерних и супротносмерних размењивача топлоте, при различитим условима функционисања [4]

2.4 Пад притиска у размењивачу топлоте

При прорачуну размењивача топлоте, потребно је познавати масене протоке топлијег и хладнијег флуида. Међутим, у зависности од примењеног размењивача, ови процеси се могу мењати. На пример, у случају да топлана испоручује топлији флуид према размењивачу топлоте. Према хидрауличкој шеми целокупног система, односно према расположивом паду притиска на прикључцима потрошача - размењивач, прилагодиће се и проток кроз размењивач. У случају да размењивач топлоте има велике отпоре струјања (мали пречници цеви, додатне препреке струјању) проток кроз њега ће бити мали. У супротном, проток ће бити већи али ће недостатак преграда и велики попречни пресеци струјања уловити мале брзине и самим тим мали коефицијент пролаза топлоте.

Другим речима, за дефинисане услове постоји оптималана конструкција размењивача топлоте. Сваке накнадне измене у правцу смањења или повећања отпора струјања у размењивачу, под дефинисаним уловима, водило би смањењу размењене количине топлоте. Дакле, хидраулички прорачун размењивача топлоте (прорачун пада притиска) је исто тако важан као и термички.

Када је размењивач отворен у односу на околину, тада се у прорачун узима и пад притиска потребан за потискивање флуида (висина стуба течноти). Отворене конструкције размењивача топлоте у значајно ређе од ових других.

3 САВРЕМЕНЕ КОНЦЕПЦИЈЕ РЕКУПЕРАТОРСКИХ РАЗМЕЊИВАЧА ТОПЛОТЕ

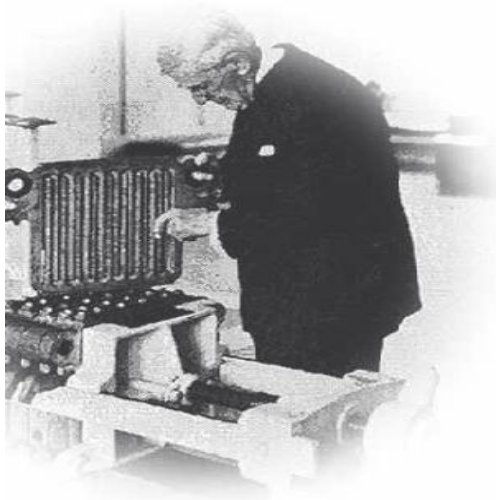
Савремене концепције рекуператорских размењивача топлоте можемо поделити у пет основне врсте: [30]

1. Плочасти размењивачи топлоте
2. Ваздушни размењивачи топлоте
3. Размењивачи топлоте цев и омотач
4. Размењивачи топлоте за специјалне намене
5. Размењивачи топлоте са мешалицом

3.1. Плочасти размењивачи топлоте

Грејна површина је састављена од више лимених плоча, које су поређане једне иза других (слика 3.2). Између плоча постоје танки зазори за струјање флуида. Величина грејне површине одређује колико ће се плоча користити за топлотну размену. Међусобно су причвршћени заједно, лемљени, варени како би им се побољшала конструкција и улога. Плоче су међусобно спојене у фиксном раму који представља главу. Флуиди улазе у плочаст размењивач топлоте кроз отворе на оквиру и дистрибуирају се између плоча. Простор између две узастопне плоче функционише као пролаз за флуиде. Улаз флуида кроз алтернативне путеве је контролисан постављањем заптивача на плочама. Велики број контакта међу флуидима који мењају проток узрокује високу турбуленцију између плоча. Плочаст размењивач топлоте је најфункционалнија врста размењивача топлоте са малом ценом, флексибилношћу, лако одржавање, и високим преносом топлоте. Дизајнирани су да достижу висок ниво турбуленције, што резултира највећи могући пренос топлоте и топлотни коефицијент уз најмањи могући пад притиска, а уз одоварајуће температуре. Познати су још као, плоча-рам размењивач топлоте. Број плоча одређује више параметара (проток, брзина, физичко стање флуида, пад притиска и температуре).

Историјат плочатих размењивача топлоте почиње почетком 20.-ог века. Оригинална идеја за плочастим размењивачима топлоте, и први успешно дизајниран појављује се још 1923-е године од стране доктора Richarda Seligman-а (слика 3.1). Основни дизајн остаје непромењен, али се знатно побољшавају друге карактеристике и ради на усавршавању дизајна, радог притика и других особина, а у циљу што боље искоришћености и примене.



Слика 3.1 - Dr Richard Seligman [13]

Значајно место у примени плочасти размењивачи топлоте налазе у хемијској индустрији, петрохемијској, машинској, текстилној, фармацеутској, термотехничкој, нуклеарним постројењима.

Шездесетих година, плочасти почињу примену у производњи потрошне топле воде, а потом за грејање воде у инсталацијама грејања стамбених објеката. У последње три деценије, масовна примена у системима даљинског грејања и индустријској производњи. Шира примена на просторијама Југославије је започела тек око 1990-их година.

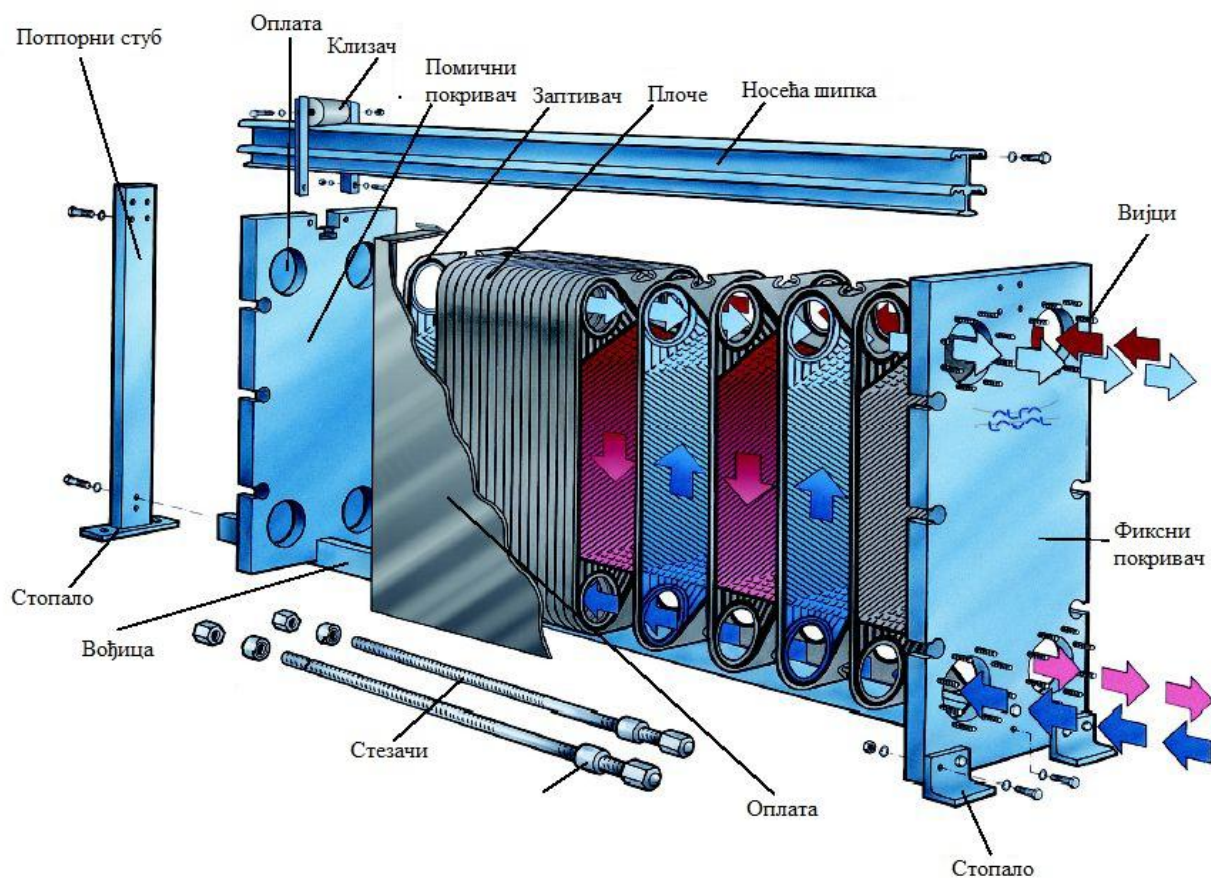
Плочасти размењивачи топлоте су направљени од различитих материјала, нпр плоче типа „Paraflow“ од нерђајућег челика, титанијума, никла, Авеста 254. Плоче су дебљине од 0.5-1.2 mm са великом ефикасношћу преноса топлоте, стварање турбулентног протока међу плочама, а површина за пренос топлоте је од 0.03 – 3.5 m². До 700 плоча е може уградити у оквиру највећег размењивача „Paraflow“, који пружа површину око 2400 (m²). Прикључци за протоке су димензионисани пропорционално површини плоче и контролишу максималан проток течности. [5]

