

# Generatori inertnog plina

---

Čogelja, Filip

Undergraduate thesis / Završni rad

2020

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Split, Faculty of Maritime Studies / Sveučilište u Splitu, Pomorski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:164:426841>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-04-02**

Repository / Repozitorij:

[Repository - Faculty of Maritime Studies - Split -  
Repository - Faculty of Maritime Studies Split for  
permanent storage and preservation of digital  
resources of the institution](#)



UNIVERSITY OF SPLIT



**SVEUČILIŠTE U SPLITU  
POMORSKI FAKULTET U SPLITU**

**FILIP ČOGELJA**

**GENERATORI INERTNOG PLINA**

**ZAVRŠNI RAD**

**SPLIT, 2020.**

**SVEUČILIŠTE U SPLITU  
POMORSKI FAKULTET U SPLITU**

**STUDIJ: BRODOSTROJARSTVO**

# **GENERATORI INERTNOG PLINA**

**ZAVRŠNI RAD**

**MENTOR:**  
**dr. sc. Branko Lalić**

**STUDENT:**  
**Filip Čogelja**  
**(MB:0171275083)**

**SPLIT, 2020.**

## SAŽETAK

U uvodnom dijelu završnog rada je iznesena problematika koja je prisutna nepostojanjem sustava inertiranja teretnih tankova na trgovačkim brodovima. Poglavlje o osnovama procesa izgaranja definira uvjete potrebne za nastanak izgaranja, kao i načine njihovog izbjegavanja, te ponašanje tereta s obzirom na radne parametre i prilikom manipulacije sa istim. U poglavlju o inertnom plinu se navode načini proizvodnje inertnog plina na brodovima, kao i zahtjevi pri njihovoj uporabi, te se vrši usporedba pojedinih postrojenja u ovisnosti o kvaliteti proizvedenog inertnog plina i opasnosti koje se mogu javiti pri njegovoj upotrebi. Poglavlje o generatorima inertnog plina opisuje princip rada generatora inertnog plina kao jednog od načina proizvodnje inertnog plina na brodovima, te njegovi konstrukcijski dijelovi i zaključno sa njegovim rukovanjem i implementiranim sigurnosnim sustavima.

**Ključne riječi:** *inertiranje, izgaranje, teret, postrojenje, generator inertnog plina*

## ABSTRACT

In introduction part are presented problems which are present without existence of the cargo spaces inerting system on merchant ships. In burning theory basics are defined requirements for the burning emergence with methods of its avoidance and cargo behaviour considering operating parameters and its manipulation. The inert gas chapter quotates methods of producing inert gas onboard along with requirements of its usage and comparison of some inert gas plants is being performed considering the quality of produced inert gas and dangers which can occur during its usage. Chapter about inert gas generators describes the working principle of inert gas generator as one of the inert gas systems onboard along with its construction parts and including its operation and implemented safety systems

**Keywords:** *inerting, burning, cargo, plant, inert gas generator*

# SADRŽAJ

<b>1. UVOD</b> .....	<b>1</b>
<b>2. OSNOVE PROCESA IZGARANJA</b> .....	<b>2</b>
2.1. OVISNOST TERETA O RADNIM PARAMETRIMA .....	2
2.2. PODRUČJE ZAPALJIVOSTI .....	3
2.3. NASTANAK ZAPALJIVE KONCENTRACIJE PRI ISKRCAJU TERETA	4
<b>3. INERTNI PLIN</b> .....	<b>6</b>
3.1. OPĆENITO O INERTNOM PLINU .....	6
3.2. ZAHTJEVI ZA UPOTREBU INERTNOG PLINA NA BRODOVIMA.....	6
3.3. SASTAV I USPOREDBA INERTNOG PLINA NAKON PROIZVODNJE ..	7
3.4. OPASNOSTI IZLOŽENOSTI I RUKOVANJE SA INERTNIM PLINOM	10
<b>4. POSTROJENJA ZA PROIZVODNJU INERTNOG PLINA</b> .....	<b>11</b>
4.1. UPORABA PLINOVA IZGARANJA GENERATORA PARE .....	11
4.2. GENERATOR DUŠIKA .....	12
4.3. OSTALE KOMPONENTE POSTROJENJA .....	13
4.3.1. Kompresori i ventilatori inertnog plina.....	13
4.3.2. Analizator kisika .....	14
4.3.3. Palubna vodena brtva i glavni zaporni ventil .....	15
4.3.4. Adsorberi vlage .....	17
<b>5. GENERATORI INERTNOG PLINA</b> .....	<b>19</b>
5.1. OPIS POSTROJENJA SA GENERATOROM INERTNOG PLINA .....	19
5.2. KONSTRUKCIJSKI DIJELOVI GENERATORA INERTNOG PLINA ...	21
5.3. INERTIRANJE TERETNIH PROSTORA PRIJE UKRCAJA TERETA ...	23
5.4. ALARMI U SUSTAVU GENERATORA INERTNOG PLINA .....	24
<b>6. ZAKLJUČAK</b> .....	<b>26</b>
<b>LITERATURA</b> .....	<b>27</b>
<b>POPIS SLIKA</b> .....	<b>28</b>
<b>POPIS TABLICA</b> .....	<b>29</b>
<b>POPIS KRATICA</b> .....	<b>30</b>

## 1. UVOD

Pomorski promet predstavlja najjeftiniju metodu transporta jer osim izgradnje prihvatnih terminala za teret i putnike nije potrebno ulagati u pomorske puteve, a ekonomskoj isplativosti pomorskog prometa pridonose i veliki prijevozni kapaciteti brodova. Međutim, zamršenost broskog strojnog kompleksa kao i činjenica da u takvom okruženju nepostojanje određenog sigurnosnog sustava ili pojava i najmanje greške može uzrokovati fatalnu posljedicu, što za pomorce predstavlja ogroman rizik posla. Promatrajući samo teretne brodove od kojih su najznačajniji brodovi za prijevoz tekućih tereta jer oni čine najveći dio ukupnog svjetskog trgovačkog pomorskog prometa, sa njima se mogu povezati brojne nesreće koje nisu isključivo uzrokovane ljudskom greškom nego i nepostojanjem sigurnosnog sustava pomoću kojega su se razmjeri nesreće mogli znatno ublažiti, kao primjerice tanker za prijevoz sirove nafte Texanita na kojemu su 1972. godine pri sudaru sa drugim brodom eksplodirali teretni tankovi zbog sadržaja zapaljivih para sirove nafte u njima samima pri čemu su poginula 32 člana posade. Navedena nesreća se u tadašnje vrijeme zbog razmjera štete i broja poginulih smatrala najvećom što se tiče sudara dvaju brodova, te je kao jedna od mnogih bila poticaj za uvođenje sigurnosnih sustava u teretni prostor čime se rizici od nastanka eksplozije prilikom sudara i svakodnevnih operacija sa teretom svode na minimum, a danas je to postignuto inertiranjem atmosfere teretnih tankova.

Cilj završnog rada je ukazati na način upotrebe i implementacije generatora inertnog plina kao jednog od načina sprječavanja nastanka navedenih situacija, a shodno tome i zaštite života posade. Prije svega, pažnja se pridonosi procesu izgaranja jer poznavajući njega se može doći do pravovremenog i adekvatnog načina zadovoljavanja stupnja sigurnosti i eliminacije potencijalnog rizika od opasnosti u teretnom prostoru kao i u bilo kojem drugom dijelu broda koji se koristi inertnim plinom, a u tu svrhu je potrebno znati i ovisnost tereta o radnim parametrima, raspon područja zapaljivosti i mehanizam nastanka zapaljive koncentracije eksplozivnih teretnih para prilikom manipulacije teretom. Nadalje, potrebno je definirati i zahtjeve koji se postavljaju pred konstruktivnim izvedbama sustava sa uporabom generatora inertnog plina i sastav inertnog plina proizveden u generatoru pare, te njegovu konstrukciju, sustave zaštite u slučaju zakazivanja pojedinih komponenti i procedure prilikom inertiranja teretnih tankova pri ukrcaju i iskrcaju tereta.

