

# Generatori pare na ispušne plinove

---

**Dušević, Kristian**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2017**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zadar / Sveučilište u Zadru**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:162:019821>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-12-25**



**Sveučilište u Zadru**  
Universitas Studiorum  
Jadertina | 1396 | 2002 |

*Repository / Repozitorij:*

[University of Zadar Institutional Repository](#)



zir.nsk.hr



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

Sveučilište u Zadru

Pomorski odjel - Brodostrojarški odsjek  
Jednopedmetni preddiplomski sveučilišni studij  
Brodostrojarstva i tehnologije pomorskog prometa



**Kristian Dušević**

**Generatori pare na ispušne plinove**

**Završni rad**

Zadar, 2017.

Sveučilište u Zadru

Pomorski odjel - Brodostrojarški odsjek  
Jednopedmetni preddiplomski sveučilišni studij  
Brodostrojarstva i tehnologije pomorskog prometa

## Generatori pare na ispušne plinove

Završni rad

Student/ica:

Kristian Dušević

Mentor/ica:

Dr.sc. Josip Orović

Zadar,2017.



## Izjava o akademskoj čestitosti

Ja, **Kristian Dušević**, ovime izjavljujem da je moj **izaberite** rad pod naslovom **Generatori pare na ispušne plinove** rezultat mogea vlastitog rada, da se temelji na mojim istraživanjima te da se oslanja na izvore i radove navedene u bilješkama i popisu literature. Ni jedan dio mogea rada nije napisan na nedopušten način, odnosno nije prepisan iz necitiranih radova i ne krši bilo čija autorska prava.

Izjavljujem da ni jedan dio ovoga rada nije iskorišten u kojem drugom radu pri bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj, obrazovnoj ili inoj ustanovi.

Sadržaj mogea rada u potpunosti odgovara sadržaju obranjenoga i nakon obrane uređenoga rada.

Zadar, 17. listopada 2017.

# Sadržaj

1. Uvod.....	1
2. Termodinamičke osnove rada generatora pare na ispušne plinove.....	2
2.1. Clausius–Rankineov proces.....	2
2.2. Prijelaz topline.....	4
2.2.1. Konvekcija (komešanje).....	4
2.2.2. Kondukcija (provođenje topline) .....	5
2.2.3. Radijacija (zračenje).....	5
2.2.4. Koeficijent prijelaza topline .....	6
3. Sastavni dijelovi generatora pare na ispušne plinove.....	8
3.1. Zagrijač vode .....	8
3.2. Isparivač.....	9
3.3. Pregrijač.....	9
3.4. Klapne za regulaciju .....	12
3.5. Nosiva konstrukcija i izolacija .....	12
4. Izvedbe generatora pare na ispušne plinove.....	13
4.1. Dimnocijevni generatori pare na ispušne plinove .....	15
4.2. Vodocijevni generatori pare na ispušne plinove.....	16
4.3. Dvotlačni generator pare na ispušne plinove.....	19
4.4. Kompozitni generator pare .....	21
5. Spoj generatora pare na ispušne plinove s loženim generatorom pare.....	23
5.1. Spoj s pomoćnim loženim generatorom pare .....	23
5.2. Spoj s dva pomoćna ložena generatora pare.....	25
6. Upravljanje generatorom pare na ispušne plinove .....	26
7. Održavanje generatora pare na ispušne plinove.....	27
7.1. Naslage čađe i kamenca.....	27
7.2. Pranje cijevi od čađe i tretiranje vode .....	27

8.	Požar generatora pare na ispušne plinove .....	29
9.	Zaključak .....	32
10.	Popis literature.....	33
11.	Popis slika .....	36

# 1. Uvod

Svi ne nužni uređaji i sustavi koji su instalirani na brodu, instalirani su zbog ekonomičnosti, sigurnosti ili zaštite okoliša. Brodari su oduvijek željeli dobiti što veći profit od sredstava koja su uložili u brod, dok ekološke direktive nalažu smanjenje emisija stakleničkih plinova. Smanjenjem potrošnje goriva povećava se profit brodarima smanjuju emisije stakleničkih plinova. Smanjenje potrošnje goriva se postiže mnogim metodama, a ovaj rad posebno obrađuje metodu za smanjenje potrošnje goriva regeneracijom topline iz ispušnih plinova toplinskih strojeva kao što su dizelski motori i plinske turbine. Uređaji koji omogućuju regeneraciju topline iz toplinskih strojeva nazivaju se – generatori pare na ispušne plinove (engl. Exhaust gas boilers). U današnje vrijeme većina brodova trgovačke mornarice ima ugrađen generator pare na ispušne plinove.

Oko 25 %, kod dizelskih motora [1], toplinske energije dobivene iz goriva bi preko ispušnih plinova izašlo u okoliš i bilo nepovratno izgubljeno bez uporabe generatora pare na ispušne plinove. Iz toga zaključujemo da generatori pare na ispušne plinove povećavaju iskoristivost cjelokupnog brodske porivnoenergetskog sustava.

Kako je temperatura ispušnih plinova koji izlaze iz turbopuhala dvotaktnog dizelskog motora 280°C - 340°C [2], a temperatura ispušnih plinova na izlazu iz generatora pare na ispušne plinove je oko 180°C [3], zaključujemo da ne možemo iskoristiti svu toplinu iz ispušnih plinova. Daljnje iskorištavanje temperature ispušnih plinova nije moguće jer bi zbog niske temperature ispušnih plinova došlo do kondenzacije vodene pare koja se nalazi u ispušnim plinovima. Taj kondenzat bi reagirao sa sumporovim dioksidom ( $\text{SO}_2$ ) i sumporovim trioksidom ( $\text{SO}_3$ ), koji također proizlaze iz ispušnih plinova, što bi rezultiralo stvaranjem sumporaste ( $\text{H}_2\text{SO}_3$ ) i sumporne ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) kiseline, koje prouzrokuju nagrizanje metala i posljedično oštećenje uređaja.

Para proizvedena u ovim uređajima se koristi za proizvodnju električne energije, grijanje tankova teškog goriva, za klimatizaciju, itd.

Generatori pare na ispušne plinove najčešće se smještaju u dimnjak broda, iznad glavnog motora, da bi ispušni plinovi sa što većom temperaturom ulazili u generator pare.

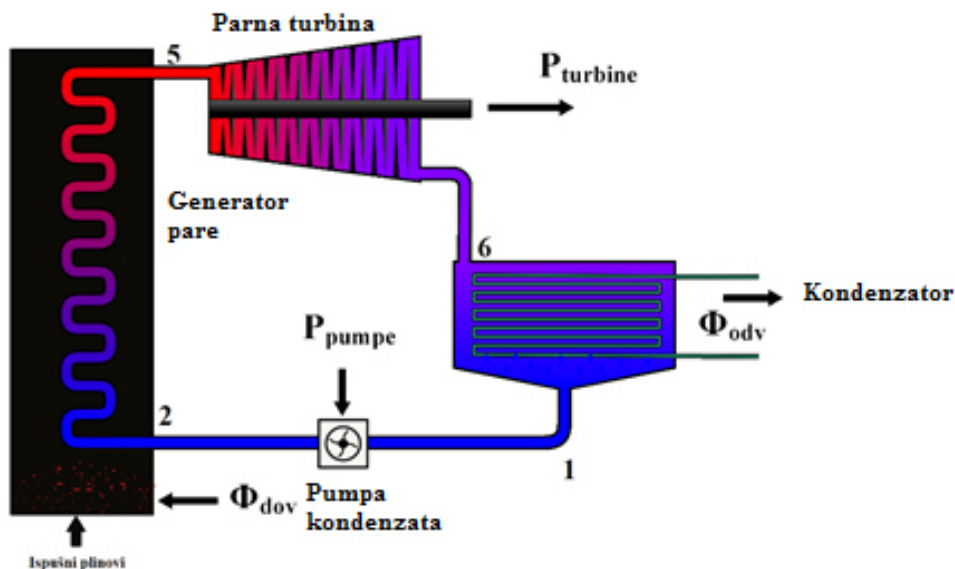
U ovome radu govorit će se o termodinamičkim osnovama rada, sastavnim dijelovima, izvedbama, načinu održavanja, te spriječavanju nastanka požara unutar ovih uređaja.

## 2. Termodinamičke osnove rada generatora pare na ispušne plinove

Generator pare na ispušne plinove je toplinski uređaj i kao takav radi prema nekim termodinamičkim zakonostima. U ovome poglavlju biti će objašnjen termodinamički proces po kojem radi generator pare na ispušne plinove, načini prijelaza topline s ispušnih plinova na vodu, te koeficijent prijelaza topline.

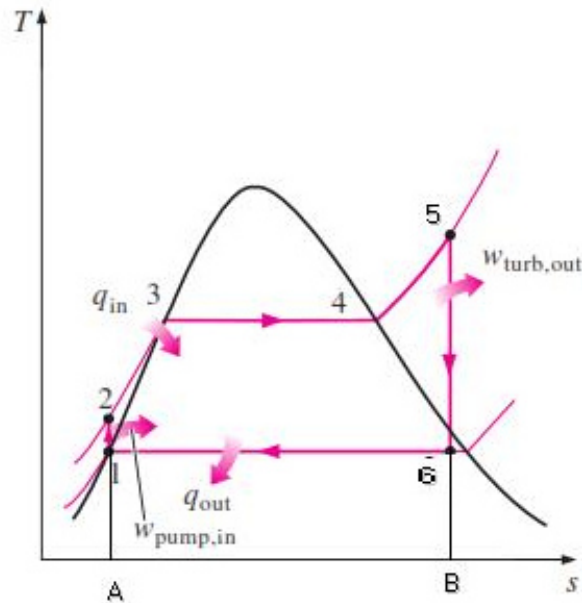
### 2.1. Clausius–Rankineov proces

Clausius–Rankineov proces je termodinamički proces po kojem radi cijelokupno paroturbinsko postrojenje. U ovome procesu radni medij (voda), prelazi iz kapljevitoagregatnog stanja u parovito, te kad nakon što obavi rad voda se ponovno ukapljuje. Proces se sastoji od 4 osnovne komponente: generatora pare, turbine, kondenzatora i pumpe kondenzata, kao što je prikazano na slici 1.



Slika 1. Osnovne komponente Clausius-Rankineovog procesa [4]





Slika 2. T-s dijagram idealnog (bez gubitaka) Clausius-Rankineovog procesa[5]

Na slici 2. prikazan je T-s dijagram ovog procesa. S dijagrama očitavamo sljedeće faze u ovome procesu:

1-2 – Tlak kondenzata se adijabatski podiže do tlaka u generatoru pare

2-5 – Izobarno dovođenje topline u generatoru pare, ova faza je podjeljena na tri dijela:

- 2-3 – Zagrijavanje vode u generatoru pare, u točki 3 se pojavljuje prvi mjehurić pare
- 3-4 – Isparavanje vode u generatoru pare, u točki 4 isparava zadnja kapljica vode
- 4-5 – Pregrijavanje pare do zahtjevane temperature

5-6 – Adijabatska ekspanzija u parnoj turbini i proizvodnja mehaničkog rada

6-7 – Izobarno odvođenje topline u kondenzatoru

Za ovaj rad posebno je bitno što se događa u generatoru pare. Voda se s temperature, koja je približna temperaturi okoline, mora zagrijati do temperature na kojoj se pojavljuje prvi mjehurić pare. Ovaj proces zagrijavanja se obavlja udjelovima generatora pare koji se nazivaju zagrijač vode (eng. economizer) i isparivač (engl. evaporator). Daljnim dovođenjem topline u isparivaču, sve više vode prelazi iz kapljevito u parovito stanje, zadnja kapljica vode prelazi u parovito stanje u točki 4, čime završava proces prijelaza vode iz kapljevito u parovito stanje. Važno je istaknuti da se ovaj proces događa pri konstantnoj temperaturi. Para se potom zagrijava do njezinog konačnog pregrijanog stanja u pregrijaču (eng. superheater).