Плочасти размењивачи топлоте се израђују од равних или профилисаних плоча, између којих се формира међупростор за струјање флуида. Плоче могу бити демонтажне или међусобом заварене образујући нерасклопиве или полурасклопиве апарате. Расклопиви су за велики дијапазон температуре од -3 до 180 степени и притисак до 25 бара, а нерасклопиви за температуре од -150 до 400 степени, и притисак до 40 бар.

Једна од најважнијих особина размењивача топлоте поред њихове ефикасности јесте и компактност, односно повољан однос активне површине према запремини. За размењиваче топлоте без промене фазе, компактним размењивачем топлоте се сматрају они чији је однос површине и запремине већи од 700 m²/m³. Пример компактног размењивача је хладњак аутомобила (1000m²/m³). Размењивачи топлоте овог типа се одликују великом

компактношћу (обично $600\text{--}2200\text{ m}^2/\text{m}^3$) а максимално до $4500\text{m}^2/\text{m}^3$, могућношћу стварања супротносмерног, истомерног или унакрсног тока, па чак и за више од два радна флуида у једном апарату. Људска плућа имају компактност око $17500\text{ m}^2/\text{m}^3$. Користе се као грејачи, кондезатори, испаривачи. [8]

Компактни се изграђују од алуминијума (распон температуре разних флуида је од -268 степени до 260 степени, за притиске од 6 бара). Размењивачи направљени од челика могу да издрже притиак до 30 бара (неке конструкције и 80 бара), а максималне радне температуре износе око 650 степени. Основни елемент конструкције компактног размењивача топлоте се састоји од две разделне равне плоче, између којих се поставља профилисано ребро. Већи број ових елемената спојених у компактну целину, представља размењивач топлоте. Облик ребара се одабира за сваки радни флуид, а понекад може бити и изостављено ребро, уколико то захтева задатак. [9]



Слика 3.2 - Плочасти размењивач топлоте [18]

3.1.1. Лемљени плочасти размењивач топлоте

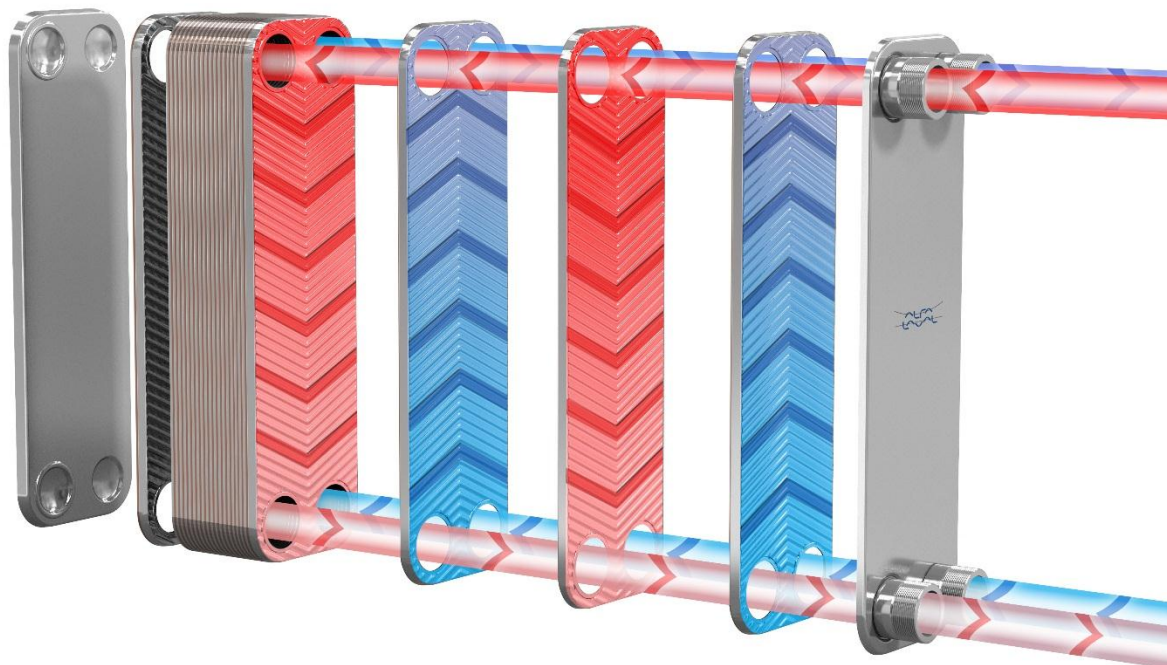
Налазе широку примену и индустрији (хлађење хидрауличких уља у машинама, рекуперација топлоте у разним процесима, пастеризација разних течности у прехранбеној индустрији), у грејној техници (у системима даљинског грејања, централна примена топле воде, топлотне пумпе), расхладна техника (кондезатори, испаривачи, економајзери, топлотне пумпе).

Лемљени размењивачи топлоте се састоје од одређеног броја профилисаних металних плоча са отворима кроз који пролазе два медијума (флуида), између којих се врши размена топлоте. Суседне плоче су међусобно заокренуте на 180 степени и на тај начин се формира површина за размену топлоте. Пошто се плоче споје вакумским лепљењем, на овај начин се формира компактна структура која је у стању да издржи знатне радне притиске (до 40 бара) и представља врло ефикасан систем за размену топлоте. Профилисање плоча је тако уређено да после лемљења обезбеди апсолутно заптивање, тако да не постоји могућност да дође до мешања радних флуида. Профилисани плоча такође потпомаже и стварање турбулентног струјања који помаже у што ефикаснијем преносу топлоте. [10]

Предност лемљених размењивача топлоте се огледа у малим температурним разликама између две стране (омогућава већу укупну ефикасност целог система), високи радни притисци (до 40 бара), отпорност замрзавању, компактност, економичност (ниска цена, брза и лака инсталација, лако одржавање, висока ефикасност). [10]

У случају да дође до нагомилавања нечистоћа, каменца, чишћење се врши испирањем слабиим растворима киселине у супротном смеру од смера струјања флуида. Најчешће се користи 5% раствор фосфорне киселине (H_3PO_4) и 5% раствор оксалане киселине ($H_2C_2O_4$), а након тога добро испирање чистом водом. Лако одржавање и доступност чишћењу сматра се једном од већих предности плочастих размењивача топлоте у односу на друге врсте.

Канали се формирају између плоча два флуида (слика 3.3) теку у супротном смеру. Да би се постигао најефикаснији пренос топлоте. Пренос се одија преко велике површине. Слој плоче је специјално дизајнирана да индукује максималну турбуленцију и равномерну расподелу оба тока флуида, како би трансфер био што ефикаснији.