## **2. OSNOVE PROCESA IZGARANJA**

Da bi izgaranje kao kemijski proces uopće započelo, potrebno je ispuniti tri uvjeta, a to su prisutnost gorive tvari, prisutnost neke materije koja podržava gorenje (kisik) i dovoljno dovedene topline potrebne za početak procesa. Svi ovi uvjeti se mogu shematski prikazati trokutom gorenja, a u modernijoj literaturi se može pronaći i pojam tetraedar gorenja u koji je osim navedenih uvjeta uvrštena i lančana reakcija između gorive tvari i kisika. Važno je za napomenuti da se uklanjanjem samo jednog od uvjeta sprječava proces gorenja. Zbog navedenoga je potrebno izvršiti analizu svih uvjeta i odabrati adekvatan način eliminacije jednog od uvjeta kako bi u svakom vremenu bila zadovoljena sigurnost, kako u teretnim prostorima tako i u bilo kojem drugom dijelu broda. Nažalost, zbog specifičnosti broskog strojnog kompleksa je jednostavno nemoguće ukloniti svaki od izvora topline kao jednog segmenta trokuta (tetraedra) gorenja, a koji se manifestiraju kao statički elektricitet, mehaničke i električne iskre, otvoreni plamen, površine s povišenom temperaturom i drugo, a u konačnici se i zbog najmanje neopreznosti može uzrokovati pojava zapaljenja, eksplozije i katastrofe na brodu. Budući da ne postoji mogućnost eliminacije navedenih izvora topline na brodu, pribjegava se njihovom ograničavanju propisima i tehničkim uvjetima.

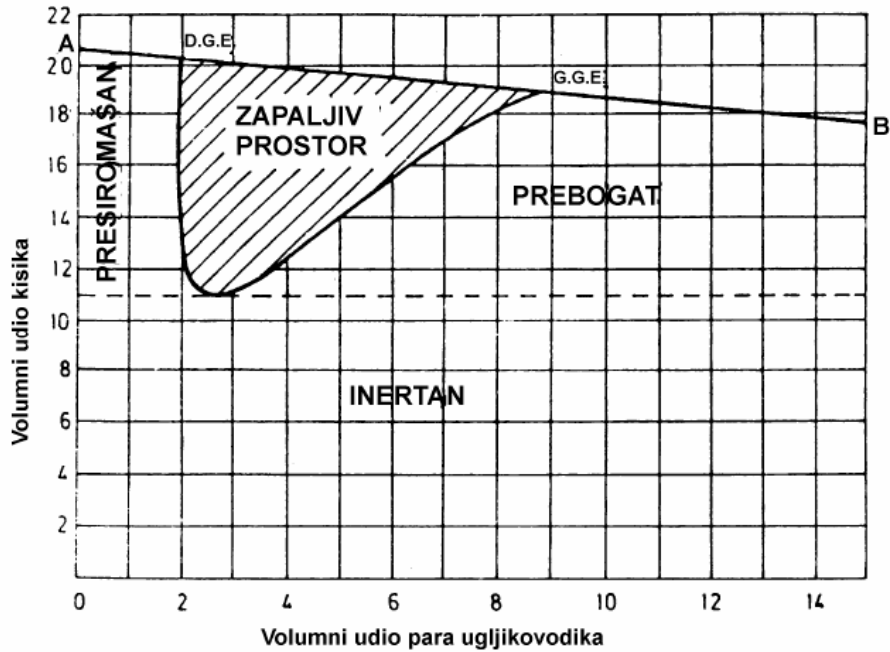
### **2.1. OVISNOST TERETA O RADNIM PARAMETRIMA**

Kod tekućih tereta je važno praćenje osnovnih termodinamičkih veličina stanja, odnosno volumena, tlaka i temperature. Volumen tereta predstavlja teretni prostor zauzet od strane tereta i on je ograničen na 98% volumena teretnog prostora kako bi se u slučaju isparljivih tereta (sirova nafta, prirodni plin) omogućilo njihovo isparavanje i kako bi se izbjegao porast tlaka u teretnom prostoru usljed isparavanja, jer kod cijelog ispunjenog volumena teretnog prostora ne postoji dodatni prostor koji bi zauzela para tereta. Temperatura tekućeg tereta se mora održavati jednakom kod svih faza manipulacije teretom i na nju je nemoguće utjecati, jer se ona mora stalno održavati kako bi se i teret održao u tekućem stanju bez obzira na područje plovidbe broda i različite devijacije u temperaturama. Grijanje tereta na veću temperaturu od dopuštene negativno utječe na sigurnost broda jer se u tom slučaju pospešuje isparavanje. Parametar tlaka je također vrlo bitan, jer se njegovim smanjivanjem omogućuje jače isparavanje hlapljivih sastojaka iz tekućeg tereta, odnosno većim pretlakom se iznad površine tekućine stvara dovoljan otpor kako bi se smanjila brzina hlapljivih molekula koje bi napustile kapljevину i pospešile isparavanje. [3]

## 2.2. PODRUČJE ZAPALJIVOSTI

Područje zapaljivosti ili područje eksplozivnosti predstavlja ovisnost o minimalnoj i maksimalnoj količini zapaljivih para pomiješanih sa zrakom (kisikom) koja može dovesti do eksplozije. Ono se obično ucrtava u dijagram eksplozivnosti, a jedan takav je prikazan na slici 1. Valja napomenuti da se ovakvi dijagrami mogu nacrtati i u drugačijem položaju, odnosno zaokrenuti za  $90^\circ$ , ali je način čitanja dijagrama isti. U ovom slučaju, na osi apscisi se nalazi volumni udio para ugljikovodika u eksplozivnoj smjesi, a na osi ordinati su naneseni volumni udjeli kisika. Područje je omeđeno sa dvije granice unutar kojih je moguć nastanak eksplozije, a to su gornja i donja granica eksplozivnosti. Donja granica eksplozivnosti LEL (engl. Lower Explosive Limit) predstavlja minimalnu količinu para ugljikovodika pomiješanih sa zrakom koja može dovesti do eksplozije, a ona se prema dijagramu za smjesu para sirove nafte i atmosferskog zraka nalazi na 2% para ugljikovodika i 20,4% kisika. Gornja granica eksplozivnosti UEL (engl. Upper Explosive Limit) predstavlja maksimalnu količinu para ugljikovodika pomiješanih sa atmosferskim zrakom koja može dovesti do eksplozije. Prema dijagramu, ona se postiže kod 9% para ugljikovodika i 19% kisika. Smjesa atmosferskog zraka i para sirove nafte je u dijagramu prikazana pravcem AB. Svaka smjesa s manjom koncentracijom para ugljikovodika, odnosno lijevo od donje granice eksplozivnosti (manje od 2% volumnog udjela para ugljikovodika) postaje siromašna i u tom području ne može doći do eksplozije. Također, do eksplozije ne može doći ni ako je koncentracija para ugljikovodika veća, odnosno desno od gornje granice eksplozivnosti (više od 9% volumnog udjela para ugljikovodika) jer smjesa tada postaje prebogata. Smanjivanjem sadržaja kisika u zraku ispod 20,8% se dobivaju pravci smjese atmosferskog zraka i para sirove nafte paralelni sa pravcem AB i leže ispod njega. Također, s time donja granica eksplozivnosti lagano raste, a gornja se snižava pa se zbog toga smanjuje eksplozivni prostor. Kada je sadržaj kisika u tanku 11% i manji, do eksplozije više ne može doći budući da je u smjesi atmosferskog zraka i para sirove nafte nedovoljna količina kisika koja bi podržala izgaranje. [5]