Jedinična toplina( $q$ ) potrebna za zagrijavanje, isparavanje i pregrijavanje vode se određuje preko specifičnih entalpija ( $h$ ), koje proizlaze iz toplinskih tablica. Prema tome jedinična toplina potrebna za zagrijavanje, isparavanje i pregrijavanje vode se određuje se prema sljedećem izrazima:

- Jedinična toplina potrebna za zagrijavanje vode

$$q_{\text{zag}} = h_3 - h_2 \text{ [kJ]} \quad (1)$$

- Jedinična toplina potrebna za isparavanje vode

$$q_{\text{isp}} = h_4 - h_3 \text{ [kJ]} \quad (2)$$

- Jedinična toplina potrebna za pregrijavanje pare

$$q_{\text{pre}} = h_5 - h_4 \text{ [kJ]} \quad (3)$$

## 2.2. Prijelaz topline

Prijelaz topline je proces prelaska topline s tijela koje je toplije na tijelo koje je hladnije. Što je veća razlika temperatura između ta dva tijela, proces prelaska temperature će se brže odvijati. Postoje tri načina prelaska topline:

- Konvekcijom (komešanjem)
- Kondukcijom (provođenjem topline)
- Radijacijom (zračenjem)

### 2.2.1. Konvekcija (komešanje)

Konvekcija ili komešanje je prijelaz topline kod kojega fluid zagrijava okolne tvari ili okolne tvari zagrijavaju fluid. Ovaj prijelaz topline može biti prirodan ili prisilan. Prirodna konvekcija se događa kada fluid primi neku količinu topline, što uzrokuje povećanje temperature fluida i smanjenje njegove gustoće. Topliji fluid se zbog smanjenje gustoće počinje uslijed djelovanja sile uzgona uzdizati i pri tome predavati toplinu molekulama hladnijeg fluida ili krute stijenske koji ga okružuju. Prisilna konvekcija je konvekcija koja je uzrokovana djelovanjem neke

vanjske sile na fluid, koja uzrokuje strujanje fluida i predaju ili primanje topline s fluida ili tijela. Vanjske sile koje djeluju na fluid mogu biti inducirane preko ventilatora, pumpi, itd.

U generatorima pare na ispušne plinove konvekcija se događa prilikom predaje topline s ispušnih plinova na stijenke cijevi, te prilikom prijelaza topline sa stijenki cijevi na vodu ili vodenu paru.

### **2.2.2. Kondukcija (provođenje topline)**

Kondukcija ili provođenje topline je proces predaje topline izravnim dodirrom tijela s izvorom topline, dok se ostali dijelovi tijela dalje redom zagrijavaju. Daljnje zagrijavanje tijela je prouzročeno sudaranjem mikročestica tijela te gibanjem elektrona. Metali najbolje provode toplinu jer oni imaju najveći broj slobodnih elektrona koji se počinju gibati, i na taj način povećavaju unutarnju energiju tijela (temperaturu). Kod tvari u čvrstom agregatnom stanju kondukcija je jedini način vođenja topline.

Kondukcija se kod generatora pare događa prilikom vođenja topline kroz stijenku cijevi. Ta toplina je primljena od ispušnih plinova iz toplinskih strojeva i u konačnici se predaje vodi ili vodenoj pari.

### **2.2.3. Radijacija (zračenje)**

Radijacija ili zračenje topline je elektromagnetsko zračenje koje emitiraju sve tvari koje imaju temperaturu veću od 0 K (temperatura na kojoj nema nikakvog gibanja čestica). Do toplinskog zračenja dolazi kada se toplina, generirana gibanjem nabijenih čestica unutar atoma, pretvara u elektromagnetsko zračenje [6].

#### 2.2.4. Koeficijent prolaska topline

Koeficijent prolaska topline je termodinamička veličina koja nam govori koju količinu topline gubi tvar u 1 sekundi po jedinici površine, kada je razlika temperature 1 K. Koeficijent prolaska topline se označava sa slovom  $k$ , dok mu je mjerna jedinica  $W/m^2K$ . Koeficijent prolaska topline izolacije generatora pare na ispušne plinove bi trebao biti što manji dok bi koeficijent prolaska topline s ispušnih plinova na vodu ili paru trebao biti što veći, kako bi toplinska iskoristivost generatora pare na ispušne plinove bila što veća. Na slici 3. prikazan je proces prolaska topline s ispušnih plinova na vodu, te koeficijenti prolaska topline koji utječu na taj proces.

Količina topline koja se predaje vodi iz ispušnih plinova, preko stijenke cijevi se dobiva prema sljedećem izrazu:

$$\phi = k \cdot A \cdot (t_2 - t_1) \text{ [W]} \quad (4)$$

gdje je:

$\phi$  – toplinski tok između dimnih plinova i vode ili vodene pare

$A$  – prolazna površina

$t_2$  – temperatura dimnih plinova

$t_1$  – temperatura vode ili vodene pare

$k$  – koeficijent prolaska topline koji se dobiva po sljedećoj formuli:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} \text{ [W/m}^2\text{K]} \quad (5)$$

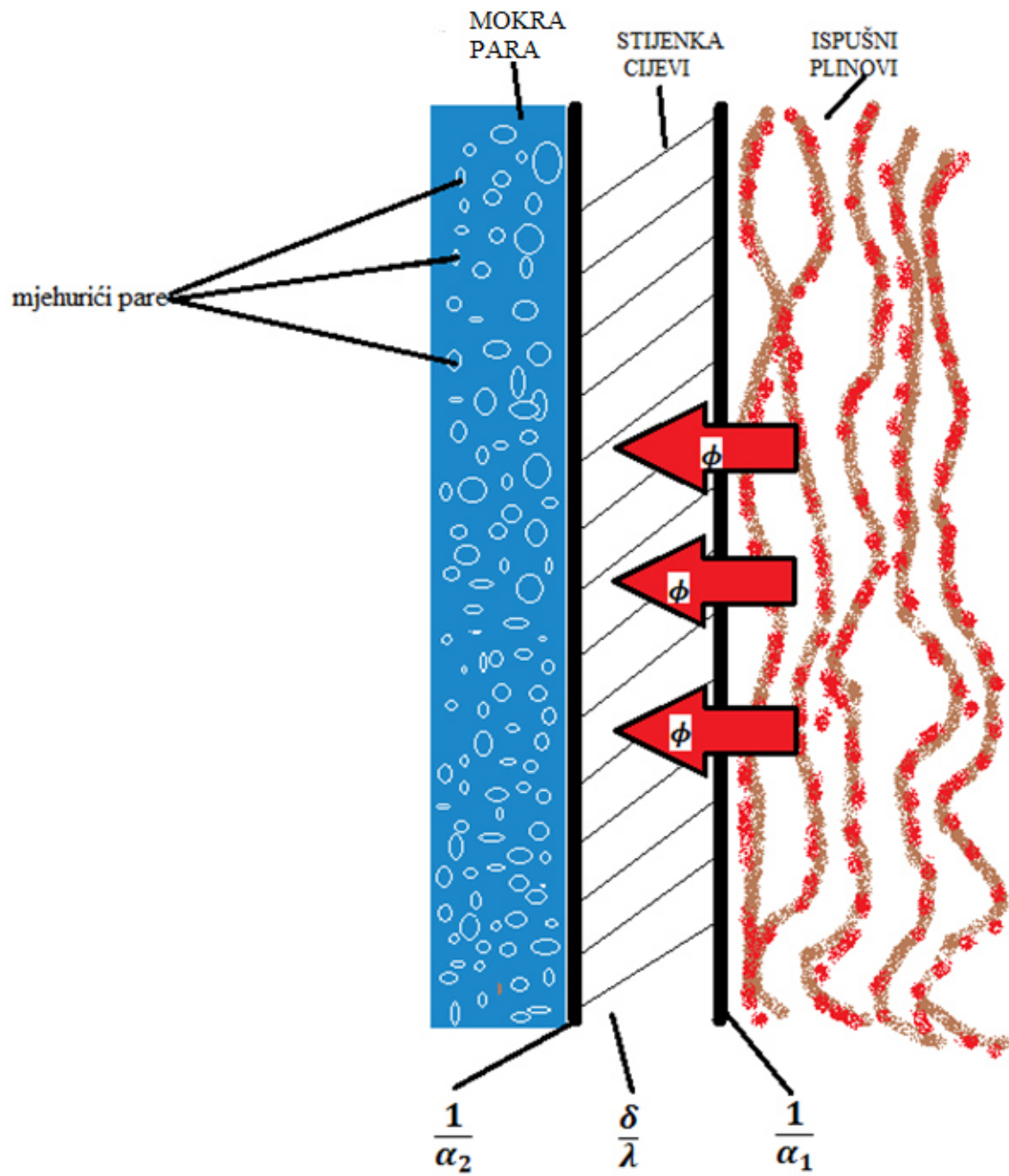
gdje je:

$\alpha_1$  - koeficijent konvektivnog prolaska topline s ispušnih plinova na stijenku cijevi

$\alpha_2$  - koeficijent konvektivnog prolaska topline sa stijenke cijevi na vodu ili paru

$\delta$  - debljina stijenke cijevi

$\lambda$  – koeficijent toplinske vodljivosti kroz stijenku cijevi



Slika 3. Prijelaz topline s ispušnih plinova, preko stijenke cijevi na vodu

### 3. Sastavni dijelovi generatora pare na ispušne plinove

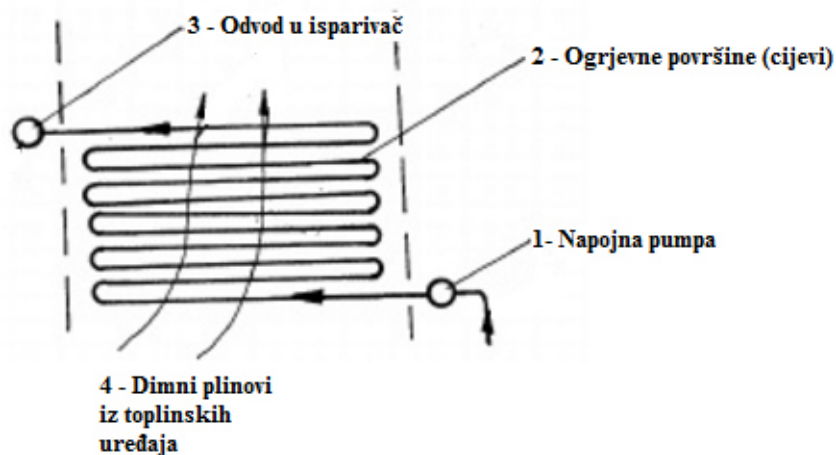
Glavni dijelovi generatora pare na ispušne plinove su:

- Zagrijač vode(eng. economizer)
- Isparivač(eng. evaporator)
- Pregrijač(eng. superheater)
- Klapne za regulaciju
- Nosiva konstrukcija i izolacija

#### 3.1.Zagrijač vode

Zagrijač vode je naknadna ogrjevna površina koja osigurava da voda, dobavljena preko napojne pumpe, ulazi u isparivačke cijevi dovoljno zagrijana da u potpunosti ispari u isparivačkim cijevima. Istodobno se time povećava cjelokupna iskoristivost generatora pare na ispušne plinove, tj. veća količina topline prelazi s ispušnih plinova na vodu. Ispušni plinovi koji su prethodno predali jedan dio topline pari i vodi u pregrijaču i isparivaču, što je prikazano slikom 6.,dalje se koriste da bi zagrijali vodu do temperature pogodne za daljnje dovođenje topline. Voda se obično grije do temperature koja je 20 – 50 °C niža od temperature isparavanja [7] za određeni tlak pri kojem radi generator pare.

Strujanjem ispušnih plinova oko ogrjevnih površina zagrijača vode (slika 4.) predaje se toplina vodi koja struji unutar cijevi. Ogrjevne površine zagrijača vode su cijevi koje su najčešće oreberenena strani ispušnih plinova čime se povećava ogrjevna površina cijevi. Cijevi su orebrenena strani ispušnih plinova zbog toga što ispušni plinovi imaju manji koeficijent prijelaza topline od vode, te se na taj način iskorištava veća količina topline iz ispušnih plinova. Važno je naglasiti da svi generatori pare na ispušne plinove nisu opremljeni zagrijačem vode.



Slika 4. Nastrujavanje dimnih plinova na zagrijač vode [8, str. 78.]