Слика 3.3 - Лемљени размењивач топлоте [18]

3.1.2. Размењивачи топлоте са заптивкама

Плоче су постављене између предње и задње завршне плоче, стегнуте помоћу навојних шипки. Између профилисаних плоча налазе се заптивке које служе да задрже и усмере радни флуид између унутрашњих плоча. Заптивке су направљене од ЕПДМ (етилен-пропилен-термодимер - каучук), чија је максимална радна температура од -140 степени. Понекад је заптивка и од НБР (нитрил), када је радни флуид бензин или уље, максимална радна температура је 110 степена.

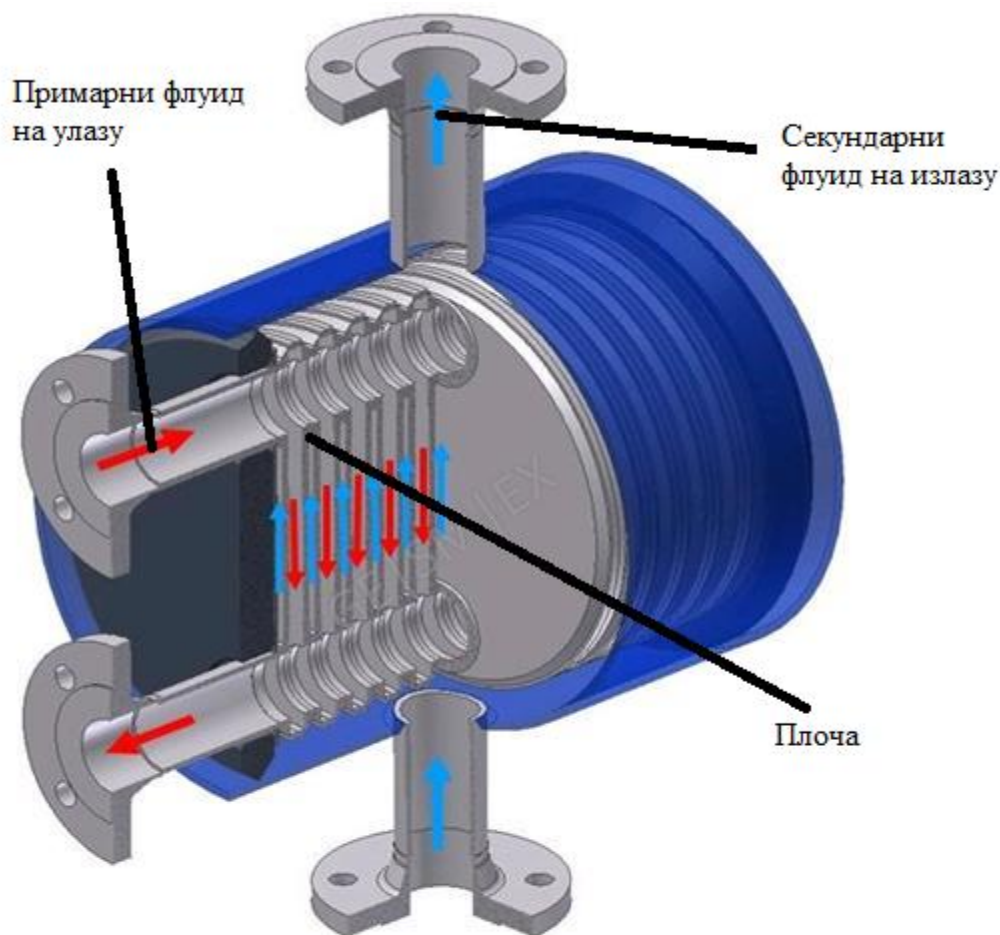
Најчешћа је примена за санитарну топлу воду, за раздвајање термичких кола, систем централног грејања, за поновно искоришћавање топлоте за индустријске процесе, за хлађење или грејање прехранбених супстанци (млеко, пиво, вино), за хлађење индустријских погона, за загревање воде за купање у базенима, саунама.

3.1.3. Плочасто добошати размењивачи топлоте

Идеалан спој плочастих и добошасто цевастих размењивача топлоте, комбинујући најбоље карактеристике обе врсте размењивача топлоте (степен ефикасности, мале габарите плочастих размењивача топлоте са сигурношћу и отпорношћу на високе температуре и притиске добошато цевастих размењивача топлоте). (Слика 3.4). Унутрашњост плоче су међусобно заварене тако да не постоје заптивке, пошто овом типу размењивача топлоте омогућава рад у температурном распону од – 200 степени до 500 степена Целзијуса, као и

рад на врло високим радним притицима (до 100 бара и више). Степен корисноти код плочасто добошатих је врло висок, до 95%. Примена је готово у свим областима где потоји потреба за разменом топлоте између два флуида (систем грејања, врло често као примарни размењивач а капацитетима од неколико мегавата), у рахладној техници, као испаривачи кондезатори, индугрији за грејање и хлађење хидрауличких уља. У последње време своје мето су пронашли у функцији економајзера и рекуператора (топлотне енергије отпадних гаова). Једна од највећих предности плочасто добошатих размењивача топлоте је лако, брзо чишћење једне стране размењивача, због чега се овај тип размењивача врло често користи код великих котловских постројења где служи као примарни размењивач топлоте, односно као заштита котла од нечистоћа, које би могле да стигну из топловодне мреже. [10]

Плочаста страна се састоји од округлих валовитих плоча, које се наизменично варе на ободима, или на суседна два отвора на плочама. Цилиндрична страна се састоји од цилиндричне шкољке, која је потпуно заварена, али има отвор на једној или на обе стране. Отвори између таласастих плоча формирају канале за проток, где улазе примарни и секундарни флуиди. Правац протока може бити истосмерни, супротносмерни или унакрсни. Топлота се преноси преко валовитих плоча, на тај начин се ствара турбуленција и побољшава пренос топлоте. Могу се плоче конфигурисати за вишеструке пролазе, па се на тај начин повећава термичка дужина. [31]



Слика 3.4 - Плочасто добошасти размењивач топлоте [31]

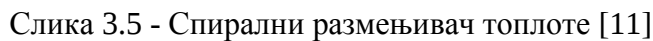
3.1.4. Спирални плочасти размењивачи топлоте

Примарна идеја о спиралним плочатим размењивачима топлоте је предложена још у 19.-ом веку, али због недостатка материјала и техника производње њихов развој је одложен све до 1930-е године. Од тада је наступио интензиван напредак у развоју, производњи и употреби у многим индустријама, укључујући хемијку, челичну, папирну. Први произведен спирални размењивач топлоте је био врло једноставан у својој конструкцији. Састојао се од две металне траке, савијене у кружном облику, како би се формирала два концентрична канала кроз које би пролазили флуиди у супротним смеровима. Брзина преноса зависила је од ширине канала. До 1960-е године, максималан капацитет преноса је био $200 \text{ (m}^2\text{)}$, јер је челична трака доступна само у уским ширинама.

Данашњи концепт грађе се састоји од две дугачке металне плоче које се увијају око средишњег језгра, како би се формирала два концентрична пролаза, по један за сваки флуид.