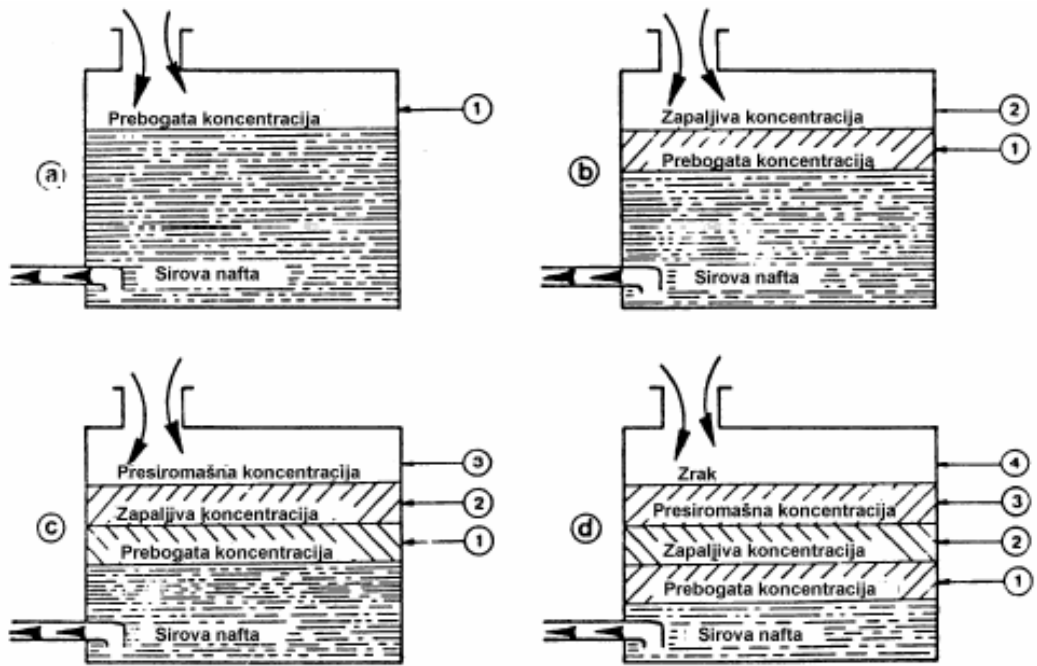




Slika 1: Prikaz dijagrama eksplozivnosti [5]

### 2.3. NASTANAK ZAPALJIVE KONCENTRACIJE PRI ISKRCAJU TERETA

Jedna od najzahajevnijih operacija prilikom manipulacije teretom na brodovima za prijevoz tekućih tereta, osobito sirove nafte i ukapljenih plinova je njegov iskrcaj. Shematski prikaz nastanka zapaljive smjese u teretnom tanku u slučaju iskrcaja tereta bez uporabe inertiranja atmosfere ili nekog drugog načina redukcije koncentracije kisika je prikazan na slici 2. Naime, budući da se transferiranjem tereta iz tanka u njemu stvara podtlak, u njega je potrebno istovremeno uvoditi zrak kako bi se spriječile deformacije i oštećenja stijenki tanka. Međutim, to za posljedicu ima stvaranje zapaljive koncentracije teretnih para i okolnog zraka, odnosno smjesa se nalazi između gornje i donje granice eksplozivnosti. Kao što je spomenuto u [5], raslojavanje pojedinih faza koncentracija nastaje na način da je u početku koncentracija u tanku bogata zbog većeg udjela teretnih para od okolnog zraka. Nakon što se dostigla zapaljiva koncentracija uvođenjem zraka, sa povećavanjem koncentracije zraka, odnosno kisika u tanku, koncentracija postaje siromašna zbog većeg udjela kisika od teretnih para. Da bi se navedeno izbjeglo, pri iskrcaju je potrebno poduzeti operaciju inertiranja teretnog prostora, što podrazumijeva uvođenje inertnog plina sa pretlakom u teretni tank u svrhu smanjivanja sadržaja kisika do vrijednosti u kojoj se izgaranje ili eksplozija ne može ostvariti.



Slika 2: Faze nastanka zapaljive koncentracije u teretnom tanku [5]

### **3. INERTNI PLIN**

#### **3.1. OPĆENITO O INERTNOM PLINU**

Pod pojmom inertni plin se podrazumijevaju plinovi ili smjesa plinova izgaranja koji ne podržavaju kemijsku reakciju izgaranja iako su uvjeti za ostvarivanje navedene kemijske reakcije ispunjeni. Često se ovaj pojam zamjenjuje sa plemenitim plinova, međutim postoji razlika u tome što je inertni plin smjesa više plinova koja ne pokazuje svojstva reaktivnosti u kombinaciji sa gorivim tvarima. Prema [10], svojstvo inertnosti se krije u tome što je struktura atoma pojedinog plina koji čini udio u inertnom plinu različita od strukture većine plinova budući da inertni plinovi imaju vanjsku atomsku orbitalu ispunjenu sa elektrona, zbog čega su stabilni i nemaju tendenciju interakcije sa drugim atomima. Za upotrebu na brodu inertni plin može biti proizveden obradom plinova izgaranja iz glavnih ili pomoćnih generatora pare, proizvodnjom pomoću zasebnog postrojenja sa generatorom inertnog plina ili pomoću generatora dušika.

#### **3.2. ZAHTJEVI ZA UPOTREBU INERTNOG PLINA NA BRODOVIMA**

Sukladno sa međunarodnim dokumentima i ustanovama koje se bave odobravanjem strojnih sustava na brodovima, i sustav inertnog plina podliježe navedenome. O uvjetima ugradnje sustava inertnog plina na brodovima i rješenjima za njegovu primjenu se bave određene međunarodne konvencije, među kojima je najznačajnija Konvencija o sigurnosti ljudskih života na moru SOLAS (engl. The International Convention for the Safety of Life at Sea), a u skladu sa njom i pravila klasifikacijskih zavoda. U Republici Hrvatskoj nadležno tijelo glede vršenja ugradnje sustava inertnog plina na brodu kako bi se osiguralo da je isti ugrađen u skladu sa zahtjevima propisa predstavlja Hrvatski registar brodova. Prema pravilima navedenima u [4], inertiranje teretnih prostora i praznih teretnih tankova mora omogućiti smanjeni sadržaj kisika u atmosferi do razine koja ne podržava gorenje sa najviše 8% sadržaja kisika u bilo kojem dijelu teretnog prostora cijelo vrijeme bez obzira nalazi li se brod u luci ili u plovidbi, odnosno spriječiti ulazak atmosferskog zraka u teretni prostor prilikom manipulacije teretom. Nadalje, kao inertni plin se mogu koristiti obrađeni plinovi izgaranja glavnih ili pomoćnih generatora pare ili posebnih generatora inertnog plina na tekuće gorivo pri čemu Registar može odobriti upotrebu sustava koji koriste druge dobavljače inertnih plinova, kao i bilo koju kombinaciju navedenih uz uvjet jednake