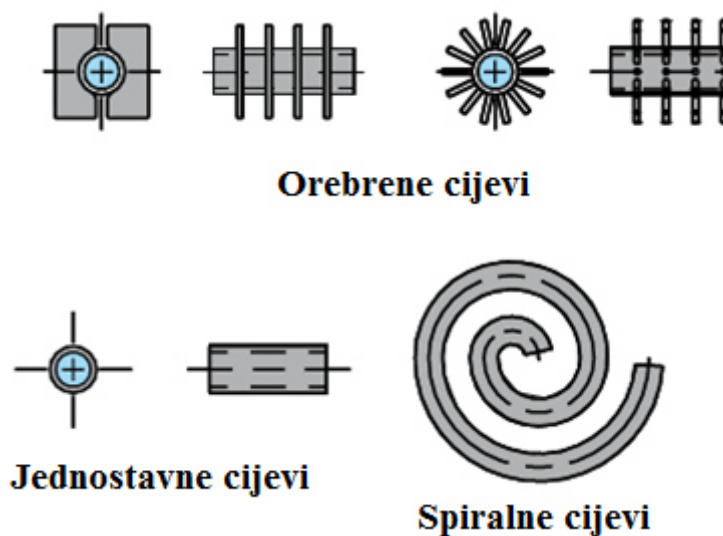
### 3.2. Isparivač

Isparivač je dio generatora pare gdje voda iz kapljevitog prelazi u parovito agregatno stanje, tj. gdje se odvija proces isparavanja. Voda dolazi u isparivač iz zagrijača vode ili kod nekih izvedbi iz loženog generatora pare pomoću pumpe. Kao i kod zagrijača vode ogrjevne površine isparivača su cijevi koje su najčešće bešavne i izrađene od materijala garantirane kvalitete i odgovarajućih mehaničkih svojstava [9]. Isparivačke cijevi imaju najveću površinu od svih ogrjevnih površina unutar generatora pare, iz razloga što se za isparavanje vode troši najviše energije. Cijevi su izrađene od legiranih čelika, a povezane su najčešće zavarivanjem, dok je još moguć spoj uvaljivanjem. Kod spoja sa uvaljivanjem slobodni se kraj raširi pod kutem od  $30^\circ$ , te se kod rada generatora pare dodatno raširi zbog povišenih radnih temperatura što uzrokuje da se spoj još čvršće uglati u pripadajući provrt. Cijevi isparivača su kružnog presjeka.

### 3.3. Pregrijač

Pregrijač je dio generatora pare koji služi za zagrijavanje pare do konačnog radnog stanja (konačne temperature pri konstantnom tlaku). Pregrijač je smješten najbliže izvoru topline, kako je i prikazano na slici 6., tj. izlazu ispušnih plinova iz turbopuhala dizelskog motora ili iz plinske turbine, kako bi ispušni plinovi sa što većom temperaturom nastrujavali na ogrjevne površine pregrijača. Ogrjevne površine su kao i kod prije spomenutih dijelova generatora pare (zagrijača vode i isparivača) cijevi. Te cijevi su u većini slučajeva orebrene, kako bi se povećala njihova ogrjevna površina. Cijevi kod pregrijača kao i kod ostalih ogrjevnih

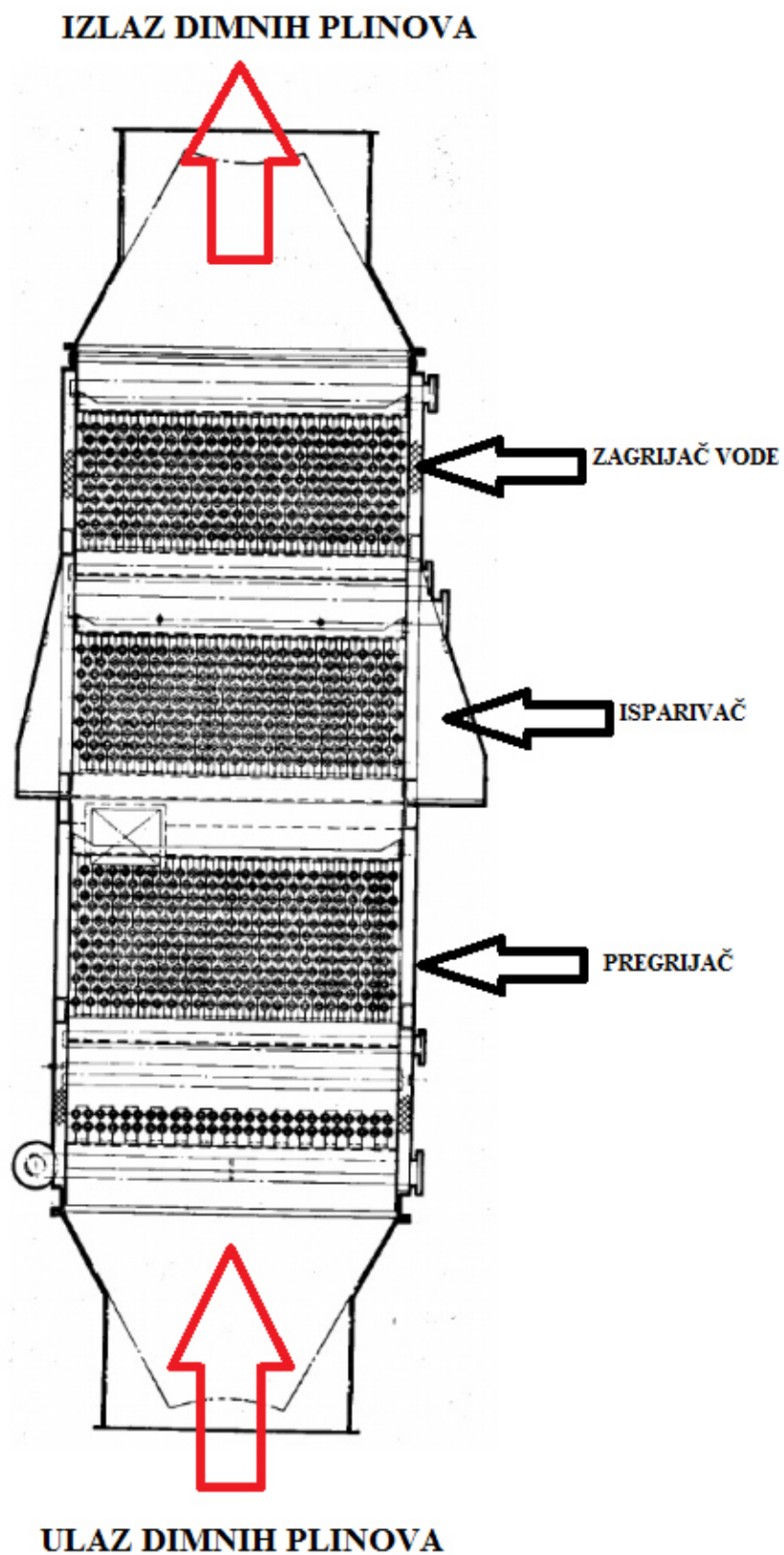
površina u generatoru pare na ispušne plinove (zagrijača vode i isparivača) mogu biti: orebrene cijevi, obične cijevi i obične cijevi umotane u spiralu (spiralne cijevi), ovisno o izvedbi i količini pare koju generator pare treba proizvesti. Na slici 5. prikazane su različite vrste cijevi. Cijevi pregrijača pare su također izrađene od visokokvalitetnih čelika. Pregrijačke cijevi su najbliže smještene izvoru topline, te su upravo zbog toga najosjetljivije na izostanak strujanja fluida (pare) kroz njih same. Zbog velikih temperatura ispušnih plinova koji izlaze iz toplinskih uređaja dolazi do opasnosti od pregrijavanja i oštećenja pregrijačkih cijevi, u slučaju da iz bilo kojeg razloga dođe do prestanka strujanja pare kroz njih.



Slika 5. Različite vrste cijevi [15, str. 8.]

Uporabom zasebnog pregrijača pare smještenog najbliže izvoru topline, dolazi do povećanja iskoristivosti cjelokupnog parnog postrojenja, te smanjenja gubitaka zbog kondenzacije u cijevovodu. Kod generatora pare na ispušne plinove većih kapaciteta, gdje generator proizvodi dovoljnu količinu pare za pogon turbina za proizvodnju električne energije, pregrijač ima ulogu i smanjenja gubitaka trenja pri strujanju kroz cijevovode, a posebno kroz turbine, te smanjenja problema erozije u turbinama, koji nastaje zbog pothlađenih kapljica vode u pari [10]. Pregrijači obično pregrijavaju paru od 30 – 50 °C iznad temperature isparavanja za određeni radni tlak. Generatori pare na ispušne plinove pregrijavaju paru do temperature od 300 °C, pri tlakovima od 5 – 20 bar.

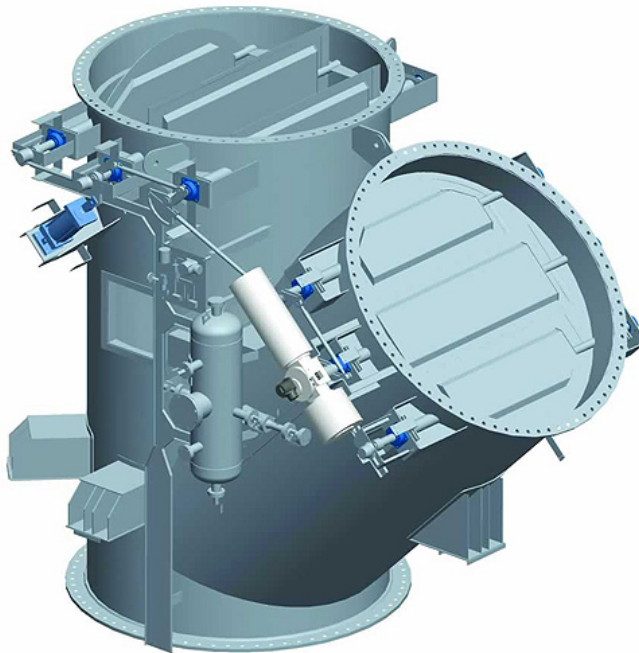




Slika 6. Presjek generatora pare na ispušne plinove [7, str. 211.]

### 3.4. Klapne za regulaciju

Klapne za regulaciju služe za usmjeravanje protoka ispušnih plinova kroz generator pare na ispušne plinove ili mimo njega direktno u atmosferu. Slika 7. prikazuje klapne, upravljane preko zračnoga aktuatora koje usmjeravaju tok ispušnih plinova kroz generator pare ili mimo njega. Klapne za regulaciju su kontrolirane od strane kontrolne jedinice klapni koja u zavisnosti o mnogim parametrima (trenutnoj potrošnji pare, opterećenju motora, tlaku u generatoru pare, itd.), odlučuje kolika će količina ispušnih plinova iz toplinskih strojeva prolaziti kroz generator pare, a kolika mimo njega. Klapnama generatora pare seupravlja preko elektromotoraili zračnoga aktuatora.



Slika 7. Klapne generatora pare na ispušne plinove [11]