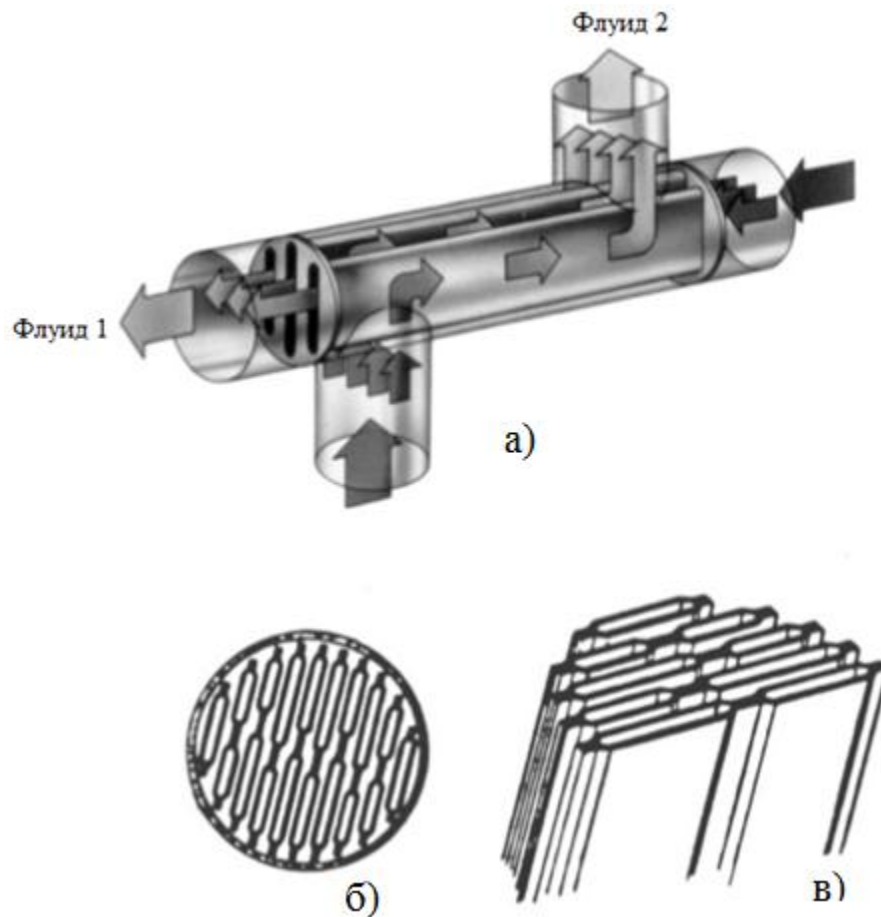
Други закривљени канали обезбеђују добру дистрибуцију протока, интензивну турбуленију и висок коефицијент преноса топлоте (50 - 100% већу од цевастих). Скидајући поклопци који се налазе у оквиру њихове контрукције омогућавају једноставан приступ унутрашњим површинама, ради детаљнијег чишћења и одржавања. Идеална употреба на вискозним густо замућеним течностима или течностима које имају доста влакана и честица.

[6]



Ламелни размењивачи топлоте састоје се од низа паралелних, заварених, танких плочатих ламела, постављених у плашту (љуска). [12] Ламеле могу бити равне или валовите. Један флуид пролази кроз цев, док друга протиче кроз размак између цеви. Најчешће су изграђене од алуминијума (па имају велику ефикасност у пролазу топлоте, али и од титанијума и нерђајућег челика. Имају високу турбуленцију, униформну дистрибуцију токова, лаки су и доступни инспекцији и чишћењу (могуће је ламелни сноп уклонити из љуске и извршити чишћење), за разлику од цевастих где у случају оштећења мора се заменити цео уређај, што је сада повољније и економичније по купце. Ова врста размењивача се користи на ниским температурама, као што су постројења за укуп гаса, и у индустрији мотора за авионе, у индустрији целулозе и папира.

Предности су висока ефиканост пролаза топлоте, веће подручје пролаза топлоте, приближно су око пет пута лакши од цевастих, могу поднети високе притиске. Недостаци су појава наслага због уских пролаза и тешко чишћење уских пролаза. [13]



Слика 3.6 - Ламеларни размењивач топлоте [28]

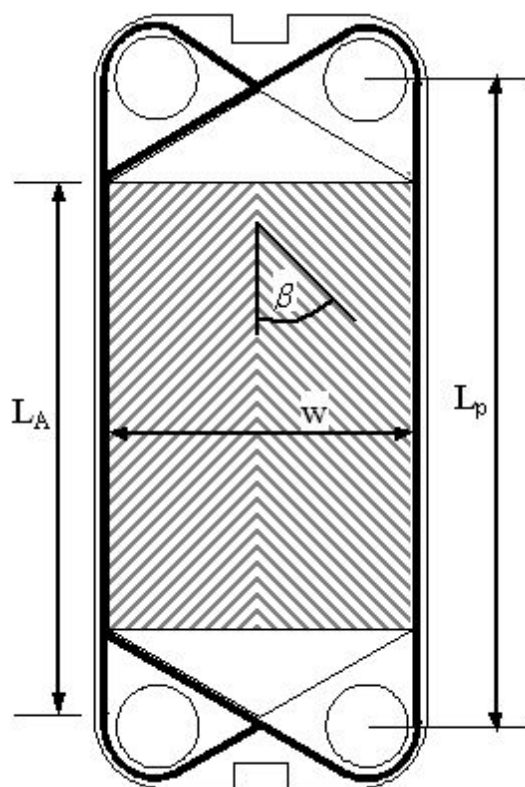
Један од проблема са којима се сусрећу готово сви размењивачи топлоте у свом раду јесу корозија и таложење. Талог је најчешће со, седимент, кристали, полимери. Овај талог утиче на пренос топлоте и доводи до квара. Корозија представља механичко оштећење и погоршање материјала због агресивног утицаја и контакта течноти на материјал. За ублажавање корозије и талога Panchal и Knudsen (1988), су дали смернице

- додатак хемијских адитива,
- коришћење физичких уређаја за чишћење
- прилагођавање процеса (праћењем, заменом воде),
- коришћењем алтернативних уређаја и метода (магнети, радиоталаси),
- најчешћа је даље употреба чисте воде, за прање и испирање.

Постоје бројне анализе које омогућавају инжењерима што бољу и прецизну анализу размењивача топлоте, и отклањање додатних недостатака, а односе се у већини случајева на брзину и величину. Методе које су у примени су:

-LMTD метод
 -NTU метод. [14]

3.1.6 Изрази за прорачун плочастог размењивача топлоте



Слика 3.7 – Изглед плоче стандардног размењивача топлоте

Укупна размењена количина топлоте у апарату (под условом занемарених губитака) се може приказати као:

$$Q = m_1 C_1 (T_{1u} - T_{1i}) \quad (16)$$

$$Q = m_2 C_2 (T_{2i} - T_{2u}) \quad (17)$$

$$Q = K \Delta T m A \quad (18)$$

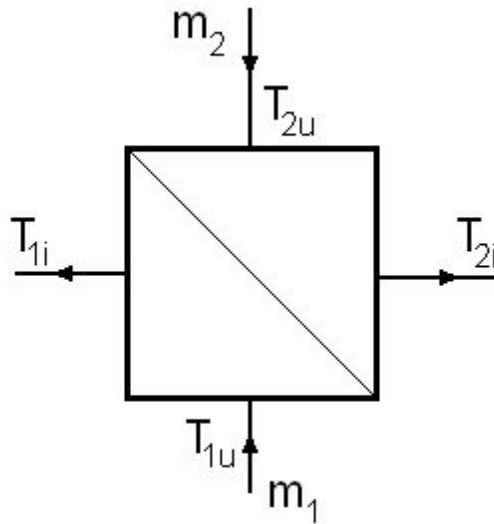
Активна површина размењивача топлоте се израчунава као:

$$A = (N - 2) w L \quad (19)$$

где су N (-) број плоча размењивача топлоте, w (m) ефективна ширина плоче (до заптивача) и L (m) ефективна висина плоче (слика 3.7). Већина аутора подразумева под висином L_a , величину (слика 3.7).

Средња логаритамска разлика температуре за супротносмеран размењивач износи износи:

$$\Delta T_M = \frac{(T_{1u} - T_{2i}) - (T_{1i} - T_{2u})}{\ln \frac{T_{1u} - T_{2i}}{T_{1i} - T_{2u}}} \quad (20)$$



Слика 3.8 – Принципска шема супротносмерног размењивача топлоте

Средњи коефицијент пролаза топлоте у размењивачу се израчунава као:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \frac{\delta_p}{\lambda_p} + \frac{1}{h_2}} \quad (21)$$

где су δ_p (m) дебљина плоче λ_p (W/m² K) топлотна проводљивост материјала плоче, h_1 (W/m² K) коефицијент прелаза топлоте са топлијег флуида на плочу, h_2 (W/m² K) коефицијент прелаза топлоте са плоче на хладнији флуид.