djelotvornosti i sigurnosti. Također, brod mora biti opremljen sa detaljnim uputama za rad, sigurnost i održavanje sustava i upute u svezi primjene održavanja na teretni sustav, pri čemu moraju sadržavati i postupke u slučajevima zastoja ili greške u radu sustava. Što se tiče komponenti sustava, mora se predvidjeti uređaj za pročišćavanje dobivenog plina u ovisnosti koriste li se plinovi izgaranje generatora pare ili plinovi izgaranja iz generatora inertnog plina. Pročišćivač mora biti opremljen neovisnom rashladnom pumpom sa priključkom na drugi sustav dobavne rashladne morske vode bez utjecaja na rad tog sustava. Isto tako, mora biti opremljen i sa revizionim oknima otpornima na udare i temperaturu u svrhu promatranja protoka dobivenog inertnog plina i održavanja pročišćivača. Cjelokupni sustav mora biti izveden i sa zaštitom teretnih tankova od prekomjernog tlaka, odnosno sustav ne smije generirati tlak u bilo kojem tanku veći od pokusnog tlaka bilo kojeg tanka. Dojava sustava mora biti izvedena na način da za vrijeme dobave inertnog plina mora postojati trajno bilježenje tlaka i sadržaja kisika inertnog plina u glavnom cjevovodu inertnog plina ispred nepovratnih naprava. Također, trebaju se predvidjeti i pokazivači navedenih parametara na zapovjedničkom mostu i u upravljačkoj prostoriji strojarnice. Generatori inertnog plina predstavljaju posebnu skupinu vezano za statutarnu certifikaciju. Prema Hrvatskome registru brodova, njihov smještaj mora biti u posebnoj prostoriji u ovisnosti o temperaturi plamišta goriva za generator, odnosno ukoliko je temperatura plamišta goriva ispod 60°C. Također, glavni dovodni cjevovod inertnog plina ne smije prolaziti kroz prostorije strojnih sustava, nastamba posade i službenih prostorija. Prilikom distribucije cjelokupni sustav mora imati mogućnost ispuštanja inertnog plina u atmosferu za vrijeme pripreme sustava za rad ili u slučaju kvara, a ukoliko je u sustav ugrađen kompresor ili visokotlačni ventilator za transfer inertnog plina prema teretnom prostoru, na njegovoj tlačnoj strani mora biti predviđena sigurnosna naprava za sprječavanje porasta tlaka iznad dopuštenog. Također, za sustav inertnog plina sa generatorom inertnog plina se moraju predvidjeti dodatni zvučni i svjetlosni znakovi upozorenja u slučaju nedovoljne dobave goriva, te prestanka dovodenja energije generatoru i uređajima automatskog upravljanja radom generatora, pri čemu mora biti izvedeno automatsko zatvaranje ventila za upravljanje dobavom plina i prekid dobave goriva generatoru u navedenim slučajevima.

### **3.3. SASTAV I USPOREDBA INERTNOG PLINA NAKON PROIZVODNJE**

Kao što je već spomenuto u prethodnim poglavljima, inertni plin se najčešće na brodu može dobiti njegovom proizvodnjom u generatoru inertnog plina, obradom plinova izgaranja

iz brodskih generatora pare te pomoću generatora dušika. U ovisnosti o zahtjevima prema kvaliteti dobivenog inertnog plina, na pojedinim teretnim brodovima će se primjenjivati drugačije postrojenje, a sastav dobivenog inertnog plina u pojedinom specifičnom postrojenju i sadržaj nečistoća je prikazan tablično u tablici 1.

Primjerice, kod uporabe plinova izgaranja iz brodskih generatora pare je zadovoljen uvjet ograničavanja udjela kisika u proizvedenom inertnom plinu ispod 5% volumnog udjela, odnosno on iznosi od 2% do 5% volumnog udjela, jer bi svaki volumni udio kisika veći od navedenog izazvao ulazak smjese plinova u eksplozivno područje, odnosno mogućnost nastanka eksplozije. Prema [1], problem sa kisikom leži u tome što i manje količine kisika mogu izazvati nekompatibilnost sa pojedinim frakcijama tereta, kao što je primjerice butadien kod ukapljenog naftnog plina LPG (engl. Liquefied Petroleum Gas). Međutim, čistoća inertnog plina dobivenog na navedeni način i nije tako velika zbog sadržaja sumporovih i dušikovih oksida koji mogu izazvati kontaminaciju tereta i koroziju teretnog prostora, pa je ovakav način inertiranja prikladan za upotrebu kod inertiranja teretnog prostora kod tankera za prijevoz sirove nafte [3]. Isto tako, prilikom upotrebe plinova izgaranja brodskih generatora pare je potrebno voditi računa o kvalitetnom izgaranju goriva u generatoru pare iz razloga što svaka mala promjena opterećenja generatora pare može izazvati promjenu stehiometrijskog omjera goriva i zraka za izgaranje, a samim time i promjenu volumnog udjela kisika u inertnom plinu.

U ovisnosti o prisustvu kisika, prilikom izgaranja goriva se može odvijati potpuno izgaranje kod kojega su produkti izgaranja ugljikov dioksid i vodena para i nepotpuno izgaranje koje se razvija sa nedostatkom kisika i kod kojega kao produkt izgaranja nastaje ugljikov monoksid. Sva tri navedena produkta imaju različit utjecaj ukoliko se nađu u teretnom prostoru, a posljedično mogu imati i loš utjecaj na opremu za manipulaciju teretom prilikom iskrcaja, a za pogonske probleme najveći problem predstavlja ugljikov dioksid. Kao što je spomenuto ranije u [1], budući da se ukapljeni plin kao teret prevozi u ohlađenom stanju, njegova se temperatura održava na 162°C do 163 °C. Ukoliko u tako ohlađeni prostor dospije ugljični dioksid, on se kristalizira pri čemu može doći do kontaminacije plina, što je slučaj kod metana kod prijevoza ukapljenog prirodnog plina LNG (engl. Liquefied Natural Gas). Također, može kontaminirati terete na bazi amonijaka pri čemu teret ima tendenciju stvaranja kiselina, što prilikom iskrcaja može izazvati korozivno djelovanje ili začepljenje filtera, ventila i dijelova teretnih pumpi. Može djelovati i kao katalizator u kemijskim reakcijama sa spojevima sumpora u naftnim plinovima. Stoga, za tankere koji prevoze ukapljene plinove se postavljaju drugačiji zahtjevi za inertnim plinom, odnosno traži se veća

kakvoća i čistoća inertnog plina, a taj se uvjet jedino može ispuniti upotrebom preostala dva postrojenja, odnosno proizvodnjom inertnog plina u generatoru inertnog plina ili upotrebom dušika kao inertnog plina. Inertni plin dobiven uporabom navedenih postrojenja ima i manji volumni udio vlage koji je prisutan zbog čišćenja plinova izgaranja morskom vodom. Prisustvo vlage u inertnom plinu može izazvati njezino kondenziranje u teretu i koroziju metalnih dijelova tankova i teretnog prostora, kao i glavnog cjevovoda inertnog plina kojim se on distribuira prema teretnom prostoru. Isto tako je bitno i da inertni plin ima što nižu temperaturu rosišta kako bi se izbjeglo smrzavanje vlage u sustavu i kako se ne bi izazvale pogonske poteškoće.