### 3.5. Nosiva konstrukcija i izolacija

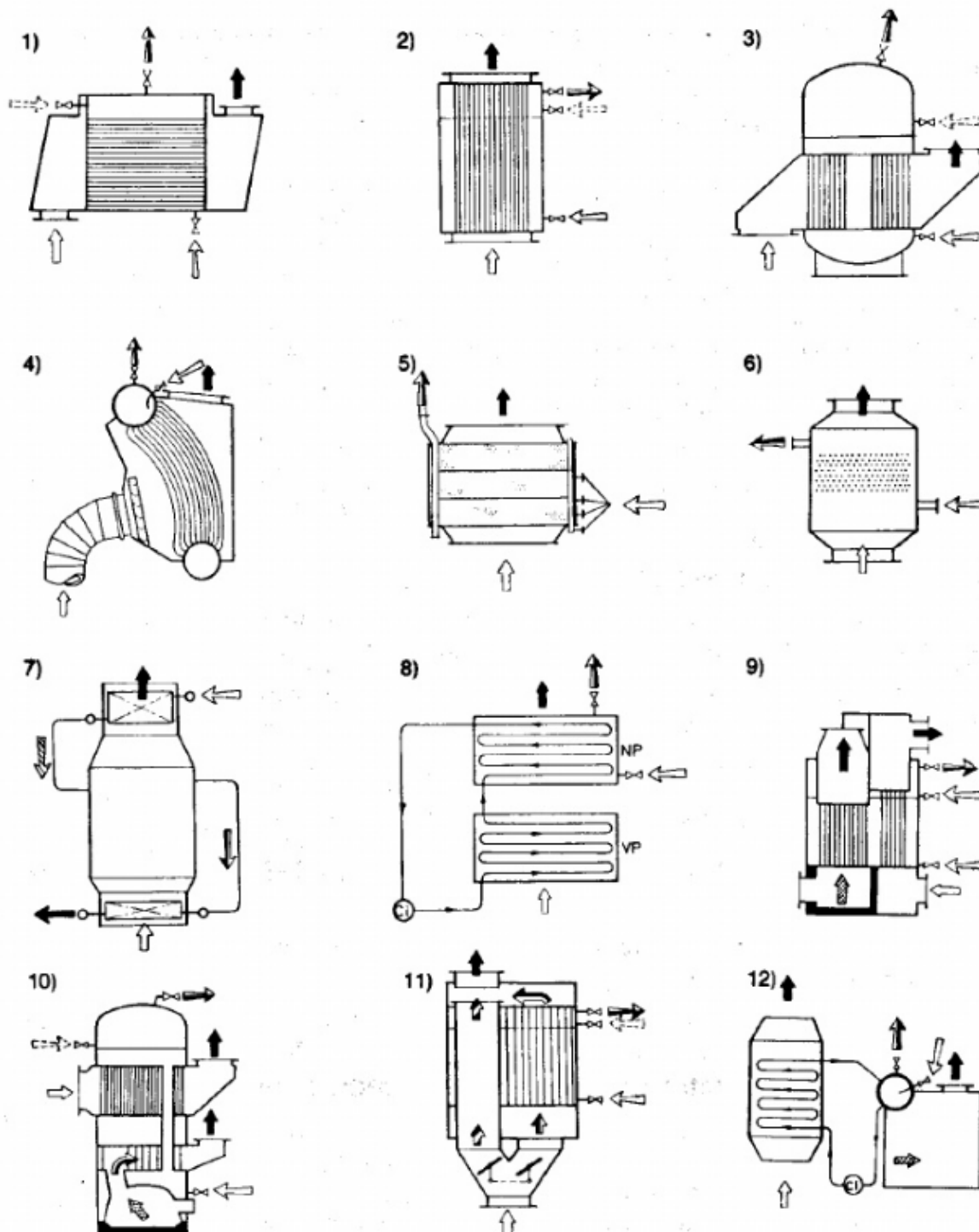
Nosiva konstrukcija je dio generatora pare na ispušne plinove u kojeme su smješteni svi ostali njegovi djelovi, obično se izrađuje od čelika. Čelik od kojeg se izrađuje nosiva konstrukcija generatora pare mora imati dosta visoku granicu razvlačenja, dovoljnu plastičnu deformabilost, veliku čvrstoću, žilavost i dinamičku izdržljivost [12]. Taj čelik mora zadovoljavati sve navedene uvjete pri visokim radnim temperaturama.

Izolacija, koja oplakuje nosivu konstrukciju sa svih strana, služi za smanjivanje zračenja topline iz generatora pare u okolinu, te sprječavanje izlaska dimnih plinova unutar prostora strojarnice. Izolacija generatora pare mora imati veoma nizak koeficijent prijelaza topline kako bi se što manja količina topline emitirala u okolinu. Izolaciju generatora pare na ispušne plinove s unutarnje strane čini mineralna vuna dok je generator pare s vanjske strane u potpunosti prekriven limenom oplatom [13].

## 4. Izvedbe generatora pare na ispušne plinove

Generatori pare na ispušne plinove se dijele prema [14]:

- a) Mediju koji struji kroz cijevi na:
  - Dimnocijevne
  - Vodocijevne
- b) Prema smještaju cijevi generatore pare na ispušne plinove dijelimo na:
  - Generatore pare s vertikalno smještenim cijevima
  - Generatore pare s horizontalno smještenim cijevima
  - Generatore pare s koso smještenim cijevima
- c) Prema načinu cirkulacije vode na:
  - Generatore pare s prisilnom optočnom cirkulacijom
  - Generatore pare s prisilnom protočnom cirkulacijom
  - Generatore pare s prirodnom cirkulacijom
- d) Generatori pare na ispušne plinove bez mogućnosti dodatnog loženja i s dodatnim loženjem (kompozitni generatori pare)
- e) Generatori pare na ispušne plinove koji rade u spoju sa loženim kotlom i generatore pare koji rade samostalno



Slika 8. Različite izvedbe generatora pare na ispušne plinove [14, str. 207.]

#### 4.1. Dimnocijevni generatori pare na ispušne plinove

Dimnocijevni generatori pare na ispušne plinove su generatori pare kod kojih kroz ogrjevne površine (cijevi), debljine od 30 – 100 mm [15], struje dimni plinovi iz toplinskih strojeva, dok te iste cijevi okružuje voda kojoj se predaje toplina iz ispušnih plinova. Ovakvi generatori pare na ispušne plinove se izrađuju kao isparivači bez mogućnosti zagrijavanja vode i pregrijavanja, za tlakove do 10 bara. Na slici 8. pod brojem 1) je prikazan dimnocijevni generator pare na ispušne plinove s vertikalno smještenim cijevima, dok je na istoj slici pod brojem 2), te na slici 9. prikazan dimnocijevni generator pare na ispušne plinove s horizontalnim cijevima. Ispušnim plinovima koji nastrujavaju na cijevi generatora pare se povećava brzina, pa ispušni plinovi struje kroz dimnocijevni generator pare povećanom brzinom, koja je od 30 do 35 m/s [16]. Povećana brzina ispušnih plinova koji struje kroz ovakav generator pare, rezultira boljim prijelazom topline s ispušnih plinova na vodu, te smanjenjem stvaranja naslaga čađe na cijevima. Para koja je proizvedena u ovakvim generatorima pare se skuplja na njihovom vrhu, te s toga mjesta odlazi dalje u potrošnju.

Osim za proizvodnju pare dimnocijevni generatori pare na ispušne plinove imaju dosta važnu ulogu u ispušnom sustavu dizelskih motora. Ispušnim plinovima koji prolaze kroz ovakav generator pare se povećava brzina, zbog čega dolazi do snižavanja tlaka ispušnih plinova koji izlaze u atmosferu, što rezultira prigušenjem zvuka, pa ovi generatori pare služe i kao prigušivači zvuka. Još jedna njihova funkcija je uloga iskrohvatača u ispušnom sustavu. Regulacija ovakvih generatora pare se obavlja na dva načina. Prvi način je otvaranjem klapni koje omogućuju da određena količina ispušnih plinova struji kroz generator pare ili mimo njega direktno u atmosferu. Drugi način je regulacija razine vode u generatoru pare, tj. regulacija visine uronjenosti dimnih cijevi unutar vode. Prednosti dimnocijevnih generatora pare su dosta jednostavna konstrukcija jer nemaju ugrađene zagrijače vode niti pregrijače pare, mogućnost obavljanja više funkcija kao što su gore opisane funkcije prigušivača i iskrohvatača, čime se njihovom ugradnjom smanjuju troškovi nabave postrojenja. Nedostatak ovakvih generatora pare je relativno velika masa, koja rezultira velikim dimenzijama, te njegov oblik, što ga čini dosta neprikladnim za ugradnju u dimnjak broda. Ovakvi generatori pare se većinom postavljaju na brodove na kojima se zahtjeva da generatori pare na ispušne plinove rade neovisno o loženom generatoru pare. Ovo je moguće jer dimnocijevni generatori pare mogu biti opremljeni sa svojim zasebnim parnim bubnjem.



Slika 9. Dimnocijevni generator pare na ispušne plinove s vertikalnim cijevima [17]

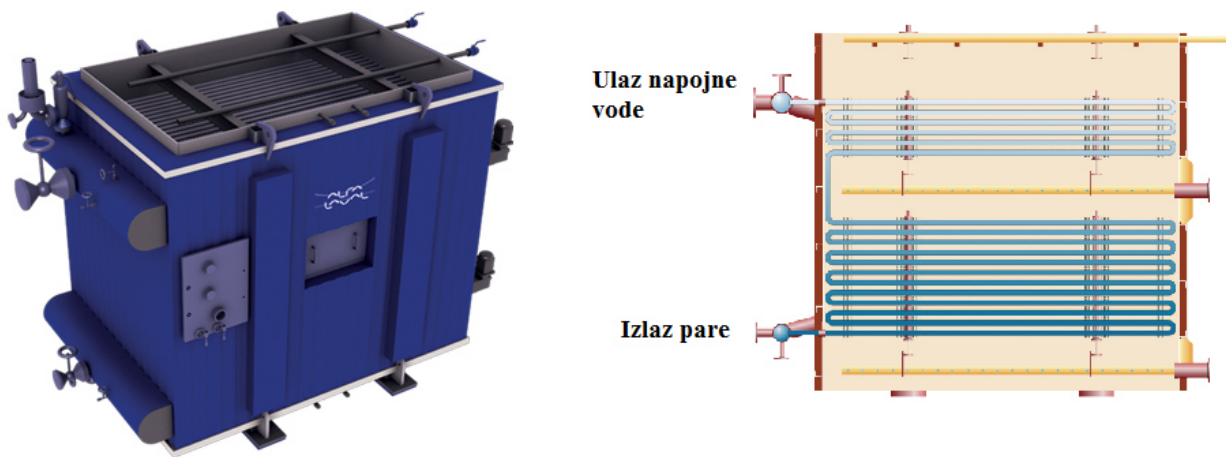
#### 4.2. Vodocijevni generatori pare na ispušne plinove

Vodocijevni genratori pare na ispušne plinove su generatori pare kod kojih unutar cijevi cirkulira voda, koja može cirkulirati prirodno ili prisilno (pomoću pumpe), dok oko cijevi struje ispušni plinovi iz toplinskih strojeva i predaju toplinu vodi unutar cijevi. Vodocijevni generatori pare mogu biti napravljeni s vertikalno smještenim cijevima (slika 8. - 3)), koso smještenim cijevima (slika 8. - 4)) i horizontalno smještenim cijevima (slika 8. - 5), 6), 7)), koji je najčešći način smještanja cijevi u generatorima pare na ispušne plinove. Vodocijevni generatori pare su najupotrebljiviji generatori pare na ispušne plinove, zbog velike količine topline koju mogu primiti od ispušnih plinova po jedinici površine. Primanje velike količine topline od ispušnih plinova i njen prijenos na vodu, ovom generatoru pare omogućuju cijevi koje su orebrene. Vodocijevni generatori pare su upravo zbog tog razloga manjih dimenzija od dimnocijevnih generatora pare. Vodocijevni generatori pare rade na nešto većim tlakovima od dimnocijevnih, čak do 20 bara [18] u nekim izvedbama. Kod vodocijevnih generatora pare s vertikalnim cijevima, po simetrali su smještene cijevi nešto većeg promjera koje služe kao

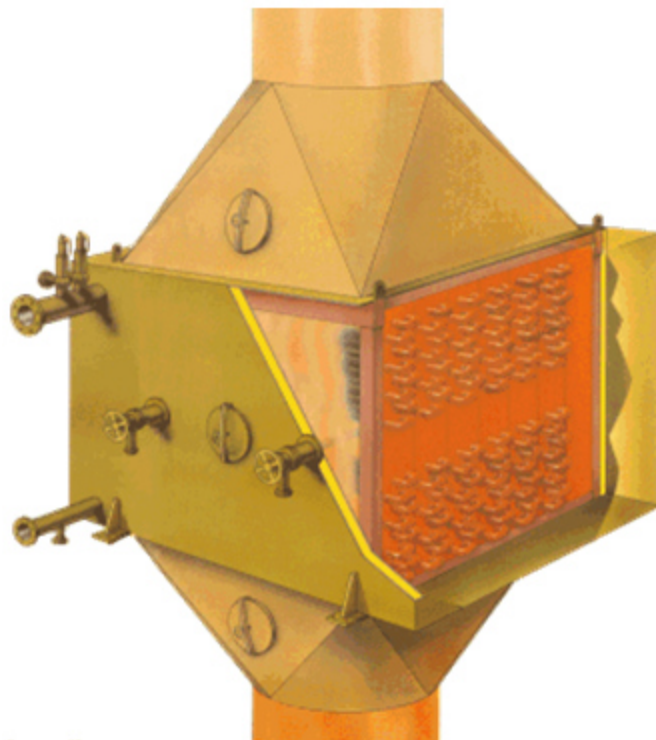
silazne cijevi. Silazne cijevi imaju funkciju da hladnija voda iz gornjeg dijela generatora pare dolazi njegov donji dio, koji je izložen ispušnim plinovima najveće temperature, i na taj način se osigurava da donji dijelovi generatora pare ne ostanu bez vode u kapljevitom stanju, koja hladi cijevi i sprječava izgaranje istih. Vodocijevni generatori pare koji imaju koso smještene cijevi su predviđeni za nešto veće radne tlakove (do 20 bara [19]), te je kod njih cirkulacija vode prirodna, a ugrađuju se u dimnjak. Strujanje vode unutar cijevi kod ostalih tipova vodocijevnih generatora pare je prisilno, a može biti protočno ili optočno. Vodocijevni generator pare na ispušne plinove s prisilnom optočnom cirkulacijom, prikazan na slici 8. 5), ima prednost malih dimenzija i mase, što ih čini veoma povoljnim za ugradnju na brodove. Male dimenzije je moguće postići zbog prisilne cirkulacije, koja im još omogućuje da prilagode oblik raspoloživom prostoru na brodu. Mogu imati ugrađen svoj vlastiti parni bubanj, ali je to rijetko pa se obavezno upotrebljavaju u spoju s loženim generatorom pare. Protočni generatori pare (slika 8. 6)) napravljeni su kao cijevna zmijsa (slika 10.), što omogućuje povećanje ogrjevne površine i u konačnici prijelaz veće količine topline s ispušnih plinova na vodu. Kao i optočni vodocijevni generatori pare odlikuju se veoma malim ugradbenim dimenzijama te veoma malom masom.