Коефицијент прелаза топлоте h се израчунава према формули:

$$h = \frac{Nu\lambda}{de} \quad (22)$$

где су средњи Nu (-) средњи Нуселт-ов број посматраног флуида, λ (W/m K) топлотна проводљивост посматраног флуида, d_e (m) геометријска карактеристика струјања посматраног флуида (хидраулични пречник).

Хидраулички пречник струјања флуида кроз плочасти размењивач топлоте се израчунава као:

$$d_e = \frac{2bp}{\mu_p} \quad (23)$$

где су b_p (m) дебљина плочастог канала (3-5 mm), μ_p (-) фактор набораности плоче. Овај фактор се израчунава као:

$$\mu_p = \frac{\text{развијена површина}}{\text{пројектована површина}} \text{ плоче.}$$

За стандардне плоче фактор μ_p узима вредност од 1.1 – 1.25.

Средњи Нуселт-ов број за турбулентни ток флуида у плочастом размењивачу топлоте се израчунава као: [32]

$$Nu = C Re^a Pr^b \left(\frac{\mu_f}{\mu_z}\right)^x \quad (24)$$

где су C, a, b и x (-) коефицијент Re (-) рејнолдсов број флуида, Pr (-) Прандлтов број флуида μ_f , μ_z (Pa s) динамичка вискозност флуида на средњој температури флуида, и на температури зида, респективно.

За различите конструкције плоча коефицијент C, a, b и x узимају различите вредности најчешће у опсезима:

$$0.15 < C < 0.40$$

$$0.65 < a < 0.85$$

$$0.3 < b < 0.45$$

$$0.05 < x < 0.20$$

(уобичајне вредности $b=0.33$)

(уобичајне вредности $x=0.14$ и $x=0.17$)

Прандлт-ов број, Pr се читава из табеле за дату средњу температуру флуида, а Рејнолдсов број, Re се за плочасти размењивач топлоте израчунава као:

$$Re = \frac{m d_e}{\frac{(N-1)}{2} b_p w \mu_f} \quad (25)$$

где је m (kg/s) масени проток посматраног флуида. Израз $m/[(N-1)/2]$ представља масени проток флуида по једном проточном пресеку између две плоче, а израз $b_p w$ представља површину поменутог проточног пресека.

Када се из једначине (20) израчуна коефицијент пролаза топлоте K и за познату вредност површина A једначина (19) могу се израчунати непознате температуре (16) – (18):

$$T_{1u} - T_{1i} = \psi (T_{1u} - T_{2u}) \quad (26)$$

$$T_{2u} - T_{2i} = \psi (T_{1u} - T_{2u}) W_1/W_2 \quad (27)$$

$$\psi = \frac{1 - e^{-(1-\frac{W_1}{W_2})\frac{KA}{W_1}}}{1 - \frac{W_1}{W_2} e^{-(1-\frac{W_1}{W_2})\frac{KA}{W_1}}} \quad (28)$$

Укупан пад притиска у плочастом размењивачу топлоте, Δp_u (Pa) се може израчунати као:

$$\Delta p_u = \Delta p_l + \Delta p_{tr} \quad (29)$$

где су Δp_l (Pa) пад притиска услед локалних отпора (улаз излаз флуида из зоне размене топлоте и Δp_{tr} (Pa) пад притиска услед трења. Пад притиска услед локалних отпора се израчунава као:

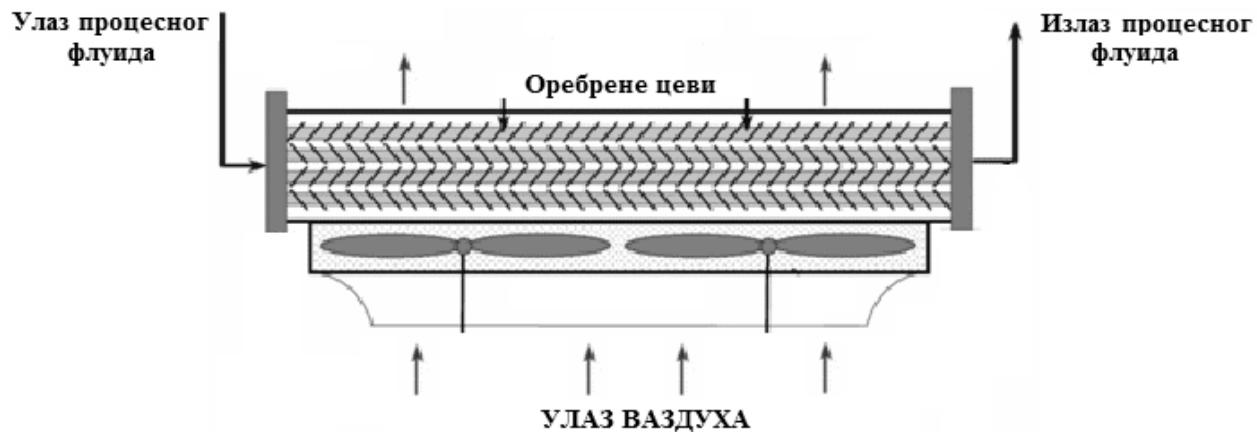
$$\Delta p_l = 1.5 \frac{\rho w_u^2}{2} \quad (30)$$

где је w_u (m/s) улазна брзина у простор између две плоче. Пад притиска услед локалних отпора се израчунава као: [32]

$$\Delta p_{tr} = \frac{f L}{d_e} \frac{\rho w^2}{2} \quad (31)$$

3.2 Ваздушни размењивачи топлоте

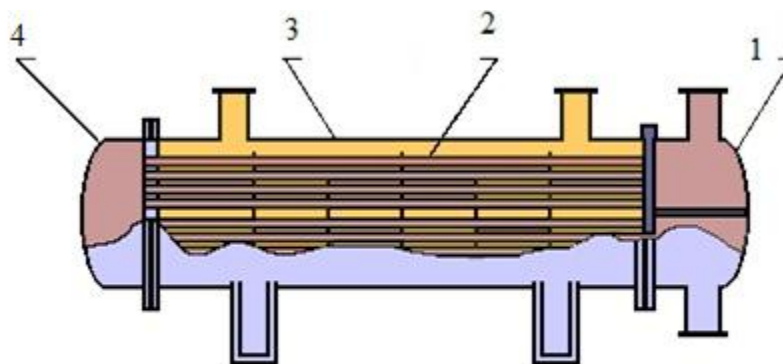
Под размењивачима топлоте са оребреним цевима подразумевамо апарате код којих су цеви у снопу оребрене са спољашње стране. Кроз цеви апарат протиче процени или енергетски флуид, а са спољашње стране цевни токови. Уколико се овакви апарати користе за хлађење проценог или енергетског флуида, као хладнији флуид се може користити ваздух, па се ови апарати зову размењивачи топлоте хлађени ваздухом. Струјање гаса, односно ваздуха, се остварује принудно, помоћу вентилатора, а постоје и апарати са природним струјањем гаса на пример продукти сагоревања високе температуре. Вентилатори могу бити усисни или потисни, при чему се користе и аксијални и радијални вентилатори (у пракси се најчешће срећу усисни аксијални вентилатори). На слици 3.9 је шематски приказан размењивач топлоте са ваздушним хлађењем, мали интезитет прелаза топлоте између гаса и спољашње површине цеви се компензује релативно великом површином ребара. Проток ваздуха кроз ваздушне хладњаке се мења у зависности од локалних климатских услова у току године, изменом броја обртаја вентилаторског котла, променом угла лопатица вентилатора. Коришћење овог типа апарата се препоручује у подручјима без довољно воде за хлађење и када температурски режим дозвољава употребу ваздуха као хладнијег флуида. Повећање интезитета хлађења се може остварити квашењем спољашње површине цеви помоћу воде која се распршује преко цевног снопа. [29]



Слика 3.9 – Ваздушни размењивач топлоте [29]

3.3 Размењивач топлоте цев и омотач

Широка примена у индустрији, за грејање и хлађење течности. Сатоји се од шкољке у којој се налазе цеву. Флуиди могу бити течност или гасови, један протиче унутар цеву, а други ван цеву унутар љуске. (слика 3.10)



Слика 3.10 – Размењивач топлоте цев и омотач [29]

- 1- Предња глава
- 2- Цевни склоп
- 3- Омотач
- 4- Задња глава

3.4 Размењивачи топлоте за специјалне намене

Све специјалне размењиваче топлоте делимо на основу намене и употребе на

- криогене,
- топлотне цеви,
- сушаре,
- ситем за исправање,
- пећи и коморе за сагоревање. [29]

4 ПРОРАЧИН КОЕФИЦИЈЕНТА ПРЕЛАЗА ТОПЛОТЕ КОД ЦЕВАСТИХ И ПЛОЧАСТИХ РАЗМЕЊИВАЧА ТОПЛОТЕ

У овом поглављу размотрићемо математички прорачун коефицијента прелаза топлоте код цевастих и плочастих размењивача топлоте.