Može se zaključiti da je glavna prednost proizvodnje inertnog plina u generatoru inertnog plina ta što se na ovakav način dobiva inertni plin prihvatljivih parametara za upotrebu pri inertiranju gotovo svih vrsta tereta, odnosno teretnih prostora, te je samo postrojenje neovisno o parametrima vanjskog izvora plinova izgaranja, odnosno njegovom opterećenju, što je slučaj kod upotrebe plinova izgaranja iz generatora pare. Međutim, njegov nedostatak se manifestira u kontroli kvalitete proizvedenog inertnog plina budući da se stalno mora nadzirati proces izgaranja i podešavati parametre izgaranja kako bi se izbjeglo stvaranje nepotpunog izgaranja, te pojavu čađe, ugljikovog monoksida i ostalih produkata nepotpunog izgaranja. Kvalitetu dobivenog inertnog plina određuje i vrsta goriva koja se koristi za njegovo stvaranje, a na vrstu goriva utječe i ekonomska raspoloživost brodarar, budući da su lakša Diesel goriva dosta skuplja za istu zapreminu skladišnog tanka goriva, odnosno količinu, pa navedeni faktor često ima utjecaj na konačnu odluku pri odabiru goriva, a samim time i postrojenja za proizvodnju inertnog plina.

**Tablica 1: Sastav inertnog plina u ovisnosti o proizvodnom postrojenju [3, 11]**

Komponenta	Udio u inertnom plinu		
	Generator inertnog plina	Brodski generator pare	Generator dušika
Dušik	od 85% do 89%	80%	do 99,5%
Ugljikov dioksid	14% do 14,5%	14%	nije prisutan
Ugljikov monoksid	maksimalno 0,1%	0,01%	nije prisutan
Kisik	od 0,5% do 1%	od 2% do 5%	do 0,5%
Sumporovi oksidi	2ppm	50ppm	nisu prisutni
Dušikovi oksidi	65ppm	200ppm	nisu prisutni
Temperatura rosišta	-45°C	-	-65°C
Pepeo i čađa	prisutni	prisutni	nisu prisutni
Vlaga (vodena para)	nije prisutna	5%	nije prisutna
Gustoća	1,035	1,044	0,9672
	Generator inertnog plina	Brodski generator pare	Generator dušika

### **3.4. OPASNOSTI IZLOŽENOSTI I RUKOVANJE SA INERTNIM PLINOM**

U teretnim tankovima koji su puni i inertirani, a često i u praznim inertiranim tankovima koncentracija kisika u smjesi zapaljivih para i plinova može biti manja od 21%, što ne mora biti slučaj samo zbog prisutnosti smjese zapaljivih para i plinova, nego u nekim slučajevima u teretnim tankovima koji su zatvoreni dulje vrijeme sadržaj kisika može biti smanjen zbog procesa korodiranja. Na čovjekov organizam svaka manja koncentracija od navedene izaziva poremećaj njegovog funkcioniranja, a u konačnici dugo izlaganje niskoj koncentraciji kisika (ispod 5%) izaziva i smrt.

Stoga prema navedenome u [7], ukoliko je potrebno vršiti operacije koje zahtijevaju ulazak u prostore sa smanjenom koncentracijom kisika, a u koje se ubrajaju i teretni inertirani tankovi, kompetentni članovi posade moraju posjedovati dozvolu za ulazak u zatvorene prostorije (engl. Entry Permit) i potrebno je poduzeti prikladne mjere kako bi se osigurala sigurnost osoba koje ulaze u zatvorene (teretne) prostore pri čemu se slijede određene procedure. Jedan od najvažnijih uređaja čija je upotreba obavezna prilikom ulaska u zatvorene prostorije je analizator kisika pomoću kojega je moguće ustanoviti volumni udio kisika u smjesi plinova u zatvorenom prostoru i na taj način detektirati moguću opasnost izlaganja niskoj koncentraciji kisika. Bitno je i naglasiti kontrolu propuštanja inertnog plina u tankove u kojima se vrši ulazak na način da se kontrolira propuštanje kroz glavni cjevovod inertnog plina ili kroz moguće pukotine na pregradama između tankova.

## **4. POSTROJENJA ZA PROIZVODNJU INERTNOG PLINA**

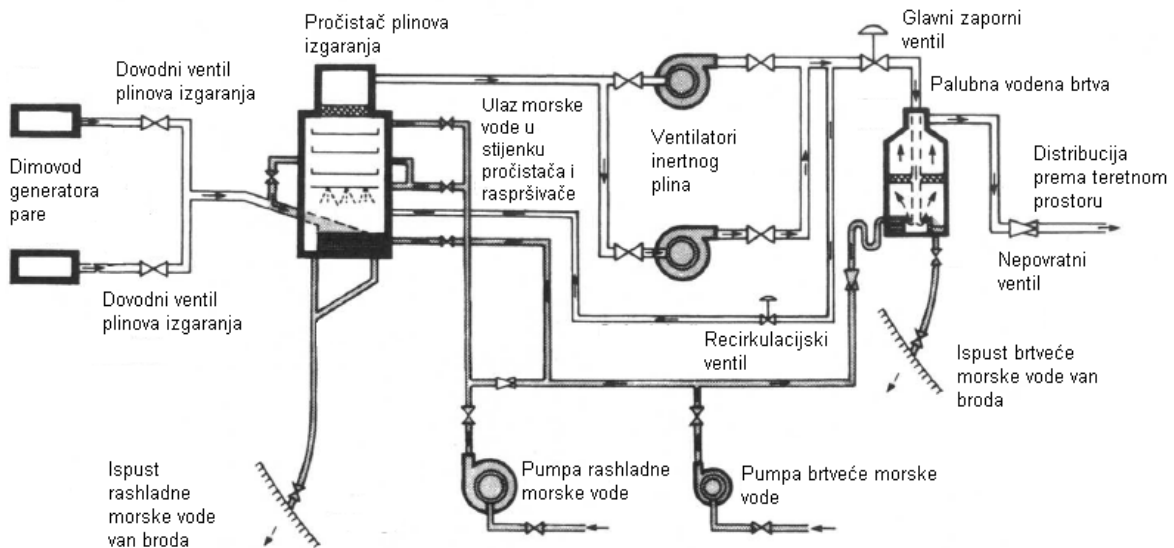
### **4.1. UPORABA PLINOVA IZGARANJA GENERATORA PARE**

Na tankerima za prijevoz sirove nafte obrađeni plinovi izgaranja broskog generatora pare predstavljaju zadovoljavajući i najobilniji izvor inertnog plina u smislu volumnog udjela kisika i temperature, a shematski prikaz postrojenja za njihovu obradu i distribuciju prema teretnom prostoru je prikazan na slici 3. Kao što je spomenuto u [3], plinovi izgaranja generatora pare koji obično imaju temperaturu otprilike 400°C preko cjevovoda ulaze u pročistač plinova izgaranja. Njegova svrha je tretiranje istih smanjivanjem njihove temperature i uklanjanjem štetnih korozivnih spojeva i krutih čestica. To se vrši na način da se u pročistač istovremeno preko posebne pumpe i raspršivača dovodi morska voda koja u obliku raspršenih kapljica struji odozgo prema dolje, a plinovi izgaranja struje u suprotnom smjeru, a također se dio morske vode koristi za rashladu stijenki pročistača. Morska voda nakon obavljanja svoje funkcije izlazi van broda preko cjevovoda.

Na izlazu iz pročistača je postavljen odvajač kapljica koji je izveden u obliku guste metalne mreže koji zaustavlja kapljice vode koje bi se strujom plinova izgaranja mogle transportirati u teretne tankove, što je nepoželjno. Tako tretirani plinovi izgaranja se usisavaju preko dva ventilatora koji ih tlače prema teretnim tankovima. Iza samih ventilatora se nalaze mjerna mjesta za mjerenje volumnog udjela kisika u inertnom plinu, te temperature i tlaka. Iza ventilatora, a prije glavnog zapornog ventila se nalazi recirkulacijski cjevovod prema pročistaču sa svojim ventilom.