Kod velikih tankera kod kojih je povećana potrošnja pare i kod kojih se zahtjeva da para bude pregrijana, ugrađuju se vodocijevni generatori pare povećanih dimenzija (slika 8. 7), slika 11., te slika 12.). Takvi vodocijevni generatori pare osim isparivačkih cijevi, imaju ugrađene i dodatne ogrjevne površine kao što su zagrijači vode i pregrijači. Obično rade u spoju s loženim generatorom pare jer nemaju vlastitog parnog bubnja.

Kod vodocijevnih generatora pare na ispušne plinove brzina strujanja ispušnih plinova je manja nego kod dimnocijevnih i iznosi do 20 m/s [20]. Zbog smanjene brzine strujanja ispušnih plinova dolazi do povećanog stvaranja naslaga čađe, pa ovakvi generatori pare imaju ugrađene posebne sapnice za ispuhivanje čađe.



Slika 10. Protočni vodocijevni generator pare na ispušne plinove tipa Aalborg XW [21]



Slika 11. Vodocijevni generator pare na ispušne plinove s iglastim cijevima [22]





Slika 12. Vodocijevni generatora pare na ispušne plinove tipa La Mont [23]

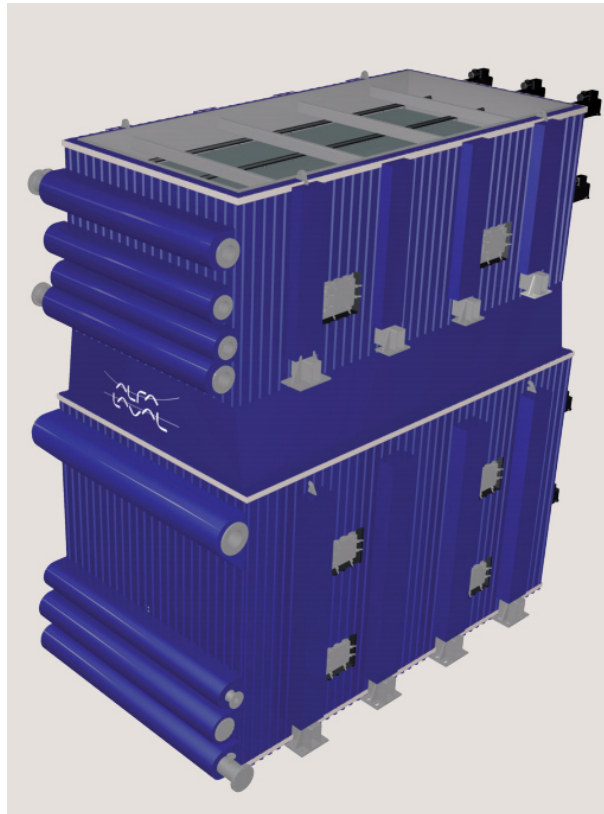
#### 4.3.Dvotlačni generator pare na ispušne plinove

Dvotlačni generator pare na ispušne plinove koji se još i naziva binarni generator pare, radi s dva cirkulacijska kruga vode (primarni i sekundarni), koji se nalaze na različitim tlakovima. Važno je napomenuti da je voda u primarnom krugu na višem tlaku nego voda koja isparava u sekundarnom krugu. Shema dvotlačnog generatora pare prikazana je na slici 8. 8), dok je njegov

izgled prikazan na slici 13.

Binarni generator pare se sastoji od dva cijevnapaketa primarnog kruga, te posude u koju je uronjen drugi cijevni paket primarnog kruga i u kojoj se nalazi voda na nižem tlaku. Prvi cijevnipaket je smješten bliže izlazu ispušnih plinova iz toplinskih uređaja, i kroz njega struji kondenzat koji unutar njega isparava. Proizvedena para, odlazi u drugi cijevni paket

primarnog kruga, koji je uronjen u posudu u kojoj se nalazi voda sekundarnog kruga. Voda sekundarnog kruga se zagrijava sa ispušnim plinovima koji izlaze iz primarnog kruga, te sa proizvedenom parom iz primarnog kruga. Para proizvedena iz vode sekundarnog kruga odlazi dalje u potrošnju, dok se para iz primarnog kruga kondenzira.



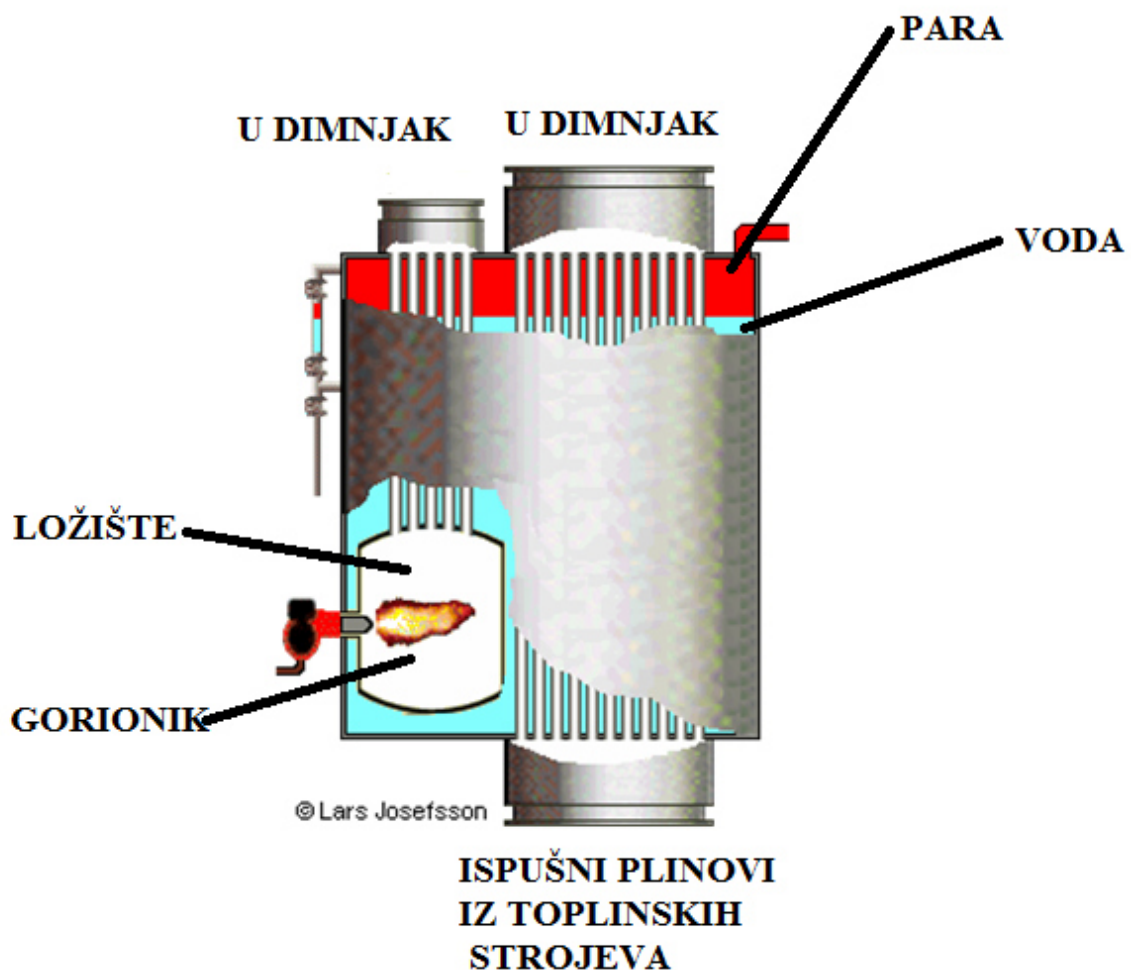
Slika 13. Dvotlačni generator pare na ispušne plinove [24]

Binarni generator pare je dosta manje osjetljiv na kvalitetu napojne vode, što je naročito važno za brodske generatore pare, koji obično rade s vodom niske kvalitete, odnosno s vodom u kojoj ima dosta otopljenih minerala. Održavanje binarnog generatora pare je također jednostavno zbog lakog pristupa cijevima, te se izvodi čišćenjem cijevi s vodne strane.

Ova vrsta generatora pare na ispušne plinove može biti projektirana da radi samostalno ili u spoju s loženim generatorom pare.

#### 4.4. Kompozitni generator pare

Kompozitni generatori pare koji se nazivaju i kombinirani generatori pare su generatori pare koji toplinu potrebnu za procese isparavanja, pregrijavanja i zagrijavanja vode mogu dobiti iz ispušnih plinova toplinskih strojeva ili je sami proizvoditi loženjem goriva. Većina današnjih kompozitnih generatora pare ima zasebne cijevi za ispušne plinove iz toplinskih strojeva, te zasebne cijevi za dimne plinove generirane u njegovom ložištu [25]. Postoji i inačica ovakvih generatora pareu kojoj se ispušni plinovi iz toplinskih strojeva miješaju s dimnim plinovima generiranim loženjem goriva, ali se ona rijede upotrebljava. Na slici 14. je prikazana danas najupotrebljivanija verzija kompozitnog generatora pare (dimnocijevi generator sa zasebnim cijevima). Kao i neke druge vrste generatora pare i ovaj tip generatora pare može biti projektiran kao dimnocijevni i kao vodocijevni (slika 8. 10)) generator pare.



Slika 14. Kompozitni generator pare [25]

Dimni plinovi nastali izgaranjem goriva u ložištu struje kroz cijevi koje su sa vanjske strane okružene vodom. Voda na sebe prima toplinu iz ispušnih plinova, te počinje isparavati. Para nastala iz te vode se skuplja pri vrhu ovog generatora pare, koji služi i kao parni bubanj, te iz toga dijela odlazi dalje u potrošnju. Za pravilno izgaranje goriva potrebno je nekoliko uvjeta koji moraju biti zadovoljeni u ložištu. Potrebno je dovesti dovoljnu količinu zraka, te gorivo mora biti raspršeno u sitne čestice što se obavlja pomoću pare ili komprimiranog zraka. Važno je napomenuti da omjer zraka i tekućeg goriva (dizela), mora biti oko 15:1, da bi se postiglo optimalno izgaranje goriva. Prilikom početka radakompozitnog generatora pare, s vlastitim izgaranjem goriva, temperatura potrebna za početak izgaranja goriva se postiže električnom iskrom.

Kod verzije kompozitnog generatora pare kod kojeg se miješaju ispušni plinovi i dimni plinovi nastali izgaranjem goriva, potrebno je napomenuti da oni nemaju zaseban dovod zraka, nego se izgaranje obavlja s ispušnim plinovima koji u sebi sadrže dovoljnu količinu kisika za održavanje procesa gorenja.

Tlak u kompozitnim generatorima pare se regulira paljenjem, gašenjem i modulacijom gorionika [26].

Osnovna prednost kompozitnih generatora pare je mogućnost rada u različitim uvjetima. Oni imaju mogućnost rada samo na ispušne plinove u uvjetima kada motor radi bez velikih promjena opterećenja na nominalnom broju okretaja, npr. u plovidbi broda otvorenim morem, mogućnost rada na dimne plinove proizvedene loženjem u vlastitome ložištu u uvjetima kad je glavni motor ugašen, a i dalje postoji potreba za proizvodnjom pare, npr. za vrijeme stajanja broda u luci, te u uvjetima povećanje potrošnje pare gdje generator proizvodi paru s toplinom dobivenom istovremeno od ispušnih plinova i dimnih plinova iz vlastitoga ložišta. Ušteda prostora, koja je moguća zbog objedinjavanja dva uređaja (loženi generator pare i generator pare na ispušne plinove) u jedan je još jedan razlog uporabe ovakvih generatora pare. Nedostatak kompozitnih generatora pare su velike toplinske diletacije metala u različitim dijelovima generatora pare, kada rade u odvojenom radu (samo na ispušne plinove ili samo na dimne plinove nastale loženjem).