Усвојићемо следеће вредности за прорачун:

- $T_1 = 90$ (°C) - температура зида
- $T_2 = 70$ (°C) - температура воде
- $\beta = 0,00057$ (1/K) – коефицијент термичког ширења воде на температури од 70 (°C) (табела 1)
- $\rho = 978$ (kg/m³) - густина воде на температури од 70 (°C)
- $Pr = 2,55$ (-) Прандтлов број воде на температури од 70 (°C) (табела 1)
- $Pr_z = 1,95$ (-) - Прандтлов број зида на температури од 90 (°C) (табела 1)
- $K = 0,668$ () - топлотна проводљивост воде на температури од 70 (°C) (табела 1)
- $\nu = 0,000000415$ (m²/s) - кинематска вискозност воде на 70 (°C) (табела 2)

Табела 1 Неке физичке особине воде за равнотежу течност – пара у зависности од температуре [33]

T (°C)	Кључала течност					Сувозасићена пара				
	$\mu \cdot 10^{-7}$ (Pa s)	k (W/mK)	cp (KJ/kgK)	Pr (-)	$\beta \cdot 10^{-2}$ 1/K	$\mu \cdot 10^{-7}$ (Pa s)	k (W/mK)	cp (KJ/kgK)	Pr (-)	$\beta \cdot 10^{-2}$ 1/K
0	17525	0,569	4,217	12,99	-0,678	80,4	0,0176	1,864	0,85	36,81
20	10015	0,602	4,182	6,69	2,067	88,5	0,0188	1,874	0,88	34,47
40	6513	0,630	4,179	4,32	3,854	96,6	0,0201	1,894	0,91	32,53
60	4630	0,653	4,185	2,97	5,233	105	0,0216	1,924	0,94	30,96
80	3510	0,669	4,197	2,20	6,414	113	0,0231	1,969	0,96	29,79
100	2790	0,680	4,216	1,73	7,506	121	0,0248	2,034	0,99	29,02
120	2300	0,685	4,245	1,43	8,578	128	0,0267	2,124	1,02	28,72
140	1950	0,687	4,285	1,22	9,684	135	0,0288	2,245	1,05	28,94
160	1690	0,684	4,339	1,07	10,88	142	0,0313	2,406	1,09	29,73
180	1493	0,676	4,408	0,97	12,22	149	0,0341	2,615	1,14	31,16
200	1338	0,664	4,497	0,91	13,79	156	0,0375	2,883	1,20	33,34
220	1215	0,648	4,614	0,86	15,69	163	0,0415	3,223	1,27	36,44
240	1114	0,629	4,770	0,85	18,10	171	0,0465	3,656	1,34	40,84
260	1030	0,604	4,985	0,85	21,30	178	0,0528	4,221	1,42	47,15
280	961	0,573	5,30	0,89	25,81	187	0,0609	4,996	1,53	56,58
300	901	0,540	5,77	0,96	32,74	198	0,0719	6,14	1,69	71,66
320	830	0,503	6,50	1,09	44,86	214	0,0878	8,05	1,96	98,71
340	748	0,460	8,27	1,34	71,75	238	0,1130	11,92	2,51	158,8
360	644	0,401	14,99	2,41	191,2	282	0,1500	26,79	5,04	395,4
380	564	0,338	53,90	8,99		335	0,1830	112,9	20,66	

Табела 2 Кинематска вискозност течне воде и паре, $\nu 10^{-7} \text{ (m}^2/\text{s)}$ [33]

T (°C)	P (bar)						
	1	20	40	60	80	100	200
0	17,53	17,50	17,47	17,44	17,4	17,38	17,24
20	10,03	10,01	10,01	10,00	10,0	9,97	9,92
30	8,00	7,99	7,99	7,98	8,0	7,96	7,94
40	6,56	6,56	6,55	6,54	6,5	6,54	6,52
50	5,51	5,50	5,51	5,49	5,5	5,50	5,48
60	4,71	4,50	4,71	4,70	4,7	4,70	4,69
80	3,61	3,61	3,61	3,61	3,6	3,61	3,62
100	205,10	2,91	2,91	2,91	2,9	2,92	2,92

Табела 3 Преглед израза за израчунавање коефицијента прелаза топлоте - принудна конвекција [4]

Бр.	Врста струјања, облик и положај чврсте површине	C	n	m	r
1	Ламинарно стријање дуж равног зида или плоче $Re < 5 \cdot 10^5$	0,66	0,50	0,43	0
2	Турбулентно струјање дуж равног зида или плоче $Re > 5 \cdot 10^5$	0,037	0,80	0,43	0
3	Ламинарно струјање у правој цеви $Re < 2300$	$0,15 \epsilon_L$	0,33	0,43	0,1
4	Прелазни режим струјања у правој цеви $2300 < Re < 1 \cdot 10^5$	K_0	0	0,43	0
5	Турбулентно струјање у правој цеви $1 \cdot 10^4 < Re < 5 \cdot 10^6$	$0,021 \epsilon_L$	0,80	0,43	0

Табела 4 Вредност коефицијента K_0 [4]

$Re \cdot 10^{-3}$	2,1	2,3	2,5	3	3,5	4	5	6	7	8	9	10
K_0	1,19	3,3	4,4	6	10	12,5	15,5	19,5	24	27	30	33

4.1 Прва варијанта поређења коефицијента прелаза топлоте код цевастих и плочастих размењивача топлоте

Прво ћемо израчунати коефицијент прелаза топлоте за цевасте размењивач топлоте. Усвојићемо следеће вредности: $m_1=0,2$ и $d_1=0,4$ где су m (kg/s) масени проток флуида кроз размењивач топлоте и d (m) пречник цевовода у којем се налази топлији флуид.

Најпре ћемо израчунати брзину флуида у цевастом размењивачу топлоте:

$$V_1 = \frac{m_1}{\rho d_1^2 \pi} \quad V_1 = \frac{0,2}{978 \cdot 0,4^2 \cdot 3,14} \quad V_1 = 0,00162 \text{ (m/s)}$$

Након израчунате брзине можемо израчунати Рејнолдсов број (Re):

$$Re_1 = \frac{V_1 d_1}{\nu} \quad Re_1 = \frac{0,00162 \cdot 0,4}{0,000000415} \quad Re_1 = 1561,44 \text{ (-)}$$

Добили смо ламинарни режим струјања.

Сада ћемо израчунати Грасхоф –ов број:

$$Gr_1 = \frac{\beta g (T_1 - T_2) d_1^3}{\nu}$$

$$Gr_1 = \frac{0,00057 \cdot 9,81 \cdot (90 - 70) \cdot 0,4^3}{0,000000415}$$

$$Gr_1 = 4,1558 \cdot 10^{10} \text{ (-)}$$

Следи нуселт-ов број:

$$Nu_1 = C Re_1^n Pr^m Gr_1^r \left(\frac{Pr}{Pr_z}\right)^{0,25}$$

$$Nu_1 = 0,15 \cdot 1561^{0,33} \cdot 2,55^{0,43} \cdot (4,1558 \cdot 10^{10})^{0,1} \cdot \left(\frac{2,55}{1,95}\right)^{0,25}$$

$$Nu_1 = 31,312 \text{ (-)}$$

где су: C , m , n и r , усвојени из табеле (табела 3) за ламинарно струјање у правој цеви.