Neposredno iza ventilatora je postavljen glavni zaporni ventil koji se ne može otvoriti ukoliko nije zadovoljen odgovarajući volumni udio kisika u inertnom plinu. Iza glavnog zapornog ventila se nalazi palubna vodena brtva i nepovratni ventil čija je svrha sprječavanje povratka eksplozivnih para prema pročistaču plinova izgaranja, odnosno prema samome generatoru pare. Prema palubnoj vodenoj brtvi se kontinuirani protok morske vode osigurava posebnom pumpom. Inertni plin se dovodi u palubnu vodenu brtvu vertikalnom cijevi čiji je otvor ispod površine vode, pa on može strujati samo u jednom smjeru, te kao takav napušta cjelokupno postrojenje i ulazi u teretni prostor.



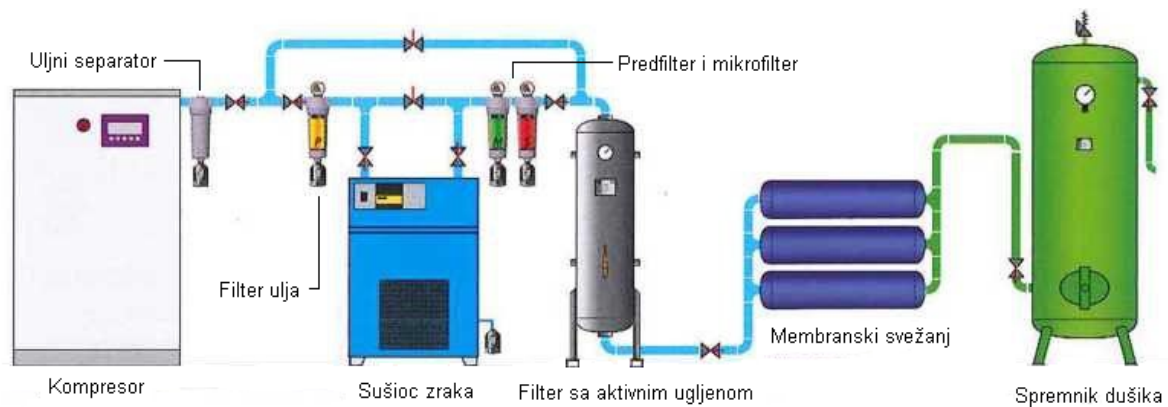


**Slika 3: Postrojenje za proizvodnju inertnog plina uporabom plinova izgaranja [14]**

#### 4.2. GENERATOR DUŠIKA

Uz generator inertnog plina i generator dušika predstavlja izvor inertnog plina sa zadovoljavajućom čistoćom u svrhu upotrebe za inertiranje teretnih tankova brodova za prijevoz ukapljenih plinova. Prema [3], proces proizvodnje započinje usisavanjem zraka iz strojarnice i njegovim tlačenjem koje se izvodi sa vijčanim kompresorom. Mješavina zraka i uljnih para za podmazivanje kompresora ulazi u uljni separator u kojemu se odvaja većina ulja, a dio ulja koji je preostao u zraku se odvaja u filtru i vraća se u kompresor cjevovodom. Nakon odvajanja ulja stlačeni zrak odlazi u sušioč zraka iz kojega se izdvaja vlaga na način da se zrak grije na temperaturi od otprilike 150°C, te iza sušioča prolazi kroz predfilter i mikrofilter koji služe za izdvajanje nečistoća. Nakon što je zrak suh i bez ikakvih čestica, provodi se kroz filter sa aktivnim ugljenom u kojemu se iz zraka odvajaju zaostaci ulja.

Tako pripremljen zrak ulazi u membranski svežanj u kojem se odvija proces odvajanja dušika od ostalih plinova posredstvom propusne membrane na način da plinovi kao što su kisik i ugljikov dioksid struje kroz vlakna membrane i skupljaju se na njezinom dnu, odnosno na dnu membranskog svežnja, dok dušik prolazi kroz vlakna i ulazi u cjevovod. Nakon membranskog svežnja, dušik se tlači u spremnik koji se nalazi na palubi i veličine je oko 10m<sup>3</sup>, a u njega se može tlačiti dušik do 10bar. Iz spremnika se dušik odvodi izravno u teretne tankove za njihovo inertiranje. Na slici 4. je prikazan shematski prikaz rada generatora dušika sa pripadajućim komponentama.



**Slika 4: Shematski prikaz rada generatora dušika [13]**

### 4.3. OSTALE KOMPONENTE POSTROJENJA

Inertni plin proizveden na način opisan u prethodnim poglavljima po određenim fizikalnim karakteristikama, kao što su zasićenost vodenom parom, volumni udio kisika i temperatura rosišta ne zadovoljavaju uvjete za primjenu u teretnim tankovima bez dodatne obrade, kao i bez sigurnosnih uređaja koji sprječavaju povratni protok mješavine teretnih para i inertnog plina natrag u postrojenje, što bi moglo izazvati eksploziju cjelokupnog postrojenja i štetu na brodskom strojnom kompleksu, a samim time i ugrožavanje života posade. U svrhu sprječavanja navedenoga su u cjelokupno postrojenje uključeni pročistači plinova izgaranja, analizator kisika, adsorberi vlage, tlačni prekidač, glavni zaporni ventil i palubna vodena brtva.

#### 4.3.1. Kompresori i ventilatori inertnog plina

U ovisnosti koje se postrojenje koristi na brodu, za transferiranje inertnog plina prema nepovratnim uređajima se mogu koristiti kompresori i ventilatori koji su u centrifugalnoj izvedbi, budući da je potreban dovoljan pretlak kojim se mogu savladati otpori u cjevovodima i nepovratnim uređajima. Kao što je spomenuto ranije u [3], izvedeni su sa otvorom kroz kojega se vrši čišćenje i ispiranje unutarnjih dijelova, a izrađeni su od kvalitetnog materijala otpornog na korozivno djelovanje štetnih tvari koje sadrže plinovi izgaranja generatora pare ili plinovi izgaranja lakog goriva u generatoru inertnog plina. Isto tako, svaki ventilator i kompresor treba biti opremljen ventilom na usisnoj i tlačnoj strani, a na usisnoj strani može biti predviđen i usisni otvor za usisavanje svježeg zraka iz atmosfere koji služi za propuhivanje teretnih tankova svježim zrakom. Prema propisima, kapaciteti ventilatora i kompresora se mogu kombinirati na način da su u sustav ugrađena dva ventilatora ili kompresora istih karakteristika uz uvjet da svaki ventilator opskrbljuje

cjelokupni sustav sa 100% kapaciteta, što znači da dok jedan ventilator ili kompresor radi drugi je u pričuvi, da postoje dva jednaka ventilatora ili kompresora sa 50% kapaciteta cjelokupnog sustava pri čemu oba rade sa maksimalnim kapacitetom istodobno, te može biti izvedeno i na način da su u sustav ugrađeni glavni i pomoćni ventilator ili kompresor pri čemu jedan ventilator ili kompresor ima maksimalni kapacitet, odnosno 100%, a pomoćni ventilator 50% kapaciteta od nominalnog opterećenja u sustavu. Također, maksimalni tlak inertnog plina kojeg stvara ventilator ili kompresor u teretnom prostoru se mora kretati u granicama od 0,07bar do 0,08bar.

#### **4.3.2. Analizator kisika**

Analizator kisika predstavlja neizostavni dio opreme svakog postrojenja za proizvodnju inertnog plina, budući da se shodno njegovim očitanjima na odgovarajući način podešava odnos goriva i zraka prilikom izgaranja goriva u generatoru kako bi se postigle željene vrijednosti volumnog udjela kisika u inertnom plinu, a istovremeno ima i ulogu zaštite, jer u slučaju većeg volumnog udjela kisika u inertnom plinu od dopuštenog on preusmjerava proizvedeni inertni plin u atmosferu i zatvara dobavu inertnog plina prema palubnoj vodenoj brtvi djelovanjem na aktuator glavnog zapornog ventila dok se ne postigne željena vrijednost kisika. Prema [8], u svrhu kontinuiranog mjerenja volumnog udjela kisika u inertnom plinu postoje tri najčešće metode i to metoda magnetske osjetljivosti, polarografsko mjerenje i mjerenje pomoću ćelije sa nemetalnim oksidom.