## **5. Spoj generatora pare na ispušne plinove s loženim generatorom pare**

Generator pare na ispušne plinove spaja se [27]:

- s pomoćnim loženim generatorom pare
- s dva pomoćna ložena generatora pare

### **5.1.Spoj s pomoćnim loženim generatorom pare**

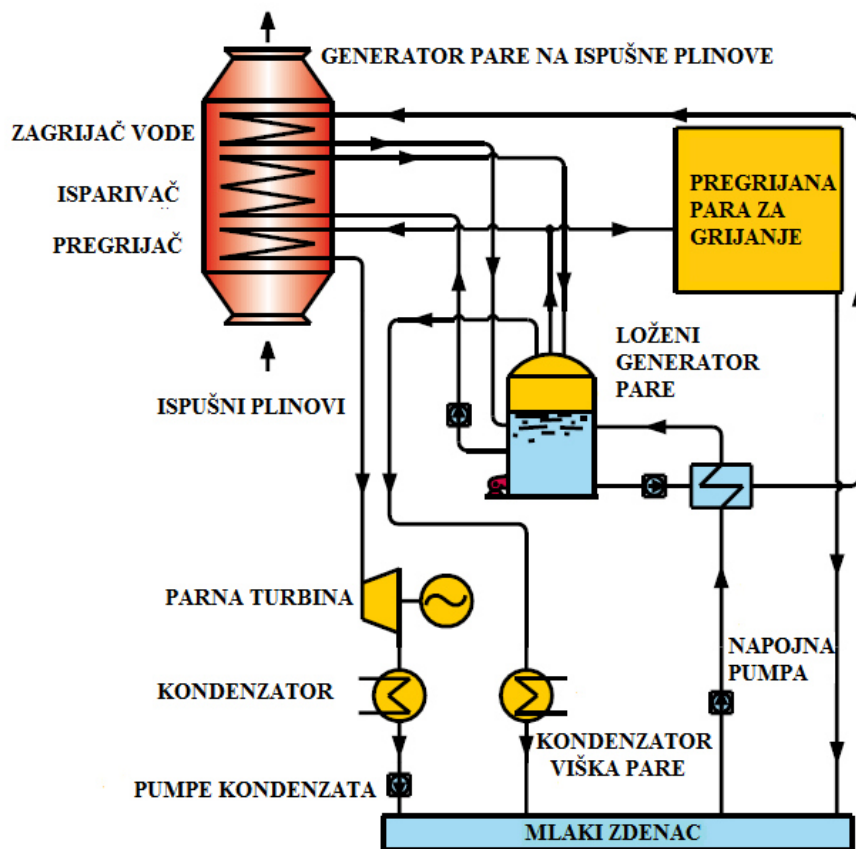
Velika većina današnjih generatora pare na ispušne plinove radi u spoju s loženim generatorom pare, razlog za to leži u činjenici da generatori pare na ispušne plinove nemaju vlastiti parni bubanj, koji omogućuje separiranje pare. Prednost ovakvoga spoja je mogućnost proizvodnje pare samo s generatorom pare na ispušne plinove, samo loženim generatorom pare, te mogućnost proizvodnje pare zajednički u uvjetima kad postoji potreba za povećanom proizvodnjom pare. Druga prednost je uporaba jednog zajedničkog parnog bubnja, što omogućuje uštedu prostora, što je veoma bitno kad se radi o brodskim uvjetima, te s ekonomskog gledišta smanjuje cijenu postrojenja.

Na slici 15. prikazan je spoj s pomoćnim loženim generatorom pare.

Prikazani generator pare na ispušne plinove je opremljen dodatnim ogjevnim površinama koje su zagrijač vode i pregrijač.

Pothlađena voda se prisilno, pomoću napojne pumpe dobavlja iz mlakog zdenca, u loženi generator pare. Iz njega se cirkulacijskom pumpom, još uvijek pothlađena voda tlači u zagrijač vode koji se nalazi unutar generatora pare na ispušne plinove, gdje joj se podiže temperatura do temperature od 20 - 50 °C niže od potrebne temperature za isparavanje. Tako zagrijana voda cirkulira natrag u loženi generator pare. Iz njega zagrijana voda, koja se nalazi u njegovim gornjim dijelovima (zbog manje gustoće od hladnije vode, koja se nalazi u donjim dijelovima te zbog uzgona), tlači se u isparivačke cijevi generatora pare na ispušne plinove gdje voda isparava i kao para se vraća natrag u parni bubanj loženog generatora pare. Iz parnog bubnja para odlazi u potrošnju. Jednim dijelom se upotrebljava za uravnoteženje toplinskog opterećenja koje nastaje uslijed potrebe za grijanjem različitih tvari koje se

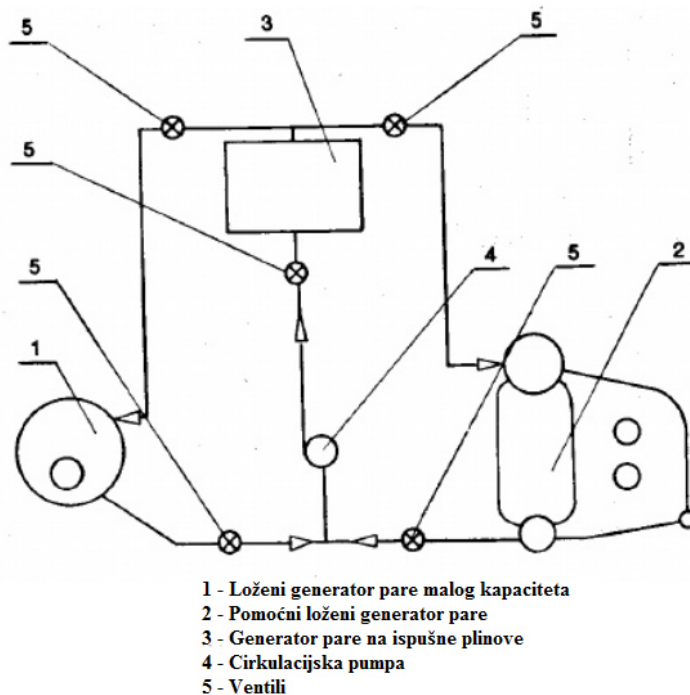
prevoze na brodu kao teret ili se upotrebljavaju u bilo koju drugu svrhu. Drugi dio pare se odvodi u pregrijač koji se nalazi u generatoru pare na ispušne plinove, gdje se para pregrijava do konačnog radnog stanja, potrebnog za pogon parnih turbina. Para iz turbine odlazi u kondenzator gdje se ta para ponovno ukapljuje i pomoću pumpi kondenzata odvodi natrag u mlaki zdenac. Svakako kada su uvjeti takvi da radi samo loženi generator pare, voda cirkulira samo u njega, te se u njemu zagrijava, isparava, te pregrijava i na koncu skuplja u parnom bubnju iz kojeg odlazi u potrošnju.



Slika 15. Spoj generatora pare na ispušne plinove s loženim generatorom pare [20, str. 10.]

## 5.2.Spoj s dva pomoćna ložena generatora pare

Generator pare na ispušne plinove se u spoju s dva pomoćna ložena generatora pare upotrebljava kada kapacitet generatora pare na ispušne plinove nije dovoljan za proizvodnju dovoljne količine pare za pokrivanje svih brodskih potreba za parom. Često je razlika između količine proizvodnje pare i potrebnog kapaciteta veoma mala, pa se za pokrivanje te razlike koristi loženi generator pare koji je malog kapaciteta. Njegovim korištenjem se eliminira potreba za radom većeg pomoćnog loženog generatora pare s malim opterećenjem, čime se povećava njegov vijek trajanja.Spoj je napravljen s jednom zajedničkom cirkulacijskom pumpom, te se upravljanjem ugrađenim ventilima omogućuje samostalni rad svakog pojedinog generatora pare, te njihov zajednički rad u uvjetima povećane potrošnje pare. Slika 16. prikazuje shemu jednoga takvoga spoja.



slika 16. Spoj generatora pare na ispušne plinove s dva pomoćna ložena generatora pare[27, str. 216.]

## 6. Upravljanje generatorom pare na ispušne plinove

Kada govorimo o upravljanju generatorima pare na ispušne plinove, ono je veoma jednostavno i sastoji se od otvaranja i zatvaranja klapni koje usmjeravaju tok ispušnih plinova kroz generator pare ili mimo njega direktno u atmosferu.

Otvaranje i zatvaranje klapni je regulirano od strane kontrolne jedinice klapni (engl. Damper control). Kontrolna jedinica klapni upravlja klapnama automatski, u zavisnosti o određenim parametrima (opterećenju, tlaku u generatoru pare, temperaturi ispušnih plinova, itd.). Jošje moguće upravljanje klapnama ručno. U automatskom režimu rada, postavlja se željeni tlak na kojem generator pare treba proizvoditi paru, automatika poslije regulira otvaranje i zatvaranje klapni. Kod ručnog upravljanja, korisnik sam određuje koliko će biti otvorene pojedine klapne, tj. u kojoj će količini strujati ispušni plinovi kroz generator pare ili mimo njega.

Prije nego što kontrolna jedinica klapni počne otvarati klapne, koje vode ispušne plinove u generator pare, mora se uspostaviti cirkulacija vode kroz zagrijač vode i isparivač, što se obavlja pumpama, te biti osiguran ulaz pare u pregrijač. Strujanje vode i pare je neophodno kako bi se sačuvale cijevi od izgaranja, iz čega zaključujemo da bi počeli koristiti generator pare na ispušne plinove, moramo najprije proizvesti paru uz pomoć loženog generatora pare. Još jedan neophodan uvjet za rad generatora pare na ispušne plinove su ispušni plinovi iz toplinskih strojeva.

Kada se uputi glavni motor i kada počnu strujati vrući ispušni plinovi iz turbopuhala, kontrolna jedinica klapni počinje polagano otvarati klapne, koje vode ispušne plinove kroz generator pare. Otvaranje klapni je polaganoda nebi došlo do toplinskih dilatacija, uslijed nejednake zagrijanosti različitih dijelova generatora pare. Kontrolna jedinica klapni drži klapne otvorene dovoljno da se održava konstantan (zadani) tlak, te da se proizvodi ona količina pare koja je u tom trenutku zadovoljava sve brodske potrebe. Ukoliko dođe do smanjenja opterećenja, klapne koje vode ispušne plinove u generator pare se u određenoj mjeri zatvaraju, dok one koje vode ispušne plinove mimo njega se u određenoj mjeri otvaraju, te se na taj način jedan dio ispušnih plinova odvodi direktno u atmosferu, što rezultira smanjenjem proizvodnje pare zbog smanjenog protoka pare kroz generator pare. Ako se zahtjeva veća proizvodnja pare situacija je onda obrnuta, klapne koje vode u generator pare se otvaraju, dok one koje vode mimo njega zatvaraju.



## **7. Održavanje generatora pare na ispušne plinove**

Taloženje čađe i kamenca predstavlja glavni problem u eksploataciji generatora pare na ispušne plinove. Prema tome otklanjanje njihovih naslaga glavni je preduvjet za siguran i dugotrajan rad generatora pare na ispušne plinove. U ovome poglavlju će biti objašnjene neke metode uklanjanja istih.

### **7.1.Naslage čađe i kamenca**

Čađa i kamenac spriječavaju normalan prijelaz topline s ispušnih plinova na vodu ili paru, tako da smanjuju koeficijent prijelaza topline. Naslage čađe također mogu onemogućiti ispravan rad klapni koje usmjeravaju tok ispušnih plinova. Još jedan problem koji nastaje zbog naslaga čađe je mogućnost nastanka požara. Naslage kamenca isto tako mogu povećati rizik od požara, jer zbog neravnomjernog taloženja dovode do stvaranja vrućih točki na mjestima gdje ima kamenca. Puknuće cijevi može isto biti posljedica taloženja kamenca, zbog smanjena promjera cijevi.