Сада можемо да израчунамо коефицијент прелаза топлоте h (W/m² K):

$$h_1 = \frac{Nu_1 K}{d_1}$$

$$h_1 = \frac{31,312 \cdot 0,668}{0,4}$$

$$h_1 = 52,291 \text{ (W/m}^2 \text{ K)}$$

Следи поступни прорачун коефицијента прелаза топлоте за плочасти размењивач топлоте.

Усвојићемо вредности: $m_2=0,03 \text{ (kg/s)}$.

Израчунаћемо брзину кретања флуида кроз плочасти размењивач топлоте:

$$V_2 = \frac{m_2}{\rho \cdot b \cdot w} \quad V_2 = \frac{0,03}{978 \cdot 0,03 \cdot 0,3} \quad V_2 = 0,034 \text{ (m/s)}$$

где су: $b \text{ (m)}$ дебљина проточног канала, а $w \text{ (m)}$ висина плоче.

Израчунаћемо геометријску карактеристику струјања $l_1 \text{ (m)}$:

$$l_1 = \frac{2 \cdot b}{\mu}$$

$$l_1 = 0,006 \text{ (m)}$$

где су: μ степен набораности плоче.

Следи Рејнолдсов број:

$$Re_2 = \frac{V_2 \cdot l_1}{\nu} \quad Re_2 = \frac{0,034 \cdot 0,006}{0,000000415} \quad Re_2 = 491,56 \text{ (-)}$$

$$Gr_2 = \frac{\beta \cdot g \cdot (T_1 - T_2) \cdot l_1^3}{\nu}$$

$$Gr_2 = \frac{0,00057 \cdot 9,81 \cdot (90 - 70) \cdot 0,006^3}{0,000000415}$$

$$Gr_2 = 140259,219 \text{ (-)}$$

$$Nu_2 = C \cdot Re_2^a \cdot Pr^b \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_z}\right)^{0,14}$$

$$Nu_2 = 0,15 \cdot 491,56^{0,75} \cdot 2,55^{0,33} \cdot \left(\frac{2,55}{1,95}\right)^{0,14}$$

$$Nu_2 = 22,143 \text{ (-)}$$

где су: а и в усвојени са стране 39.

$$h_2 = \frac{Nu_2 K}{l_1}$$

$$h_2 = \frac{22,143 \cdot 0,668}{0,006}$$

$$h_2 = 2465 \text{ (W/m}^2 \text{ K)}$$

Дакле у првој варијанти за одговарајуће режиме (ламинарно код цевастих и турбулентно код плочастих) струјања је доказано да је коефицијент прелаза топлоте $h_1 = 52,291 \text{ (W/m}^2 \text{ K)}$ за цевасте ратмењивач топлоте мањи од $h_2 = 2465 \text{ (W/m}^2 \text{ K)}$ коефицијента прелаза топлоте за плочасти размењивач топлоте.

4.2 Друга варијанта поређења коефицијента прелаза топлоте код цевастих и плочастих размењивача топлоте

Следи друга варијанта, али овога пута масени проток ће износити $m_3=0,2 \text{ (kg/s)}$ и пречник $d_2=0,1 \text{ (m)}$.

$$V_3 = \frac{m_3}{\rho d_2^2 \pi} \quad V_3 = \frac{0,1}{978 \cdot 0,1^2 \cdot 3,14} \quad V_3 = 0,026 \text{ (m/s)}$$

$$Re_3 = \frac{V_3 d_3}{\nu} \quad Re_3 = \frac{0,026 \cdot 0,1}{0,000000415} \quad Re_3 = 6265,0602 \text{ (-)}$$

Добили смо прелазни режим струјања.

$$Gr_3 = \frac{\beta g (T_1 - T_2) d_3^3}{\nu}$$

$$Gr_3 = \frac{0,00057 \cdot 9,81 (90 - 70) \cdot 0,1^3}{0,000000415}$$

$$Gr_3 = 649348236,3 \text{ (-)}$$

$$Nu_3 = K_0 \cdot Pr^m \left(\frac{Pr}{Pr_z} \right)^{0,25}$$

$$Nu_3 = 19,5 \cdot 2,55^{0,043} \left(\frac{2,55}{1,95} \right)^{0,25}$$

$$Nu_3 = 31,186 (-)$$

где су: K_0 и m , усвојени из табеле (табела 3 и 4) за прелазни режим струјања у правој цеви.

$$h_3 = \frac{Nu_3 K}{d_2}$$

$$h_3 = \frac{31,186 \cdot 0,668}{0,1}$$

$$h_3 = 208,3224 \text{ (W/m}^2 \text{ K)}$$

Следи поступни прорачун коефицијента прелаза топлоте за плочасти размењивач топлоте.

Усвојићемо вредности: $m_4=0,04$ (kg/s).

$$V_4 = \frac{m_4}{\rho \cdot b \cdot w} \quad V_4 = \frac{0,04}{978 \cdot 0,03 \cdot 0,3} \quad V_4 = 0,045 \text{ (m/s)}$$

$$Re_4 = \frac{V_4 l_1}{\nu} \quad Re_4 = \frac{0,045 \cdot 0,006}{0,000000415} \quad Re_4 = 650,602 (-)$$

$$Nu_4 = C Re_4^a Pr^b \left(\frac{Pr}{Pr_z}\right)^{0,14}$$

$$Nu_4 = 0,15 \cdot 650,602^{0,75} \cdot 2,55^{0,33} \left(\frac{2,55}{1,95}\right)^{0,14}$$

$$Nu_4 = 27,324 (-)$$

$$h_4 = \frac{Nu_4 K}{l_1}$$

$$h_4 = \frac{27,324 \cdot 0,668}{0,006}$$

$$h_4 = 3042,083 \text{ (W/m}^2 \text{ K)}$$

Дакле и у другој варијанти за одговарајуће режиме (прелазни код цевастих и турбулентно код плочастих) струјања је доказано да је коефицијент прелаза топлоте $h_3 = 208,3224 \text{ (W/m}^2 \text{ K)}$ за цевасте размењивач топлоте мањи од $h_4 = 3053,083 \text{ (W/m}^2 \text{ K)}$ коефицијента прелаза топлоте за плочасти размењивач топлоте.

4.3 Трећа варијанта поређења коефицијента прелаза топлоте код цевастих и плочастих размењивача топлоте

Следи трећа варијанта, масени проток ће износити $m_5=0,1$ (kg/s) и пречник $d_3= 00,3$ (m).

$$V_5 = \frac{m_5}{\rho d_3^2 \pi} \quad V_5 = \frac{0,03}{978 \cdot 0,03^2 \cdot 3,14} \quad V_5 = 0,144 \text{ (m/s)}$$

$$Re_5 = \frac{V_5 d_3}{\nu} \quad Re_5 = \frac{0,144 \cdot 0,03}{0,000000415} \quad Re_5 = 10409,63 \text{ (-)}$$

Добили смо турбулентни режим струјања.

$$Gr_4 = \frac{\beta g (T_1 - T_2) d_4^3}{\nu}$$

$$Gr_4 = \frac{0,00057 \cdot 9,81 (90 - 70) \cdot 0,03^3}{0,000000415}$$

$$Gr_4 = 1,74 \cdot 10^{10} \text{ (-)}$$

$$Nu_5 = C Re_5^n Pr^m Gr_4^r \left(\frac{Pr}{Pr_z}\right)^{0,25}$$

$$Nu_5 = 0,21 \cdot 10409,63^{0,33} \cdot 2,55^{0,43} \cdot \left(\frac{2,55}{1,95}\right)^{0,25}$$

$$Nu_5 = 54,967 \text{ (-)}$$

где су: C, n и m, усвојени из табеле (табела 3) за турбулентни режим струјања у правој цеви.

$$h_5 = \frac{Nu_5 K}{d_3}$$

$$h_5 = \frac{54,967 \cdot 0,668}{0,1}$$

$$h_5 = 1223,93 \text{ (W/m}^2 \text{ K)}$$

Следи поступни прорачун коефицијента прелаза топлоте за плочасти размењивач топлоте.