Metoda magnetske osjetljivosti predstavlja najstariji način mjerenja navedenoga. Za njezinu upotrebu mora biti ispunjen uvjet da plin koji se želi analizirati mora biti oslobođen vlage i nečistoća. Za razliku od drugih, kod ove metode se javlja i osjetljivost senzora na položaj. Polarografsko mjerenje se zasniva na upotrebi senzora sa elektrokemijskom ćelijom u kojoj se kisik razdvaja kroz propusnu membranu. Prednost nad prethodnom metodom je u tome što rad ovakvog senzora neće poremetiti određena količina nečistoća. Mjerenje pomoću ćelije sa nemetalnim oksidom predstavlja najnoviju metodu koja kao senzor koristi keramičku ćeliju ili ćeliju ispunjenu sa cirkonijem. Međutim, budući da je radna temperatura senzora visoka (oko 850°), a temperatura inertnog plina se prije analizatora kisika smanjuje u rashladniku, ovakav način mjerenja volumnog udjela se uglavnom koristi prilikom kontrole procesa izgaranja u samom generatoru inertnog plina.

Za primjer opisa je uzet senzor kisika integriran u analizator kisika tipa SEN9 tvrtke Hamworthy, a prikazan je na slici 5. Kao što je spomenuto u [2], senzor se sastoji od naponske ćelije ispunjene keramikom sa dvije elektrode. Jedna ćelija je izložena struji

inertnog plina, a druga je izložena okolnoj atmosferi. Istovremeno, kroz strujnu ćeliju senzora usljed napona uzbude senzora cijelo vrijeme protječe električna struja. Pri visokoj temperaturi inertnog plina se odvija difuzija iona kisika dok strujna ćelija ometa njihovo gibanje preko elektroda naponske ćelije usljed čega one detektiraju promjenu napona i pretvaraju ga u strujni signal koji je proporcionalan koncentraciji kisika u inertnom plinu.



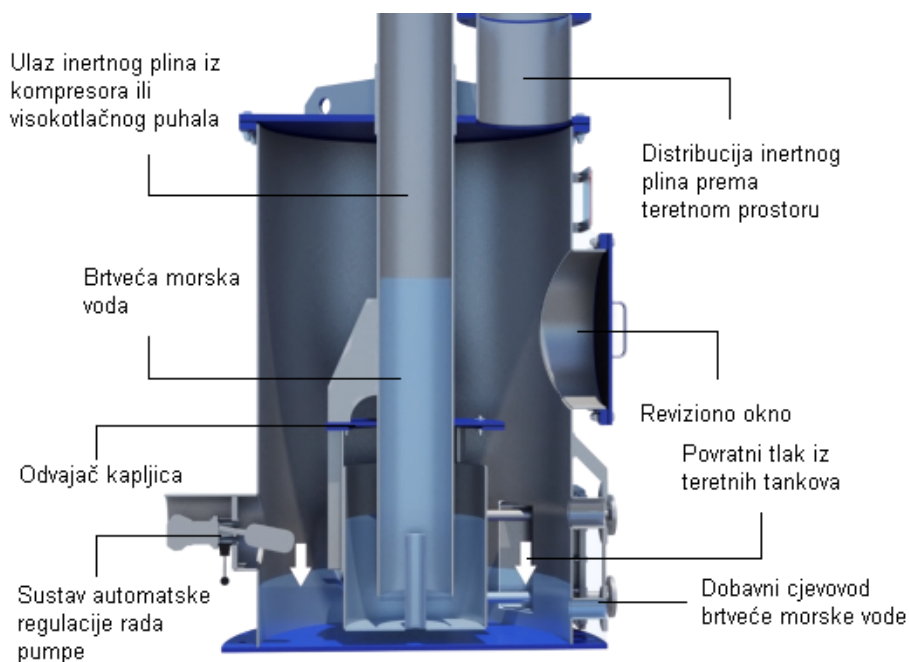
**Slika 5: SEN9 senzor kisika [2]**

#### **4.3.3. Palubna vodena brtva i glavni zaporni ventil**

Prema Hrvatskom registru brodova koji je usuglašen sa zahtjevima SOLAS Konvencije, u svrhu sprječavanja povratka teretnih para u glavni cjevovod inertnog plina na glavnoj palubi u području tereta, u sustav moraju biti ugrađene najmanje dvije nepovratne naprave, od kojih jedna mora biti palubni vodeni nepovratni uređaj (tzv. palubna vodena brtva), a druga nepovratni ventil ili neka druga odgovarajuća naprava postavljena iza nepovratnog uređaja. Njihov zadatak je sprječavanje povratnog tlaka teretnih para i inertnog plina iz teretnih tankova prema postrojenju za proizvodnju inertnog plina, a svrha toga je prvenstveno zaštita od požara i zbog pada tlaka inertnog plina u sustavu u slučaju prestanka rada ventilatora ili kompresora. Palubna vodena brtva se koristi iz razloga što kod običnih nepovratnih ventila uvijek postoji mogućnost manjeg propuštanja para.

Vodene brtve mogu biti u suhoj, polumokroj i mokroj izvedbi. Suha vodena brtva se sastoji od dva spremnika i to gornjeg spremnika u kojemu se skladišti brtveća voda i donjeg spremnika koji predstavlja brtveći prostor, a poprečni presjek kroz istu je prikazan na slici 6. Protokom brtveće vode iz skladišnog u brtveći spremnik i iz brtvećeg spremnika u ispuštanje broda se upravlja pomoću osjetnika razine koji su povezani sa sustavom automatske regulacije i druge upravljačke opreme i koji su obično u izvedbi plovka. Sustav automatske regulacije omogućuje protok brtveće vode iz skladišnog u brtveći spremnik u slučajevima kada je kompresor inertnog plina zaustavljen zbog normalnog rada ili zbog automatskog zaustavljanja aktivacijom sustava zaštite i u slučajevima kada tlak u teretnom prostoru

nadvlada tlak na tlačnoj strani kompresora. Tijekom uvođenja inertnog plina u teretne tankove je brtveći spremnik prazan. Prednost ovakvog tipa brtvljenja je što inertni plin nije u dodiru s vodom, a nedostatak predstavlja smanjenje efikasnosti djelovanja cjelokupnog uređaja zbog mogućnosti kvara automatski upravljivih ventila i osjetnika razine. Može se upotrijebiti na svim sustavima inertnog plina, a osobito na brodovima za prijevoz tekućih tereta koji prevoze terete osjetljive i na vrlo male količine vode. Polumokra vodena brtva se sastoji od odvojene komore koja je pomoću cjevovoda spojena na glavni cjevovod inertnog plina koji je na jednom dijelu manjeg presjeka. Prolaskom inertnog plina kroz suženje se stvara podtlak (tzv. Venturijev efekt) koji izaziva podizanje razine brtveće vode u komori. S prestankom rada kompresora, dolazi do depresije inertnog plina u suženju, zbog čega voda iz komore prelazi u glavni cjevovod inertnog plina, te se razina brtveće vode u cjevovodu ustaljuje u ovisnosti o veličini povratnog tlaka iz teretnih tankova. Na ovaj način se smanjuje znatna količina kapljica brtveće vode koje ulaze u teretni sustav. Mokra vodena brtva predstavlja najjednostavniji tip vodene brtve, a poprečni presjek kroz mokru vodenu brtvu je prikazan na slici 8. Prilikom distribucije inertnog plina kroz dovodni cjevovod brtve u teretni prostor, inertni plin mora savladati vodenu brtvu koju formira neprekidni protok morske vode, čime se jednim dijelom inertni plin podhlađuje i vlaži. Ukoliko tlak iz teretnog prostora nadvlada ulazni tlak inertnog plina, odnosno tlak na tlačnoj strani kompresora, razina brtveće morske vode se podiže u dovodnom cjevovodu brtve, čime se sprječava povratni tlak, a zbog štetnosti vlage prema teretu u inertnom plinu, u sustav je ugrađen i odvajač vodenih kapljica. Ovakav tip vodene brtve se najčešće koristi radi jednostavnosti i pouzdanosti u radu. Međutim, od nedostataka se manifestira mogućnost smrzavanja brtveće vode radi održavanja konstantne razine vode, zbog čega u vodenu brtvu mora biti ugrađen grijač, te tlak kompresora mora biti nešto veći zbog savladavanja otpora brtveće vode i odvajača kapljica.