Čađa u brodskim uvjetima nastaje zbog korištenja teškog goriva, koje je veoma loše kvalitete i u sebi sadrži veliku količinu nečistoća, koje se poslije procesa izgaranja goriva u cilindrima motora, pretvaraju u čađu. Kamenac koji se nalazi u vodi generatora pare, nastaje jer se voda koja se koristi za proizvodnju pare na brodu dobiva iz morske vode, koja u sebi sadrži velike količine minerala. Velika temperatura unutar generatora pare ubrzava taloženje kamenca.

### **7.2.Pranje cijevi od čađe i tretiranje vode**

Ispuhivanje čađe u generatorima pare na ispušne plinove se obavlja s uređajima koji se zovu propuhivači čađe. Medij kojim propuhivači čiste generator pare može biti zrak ili para [28].

Propuhivači čađe se ugrađuju na prikladnim mjestima u blizini ogrjevnih površina, čime se osigurava da se najveći postotak čađe ispuše. Propuhivanjem se rješavamo nataložene čađe koja je suha, dok je za čišćenje mokre čađe potrebno isprati generator pare velikim količinama vode, te u ekstremnim situacijama potrebno je namazati kemijska otapala na površine koje se čiste od čađe. Isto tako dosta je važno redovito provjeravati ispravnost samih propuhivača čađe, kako bi se osigurala njihova efikasnost prilikom propuhivanja generatora pare.

Ispiranje se obavlja u prosjeku jedanput mjesečno ili svakih 500 sati [29]. Ispiranje generatora parena ispušne plinove koji nemaju ugrađene klapne za reguliranje protoka, trebalo bi se obavljati kada je glavni motor u stanju mirovanja, kako bi se spriječila kontaminacija turbopuhala, te ostalih dijelova u ispušnog sistema glavnog motora. Ispiranje bi se također trebalo obavljati dok su cijevi generatora pare još vruće, kako bi se lakše otklonile naslage čađe jer u tim uvjetima čađa puca [30]. Generatori pare na ispušne plinove koji imaju klapne mogu se ispirati i za vrijeme normalnog rada glavnog motora, na način da se ispušni plinovi kompletno usmjere mimo generatora pare, direktno u atmosferu. U tome slučaju, na kraju ispiranja bi trebalo temeljito provjeriti da unutar generatora pare nije ostalo mokre čađe, jer ona uzrokuje povećano taloženje čađe kada se generator pare vrati u normalnu uporabu [31].

Voda koja ulazi u generator pare se radi smanjenja taloženja kamenca tretira različitim kemikalijama. Neke od tih kemikalija su natrijeva lužina i različiti oblici natrij-fosfata[32]. Te kemikalije vežu na sebe minerale odgovorne za nastanak kamenca te na taj način spriječavaju njihovo taloženje.

## 8. Požar generatora pare na ispušne plinove

Požar u generatoru pare na ispušne plinove nastaje zbog zapaljenja čađe koja se nataložila unutar njega. Kao i kod svakog požara, požar generatora pare ima svoj požarni trokut, koji objedinjava sve uvjete koji moraju biti zadovoljeni da bi došlo do požara (goriva tvar, toplina i kisik). Kod generatora pare požarni trokut čine: goriva tvar je čađa, toplina se predaje sa zagrijanih dijelova unutar generatora pare te iz vrućih ispušnih plinova, kisik u koncentraciji od 14% koji je sadržan unutar ispušnih plinovima je dovoljan za održavanje procesa gorenja. Požar u generatorima pare na ispušne plinove u normalnim okolnostima kad se dogodi bude limitiran na veoma malo područje, dok se u ekstremnim uvjetima može proširiti u takav požar koji izaziva veoma ozbiljnu prijetnju čitavome brodu. Točka zapaljenja čađe je obično 300 – 400°C, dok u prisustvu čađe koja je pomiješana sa gorivom, točka zapaljenja se može spustiti i do 120°C [33].

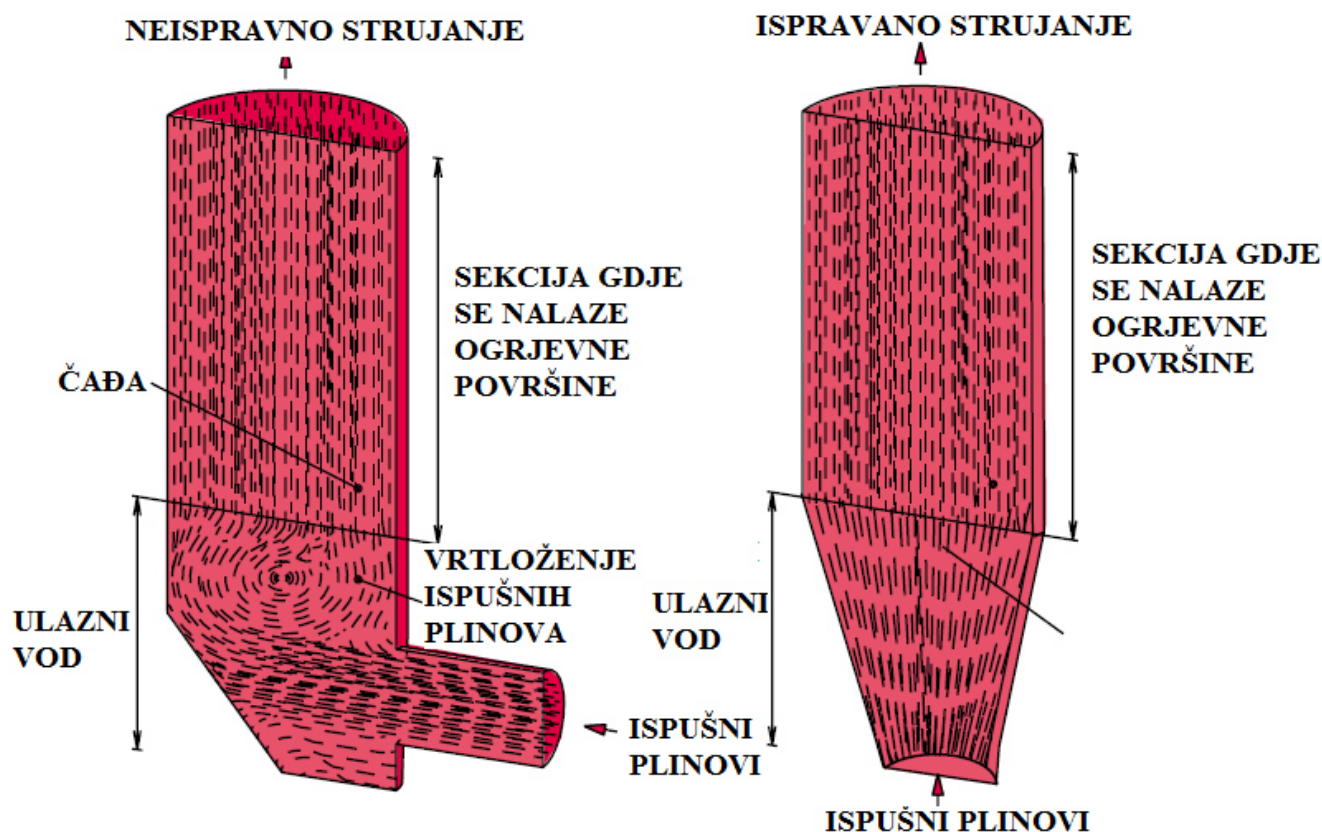


Slika 17. Posljedice požara u generatoru pare na ispušne plinove[31, str. 14.]

Slika 17. prikazuje posljedicu požara generatora pare na ispušne plinove, a ta posljedica je potpuno rastapanje cijevi generatora pare.

U eksploataciji generatora pare neke konstruktivne karakteristike su se pokazale veoma nepovoljnima, te uzrokuju povećanu frekvenciju pojave požara.

Generatori pare koji su dizajnirani da rade s veoma malim brzinama strujanja ispušnih plinova (ispod 10 m/s [34]), imaju veću vjerojatnost nastanka požara, dok generatori pare kod kojih su te brzine osjetno više (20 m/s [35]), nisu bili podložni nastajanju požara. Prilikom projektiranja generatora pare na ispušne plinove važno je obratiti pozornost i na način strujanja ispušnih plinova, jer neke izvedbe uzrokuju da brzina strujanja u određenim dijelovima padne veoma nisko, zbog vrtloženja ispušnih plinova, kako i prikazuje slika 18. Dijelovi generatora pare gdje dolazi do pada brzine strujanja, postaju žarišta gdje se sakuplja velika količina čađe, te se na tim dijelovima povećava opasnost od nastanka požara.



Slika 18. Neispravno i ispravno strujanje ispušnih plinova [32, str. 21.]

Ljepljivost čađe je još jedan u nizu faktora koji utječu na vjerojatnost nastajanja požara u generatoru pare na ispušne plinove. Čađa postaje sve ljepljivija kada temperatura ispušnih plinova je niža. Snižavanjem temperature ispušnih plinova dolazi do povećane kondenzacije vodene pare koja se u njima nalazi, taj kondenzat se miješa sa česticama čađe i čini ih veoma ljepljivima. Kada dođe do povećanja količine nataložene čađe na ogrjevnim površinama generatora pare, bilo bi poželjno dodavati aditive gorivu, koji smanjuju ljepljivost čađe [36]. Brzina strujanja vode kroz cijevi također može utjecati na vjerojatnost nastanka požara. Kod malih brzina strujanja vode, dolazi do stvaranja malih mjehurića pare unutar cijevi, uslijed preduge izloženosti vode toplini iz ispušnih plinova. Na mjestima nastanka tih mjehurića pare dolazi do velikog porasta temperature, koja omogućuje zapaljenje čađe.

U slučaju nastanka požara, najjednostavniji način gašenja požara je spriječavanje dovoda kisika vatri. Kako kisik, koji neophodan za proces gorenja, dolazi iz ispušnih plinova potrebno je zaustaviti glavni motor. Također je potrebno zaustaviti cirkulaciju svježeg zraka kroz motor, te držati zatvorenim ispušne ventile. Ako se cijevi nisu rastalile cirkulacija vode se mora nastaviti kroz generator pare, kako bi voda koja cirkulira cijevima hladila generator pare. U slučaju da su se cijevi rastalile, cirkulacijsku pumpu treba ugasiti, a sve ventile zatvoriti. Propuhivač čađe u slučaju požara se nesmije koristiti, jer ako se za ispuhivanje čađe koristi komprimirani zrak ili para, požaru se iz toga zraka dobavlja kisik koji podržava gorenje, dok para povećava rizik od visokotemperaturnog požara.

## 9. Zaključak

Kao i u svakoj grani industrije, u najvećoj mjeri ekonomske prilike diktiraju koji uređaji će biti instalirani u pojedinome postrojenju, takav je slučaj i u brodarskoj industriji. Velika ušteda goriva koja se zbog generatora pare na ispušne plinove može ostvariti, učinila je ove uređaje gotovo neizostavnim dijelovima gotovo svih modernih brodskih postrojenja.

Velika fleksibilnost u radu, mogućnost spajanja s loženim generatorom pare u bilo kojem trenutku ako su zahtjevi postrojenja veći od kapaciteta generatora pare na ispušne plinove još su samo neke u nizu prednosti ovoga uređaja. Različite izvedbe ovih uređaja se koriste na različitim vrstama brodova, ali u principu sve te različite izvedbe su veoma slične po konstrukciji i načinu rada. Svi ti generatori pare se sastoje od ogrijevnih površina, kućišta, izolacije prostora za vodu i prostora gdje struje ispušni plinovi.

Za vrijeme normalnog rada ovog uređaja kontrolna jedinica klapni u zavisnosti o određenim ulaznim parametrima, sama odlučuje kolika će količina ispušnih plinova strujati kroz generator pare, pa posada ne mora voditi veliku brigu oko ovih uređaja.

Kada govorimo o održavanju ovih uređaja, iz ovoga rada možemo zaključiti da je ono veoma jednostavno i svodi se na različite metode spriječavanja i uklanjanja čađe iz prostora gdje struje ispušni plinovi, te naslaga kamenca u dijelovima gdje je smještena ili struji voda.