Усвојићемо вредности: $m_6=0,05$ (kg/s).

$$V_6 = \frac{m_6}{\rho b w} \quad V_4 = \frac{0,05}{978 \cdot 0,03 \cdot 0,3} \quad V_6 = 0,056 \text{ (m/s)}$$

$$Re_6 = \frac{V_6 l_1}{\nu} \quad Re_6 = \frac{0,045 \cdot 0,006}{0,000000415} \quad Re_6 = 821,204 \text{ (-)}$$

$$Nu_6 = C Re_6^a Pr^b \left(\frac{Pr}{Pr_z} \right)^{0,14}$$

$$Nu_6 = 0,15 \cdot 821,204^{0,75} \cdot 2,55^{0,33} \left(\frac{2,55}{1,95} \right)^{0,14}$$

$$Nu_6 = 32,53 \text{ (-)}$$

$$h_6 = \frac{Nu_6 K}{l_1}$$

$$h_6 = \frac{32,53 \cdot 0,668}{0,006}$$

$$h_6 = 3621,673 \text{ (W/m}^2 \text{ K)}$$

И у трећој варијанти за одговарајуће режиме (турбулентни код цевастих и турбулентно код плочастих) струјања је доказано да је коефицијент прелаза топлоте $h_5 = 1223,93$ (W/m² K) за цевасте размењивач топлоте мањи од $h_6 = 3621,673$ (W/m² K) коефицијента прелаза топлоте за плочасти размењивач топлоте.

Дакле коефицијент прелаза топлоте у све три варијанте за различите режиме струјања је већи код плочастих размењивача у односу на цевасте.

5 ЗАКЉУЧАК

У данашњој ери, експанзије технике и машинства, савремен свакодневни живот би био другачији без употребе размењивача топлоте. Многе студије и анализе се односе на размењиваче топлоте а све у циљу побољшавања њихове функције, и односе на питања:

- како постићи што компактније размењиваче топлоте,
- како достићи што већу температурну ефикасност,
- како направити што бољи баланс између преноса топлоте и пада притиска?

Свим овим питањима с тенденцијом побољшавања и отклањања недостатака, баве се инжењери у пракси.

Детаљном анализом размењивача топлоте, на основу њихове грађе, конструкције, топлотне перформансе долазимо до закључка да су плочасти размењивачи топлоте врло компактан тип.

Њихова предност у односу на цевасте односи се на следеће параметре:

- 1-Три до пет пута већи топлотни пренос у односу на цевасте.
- 2-Флексибилност (вишеструки токови флуида се могу постићи у једној јединици, већа могућност за оптимално решење жељене функције),
- 3-Економичност и компактност (смањују коришћење простора и до 90%, иако су мањих димензија дају одличне топлотне перформансе, нижа цена, штеде новац и време за одржавање),
- 4-Лако одржавање (савремен дизајн смањује загађење које је прузроковано прљавштином и остацима, појединачно чишћење плоча и њихова лака доступност, дизајнирани за лако отклањање нечистоћа и хемикалија),
- 5- Приступачност (приступачност а обе стране површине за преглед, одржавање и чишћење, лака приступачност се постиже у већ инсталираном простору.

Из свега наведеног можемо закључити да плочасти размењивачи топлоте заузимају посебно место, да су врло популарни и данашњи живот би био другачији без њихове примене и употребе. [15]

6 ЛИТЕРАТУРА

- [1] Доступно на:
<http://www.explainthatstuff.com/how-heat-exchangers-work.html>, дана 26.08.2017.
- [2] Доступно на:
<http://www.arhiteko.hr/home.html>, дана 12.08.2017.
- [3] Доступно:
<https://klimauredjaji.com/klima-uredjaji-princip-rada>, дана 01.09.2017.
- [4] Лукић Н, Скрипта са предавања из предмета преноса топлоте и масе, Факултет инжењерских наука, Крагујевац, 2017.
- [5] Бојић М., Хнатко Е, Термотехника, Машински факултет, Крагујевац, 1987.
- [6] Доступно на:
<http://www.thermopedia.com/content/832/>, дана 22.07.2017.
- [7] Доступно на:
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fluidized_Bed_Reactor_Graphic-ru.svg, дана 1. 10. 2017
- [8] Доступно на:
<https://www.bionomicind.com/waste-heat-recovery/waste-heat-recover-systems.cfm>, дана 1.10. 2017
- [9] Томић М, Експериментално и нумеричко истраживање термо-струјних процеса у пакету перфорираних плоча, Докторска дисертација, Машински факултет у Нишу, 2015.
- [10] Доступно на:
<http://www.euroheat.co.rs/catalog/izmenjivaci-toplote/plocasto-dobosasti/>, дана 23.07.2017.
- [11] Доступно на:
<https://www.slideshare.net/harshadkangane/compact-heat-exchangers-19898807>, дана 1.10. 2017
- [12] Какаç S., Liu H., Pramuanjaroenkij A., Heat exchangers, CR Pres, New York, 2012.
- [13] Доступно на:
http://www.berglunds.se/sidor_en/lamell.html, дана 23.09.2017.
- [14] Доступно на:
<http://kb.eng-software.com/display/ESKB/Difference+Between+the+Effectiveness-NTU+and+LMTD+Methods>, дана 22.08.2017.

- [15] Доступно на:
http://www.spxflow.com/en/assets/pdf/Paraflow_General_1025_01_06_2008_US_tcm11-7070.pdf, дана 18.09.2017.
- [16] Ramesh K. Shah, Sekulic P. Dusan, Fundamentals of heat exchanger design, New Jersey, 2003.
- [17] Доступно на:
<http://mahans.com/the-evolution-of-heat-exchangers/>, дана 12.08.2017.
- [18] Доступно на:
<http://www.alfalaval.com/products/heat-transfer/plate-heat-exchangers/Brazed-plate-heat-exchangers/>, дана 13.08.2017.
- [19] Доступно:
<https://www.nrf.eu/about-nrf/history/>, дана 20.08.2017.
- [20] Доступно на:
www.hpscoka.edu.rs/sites/default/files/015tehop.pp, дана 15.07.2017.
- [21] Доступно на:
<https://energy.gov/articles/history-air-conditioning>, дана 17.07.2017.
- [22] Thulukkanam K., Karnopp D., Heat Exchanger Design Handbook, CRC Press, New York, 2013.
- [23] Доступно на:
<http://www.lytron.com/Tools-and-Technical-Reference/Application-Notes/What-is-a-Heat-Exchanger>, дана 23.08.2017.
- [24] Доступно:
<http://www.flux.rs/zilmet-plocasti.php>, дана 17.09.2017.
- [25] Доступно на:
<https://inspectioneering.com/tag/heat+exchangers>, дана 20.07.2017.
- [26] Доступно:
<https://www.slideshare.net/adlinilda/compact-heat-exchangers>, дана 01.08.2017.
- [27] Hamid Nabati, Optimal pin fin heat exchanger surface, Malardalen University Sweden, 2008.
- [28] Доступно на:
<http://artikel-teknologi.com/macam-macam-heat-exchanger-alat-penukar-panas-bagian-3/2/>, дана 4. 10. 2017

[29] Доступно на:
http://hedhme.com/content_map/?link_id=17361&article_id=330, дана 4.10.2017.

[30] Доступно на:
<http://moodle.mfkg.rs/course/view.php?id=187>, дана 4.10.2017

[31] Доступно на:
<http://www.gesmex.com/en/products/xps-plate-and-shell-en/xps-form-and-function>, дана 8.10.2017.

[32] Лукић Н, Скрипта са предавања из предмета Термоенергетски уређаји и постројења, Факултет инжењерских наука, Крагујевац, 2017.

[33] Лукић Н, Приручник за Термодинамику, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 2011.