Neispravnim rukovanjem ovim uređajima, koristeći goriva veoma niske kvalitete, izbjegavanjem redovitog održavanja ovih uređaja, te neispravnim izgaranjem goriva u cilindrima dizel motora dolazi do veoma ozbiljnog rizika od nastanka požara unutar generatora pare. Požar može biti lokaliziran na mali dio generatora pare, ali se u određenim uvjetima može razviti u ozbiljnu prijetnju čitavome brodu. U slučaju požara potrebno je spriječiti dovod zraka požaru tako da se izgasi glavni motor, te se cirkulacija vode kroz generator pare mora nastaviti.

## 10. Popis literature

- [1] - **Internal Combustion Engines Components 2**, <http://industries-news.blogspot.hr/2010/07/internal-combustion-engines-components.html>, 23.05 2017.
- [2] - **Internal Combustion Engines Components 2**, <http://industries-news.blogspot.hr/2010/07/internal-combustion-engines-components.html>, 23.05 2017.
- [3] - **Internal Combustion Engines Components 2**, <http://industries-news.blogspot.hr/2010/07/internal-combustion-engines-components.html>, 23.05 2017.
- [4] – **Rankineov ciklus**, [https://hr.wikipedia.org/wiki/Rankineov\\_ciklus](https://hr.wikipedia.org/wiki/Rankineov_ciklus), 27.09.2017.
- [5] -  
[http://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop412A/2011\\_0059\\_SCORM\\_MFKGT5064-EN/content/3/1\\_1/image004.png](http://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop412A/2011_0059_SCORM_MFKGT5064-EN/content/3/1_1/image004.png), 27.09.2017.
- [6] - **Toplinsko zračenje**, [https://hr.wikipedia.org/wiki/Toplinsko\\_zra%C4%8Denje](https://hr.wikipedia.org/wiki/Toplinsko_zra%C4%8Denje), 13.07.2017.
- [7] -Dr. Zmagoslav Prelec, **Brodski Generatori Pare**, Školska knjiga, Zagreb, 1990., str. 138.
- [8] - Milan Novoselić, **Brodski parni kotlovi i strojevi**, Školska knjiga, Zagreb, 1990.
- [9] -Dr. Zmagoslav Prelec, **Brodski Generatori Pare**, Školska knjiga, Zagreb, 1990., str. 131.
- [10] -Dr. Zmagoslav Prelec, **Brodski Generatori Pare**, Školska knjiga, Zagreb, 1990., str. 133.
- [11] - <http://gandras.net/wp-content/uploads/dampers.png>, 27.09.2017.

[12] - **Generator pare**,

[https://hr.wikipedia.org/wiki/Generator\\_pare#Vatrostalni\\_ozid\\_i\\_toplinska\\_izolacija](https://hr.wikipedia.org/wiki/Generator_pare#Vatrostalni_ozid_i_toplinska_izolacija),  
20.08.2017.

[13] - **Generator pare**, [https://hr.wikipedia.org/wiki/Generator\\_pare](https://hr.wikipedia.org/wiki/Generator_pare), 25.09.2017.

[14] -Dr. Zmagoslav Prelec, **Brodski Generatori Pare**, Školska knjiga, Zagreb, 1990., str.  
206.

[15] - **Deposits and Fires in Exhaust gas Boilers**,

<http://marine.man.eu/docs/librariesprovider6/technical-papers/soot-deposits-and-fires-in-exhaust-gas-boilers.pdf?sfvrsn=>, 23.08.2017.

[16] -Dr. Zmagoslav Prelec, **Brodski Generatori Pare**, Školska knjiga, Zagreb, 1990. str.  
206.

[17] - **Aalborg XS-7V**,<http://www.alfalaval.com/products/heat-transfer/boilers/Exhaust-gas-economizer/aalborg-xs-7v/>, 27.09.2017.

[18] -Dr. Zmagoslav Prelec, **Brodski Generatori Pare**, Školska knjiga, Zagreb, 1990., str.  
206.

[19] -Dr. Zmagoslav Prelec, **Brodski Generatori Pare**, Školska knjiga, Zagreb, 1990., str.  
206. **Composite Boiler**, <http://www.steamestem.com/index.html?boilers/composite-boilers.html>, 25.08.2017.

[20] - **Deposits and Fires in Exhaust gas Boilers**,

<http://marine.man.eu/docs/librariesprovider6/technical-papers/soot-deposits-and-fires-in-exhaust-gas-boilers.pdf?sfvrsn=>, 26.09.2017.

[21] - **Aalborg XW**, <http://www.alfalaval.com/globalassets/documents/industries/marine-and-transportation/marine/aalborg-xw.pdf>, 27.09.2017.



[22] - **Exhaust gas boiler**, <http://www.steamestem.com/index.html?boilers/exhaust-gas-boilers.html>, 27.09.2017.

[23] - **Exhaust gas boilers**, <http://www.althom.eu/en/clayton-industrial-steam-products-exhaust-gas-boilers/>, 27.09.2017.

[24] – **Aalborg XW – TG**,  
<http://www.alfalaval.com/globalassets/documents/industries/marine-and-transportation/marine/aalborg-xw-tg.pdf>, 27.09.2017.

[25] - **Composite Boiler**, <http://www.steamestem.com/index.html?boilers/composite-boilers.html>, 25.08.2017.

[26] - **Composite Boiler**, <http://www.steamestem.com/index.html?boilers/composite-boilers.html>, 25.08.2017.

[27] -Dr. Zmagoslav Prelec, **Brodski Generatori Pare**, Školska knjiga, Zagreb, 1990., str. 208.

[28] - **Deposits and Fires in Exhaust gas Boilers**,  
<http://marine.man.eu/docs/librariesprovider6/technical-papers/soot-deposits-and-fires-in-exhaust-gas-boilers.pdf?sfvrsn=>, 05.09.2017.

[29] - **Exhaust Gas Boilers And Economisers working procedure**,  
<http://www.machineryspaces.com/exhaust-gas-heat-exchangers.html>, 26.09.2017.

[30] -Dr. Zmagoslav Prelec, **Brodski Generatori Pare**, Školska knjiga, Zagreb, 1990., str. 241.

[31] - **Deposits and Fires in Exhaust gas Boilers**,  
<http://marine.man.eu/docs/librariesprovider6/technical-papers/soot-deposits-and-fires-in-exhaust-gas-boilers.pdf?sfvrsn=>, 27.09.2017.

[32] - **Deposits and Fires in Exhaust gas Boilers**,  
<http://marine.man.eu/docs/librariesprovider6/technical-papers/soot-deposits-and-fires-in-exhaust-gas-boilers.pdf?sfvrsn=>, 27.09.2017.

[33] - **Deposits and Fires in Exhaust gas Boilers**,  
<http://marine.man.eu/docs/librariesprovider6/technical-papers/soot-deposits-and-fires-in-exhaust-gas-boilers.pdf?sfvrsn=>, 05.09.2017.

[34] - **Deposits and Fires in Exhaust gas Boilers**,  
<http://marine.man.eu/docs/librariesprovider6/technical-papers/soot-deposits-and-fires-in-exhaust-gas-boilers.pdf?sfvrsn=>, 05.09.2017.

[35] - **Deposits and Fires in Exhaust gas Boilers**,  
<http://marine.man.eu/docs/librariesprovider6/technical-papers/soot-deposits-and-fires-in-exhaust-gas-boilers.pdf?sfvrsn=>, 05.09.2017.

[36] - **Deposits and Fires in Exhaust gas Boilers**,  
<http://marine.man.eu/docs/librariesprovider6/technical-papers/soot-deposits-and-fires-in-exhaust-gas-boilers.pdf?sfvrsn=>, 26.09.2017.

## **11. Popis slika**

Slika 1: **Osnovne komponente Clausius-Rankineovog procesa**

Slika 2: **T-s dijagram idealnog (bez gubitaka) Clausius-Rankineovog procesa**

Slika 3: **Prijelaz topline s ispušnih plinova, preko stijenke cijevi na vodu**

Slika 4: **Nastrujavanje dimnih plinova na zagrijač vode**

Slika 5: **Različite vrste cijevi**

Slika 6: **Presjek generatora pare na ispušne plinove**

Slika 7: **Klapne generatora pare na ispušne plinove**

Slika 8: **Različite izvedbe generatora pare na ispušne plinove**

Slika 9: **Dimnocijevni generator pare na ispušne plinove s vertikalnim cijevima**

Slika 10: **Protočni vodocijevni generator pare na ispušne plinove tipa Aalborg XW**

Slika 11: **Vodocijevni generator pare na ispušne plinove s iglastim cijevima**

Slika 12: **Vodocijevni generator pare na ispušne plinove tipa La Mont**

Slika 13: **Dvotlačni generator pare na ispušne plinove**

Slika 14: **Kompozitni generator pare**

Slika 15: **Spoj generatora pare na ispušne plinove s loženim generatorom pare**

Slika 16: **Spoj generatora pare na ispušne plinove s dva pomoćna ložena generatora pare**

**Slika 17: Posljedice požara u generatoru pare na ispušne plinove**

**Slika 18: Neispravno i ispravno strujanje ispušnih plinova**

## Sažetak

Rad je pisan s ciljem da se objasni način rada, konstrukcijske karakteristike, te način održavanja ovih generatora pare.

Generatori pare na ispušne plinove su uređaji koji smanjuju potrošnju goriva iskorištavanjem otpadne topline iz ispušnih plinova toplinskih uređaja. Ovi uređaji rade po termodinamičkom procesu koji se naziva Clausius–Rankineov proces. Toplina iz ispušnih plinova prelazi na vodu komešanjem, provođenjem topline, te toplinskim zračenjem.

Glavni dijelovi generatora pare na ispušne plinove su ogrjevne površine (zagrijač vode, isparivač i pregrijač pare), gdje se događa prijelaz topline s ispušnih plinova na vodu ili paru, klapne za regulaciju protoka ispušnih plinova, te kućište i izolacija.

Generatori pare na ispušne plinove dijele se: prema mediju koji struji unutar cijevi, prema smještaju cijevi, prema načinu cirkulacije vode, dijele se i na generatore pare koji imaju mogućnost dodatnog loženja i generatore pare koji nemaju mogućnost dodatnog loženja, te na generatore pare na ispušne plinove koji rade samostalno ili u spoju s loženim generatorom pare.

Generator pare na ispušne plinove može se spajati s pomoćnim loženim generatorom pare, te s dva pomoćna ložena generatora pare.

Glavni problem kod eksploatacije ovih uređaja stvaraju naslage čađe i kamenca, koje onemogućuju normalan rad ovih uređaja.

Osim onemogućavanja normalnog rada, naslage čađe mogu prouzročiti mnogo ozbiljniji problem za cijelokupno brodsko postrojenje. Taj problem je nastanak požara unutar generatora pare na ispušne plinove. Požarni trokut ovog požara čine: čađa kao goriva tvar, kisik koji je sadržan u ispušnim plinovima, te zagrijani dijelovi unutar generatora pare i ispušni plinovi koji su izvor topline prilikom nastanka požara.

Ključne riječi: generatori pare, ispušni plinovi, termodinamički proces, ogrjevne površine, vodocijevni i dimnocijevni generator, održavanje, požar

# Summary

## Exhaust gas boilers

This paper is written with purpose of explaining working principles, design characteristics and methods of maintenance of these boilers.

Exhaust gas boilers are devices that reduce fuel consumption by recovering waste heat from exhaust gases leaving combustion engines. These boilers work by principles from the thermodynamic cycle called Clausius–Rankine cycle. Heat is transferred from exhaust gases to water by convection, thermal conduction and thermal radiation.

Main parts of exhaust gas boilers are heat surfaces (economizer, evaporator, superheater) where heat is transferred from exhaust gases to water or vapour, dampers for regulating exhaust gases flow, housing and isolation.

Exhaust gas boilers are classified by: medium which circulates inside tubes, pipe accommodation, means of water circulation, by exhaust gas boilers with additional heating and without additional heating, by exhaust gas boilers which work jointly with oil fired boiler and exhaust gas boilers which work independent of oil fired boilers.

Exhaust gas boiler can be jointed to work with auxiliary boiler or with two auxiliary boilers.

Main problem occurring during exploitation of these boilers are deposits of soot and scale, which are interrupting with normal operation of exhaust gas boilers.

Except interrupting with normal operation of exhaust gas boilers, soot deposits can cause far greater problem for whole ship. That problem is fire inside of exhaust gas boiler. Fire triangle of this fire is composed of: soot which acts as fuel, oxygen comes from exhaust gases and heat is supplied by hot surfaces inside of boiler and by hot exhaust gases.

Key words: steam boiler, exhaust gases, thermodynamic cycle, heating surfaces, water tube and smoke tube generator, maintenance, fire