**Slika 6: Poprečni presjek kroz mokru palubnu vodenu brtvu [12]**

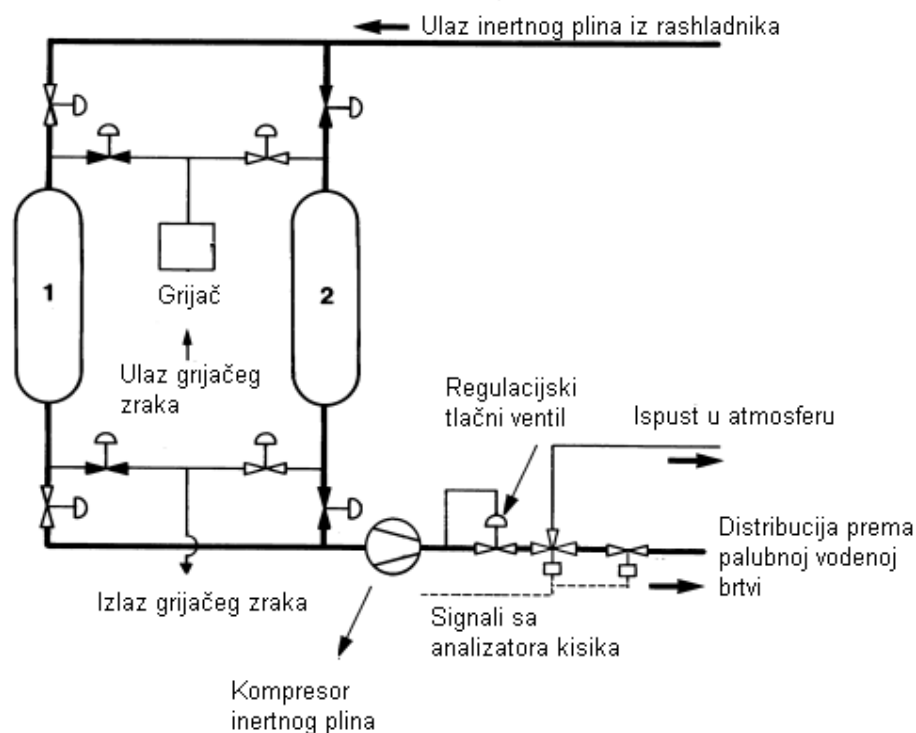
Što se tiče propisa u vezi nepovratnih uređaja, za dobavu vode nepovratnom uređaju se moraju predvidjeti dvije neovisne pumpe pri čemu svaka od njih mora osigurati potrebnu količinu dobave te automatsko uključivanje i punjenje vodom nepovratnog uređaja ako prestane dobava inertnog plina (odnosi se na polusuhe i suhe vodene brtve) i također mora biti opremljen sa revizionim oknom za provjeru razine vode i obavljanje pregleda. Prema [9], revizija osjetnika razine kod suhih i polusuhih vodenih brtvi u svrhu inspekcije se vrši u razmacima od šest mjeseci.

Namjena glavnog zapornog ventila je automatsko zaustavljanje protoka inertnog plina između teretnog prostora i strojarnice broda, odnosno postrojenja za proizvodnju inertnog plina u slučaju pada tlaka na kompresoru inertnog plina, povećanja temperature inertnog plina i povećanja koncentracije kisika. Može biti upravljani preko aktuatora električno, pneumatski ili hidraulički. Revizija njegovih dijelova i provjera u svrhu mogućeg oštećenja se, prema [9] vrši jednom godišnje.

#### **4.3.4. Adsorberi vlage**

Jedinica za sušenje inertnog plina, tzv. adsorberi predstavljaju neizostavan dio postrojenja sa generatorom inertnog plina budući da se od tako dobivenog inertnog plina zahtjeva iznimna čistoća u svrhu inertiranja teretnih prostora brodova za prijevoz tekućih tereta. Adsorberi se sastoje od dvije posude napunjene sa aktivnom aluminom (aluminijevim hidroksidom) i silika – gelom, a shematski prikaz jedne takve jedinice je na slici 7.

Karakteristika oba navedena materijala je veliki adsorpcijski kapacitet koji omogućuje vezivanje dijela vlage iz inertnog plina koji se nije izdvojio u rashladniku inertnog plina, a postupak se još može nazvati i dehidracijom inertnog plina. U cijelu jedinicu je uključen i sustav automatskog upravljanja koji upravlja regeneracijom oba adsorbera i to na način da dok jedna jedinica preuzima vlagu iz inertnog plina, druga se regenerira pomoću vrućeg zraka koji je na temperaturi od 180 °C do 190 °C, što je omogućeno pomoću električnih grijača i puhala koja dobavljaju zrak preko grijača u adsorbere na način da će se pomoću sustava automatskog upravljanja otvoriti dovodni ventili vrućeg zraka u adsorbere, a zatvoriti dovodni i odvodni ventil inertnog plina na onome adsorberu na kojem je potrebna regeneracija u ovisnosti o proteklom vremenu ciklusa koji obično traje oko 6 sati [3].



**Slika 7: Shematski prikaz jedinice za sušenje inertnog plina [1]**

## **5. GENERATORI INERTNOG PLINA**

Generatori inertnog plina predstavljaju jedan od izvora i dio sustava za proizvodnju i distribuciju inertnog plina kojima je na brodovima za prijevoz tekućih tereta glavna namjena sprječavanje nastanka eksplozije i požara stvaranjem i stalnim održavanjem inertne atmosfere u teretnim tankovima.

### **5.1. OPIS POSTROJENJA SA GENERATOROM INERTNOG PLINA**

Proizvodnja inertnog plina započinje ubrizgavanjem lakog Diesel goriva pomoću pumpi pred koje se postavlja uvjet da opskrbljuju postrojenje, odnosno komoru izgaranja gorivom pri konstantnom tlaku (vrijednost tlaka se kreće oko 10bar) [3]. One mogu biti u redundantnoj izvedbi, što znači da se smanjuje mogućnost prekida napajanja generatora gorivom ukoliko jedna od pumpi zakaže, odnosno izvode se na način da jedna od njih cijelo vrijeme u stanju pripravnosti čime upravlja sustav automatske regulacije. Izgaranje se omogućuje i dovođenjem zraka u komoru izgaranja pomoću kompresora zraka na kojemu je ugrađen regulacijski ventil upravljani signalom iz analizatora kisika. U ovisnosti o volumnom udjelu kisika u proizvedenom inertnom plinu, analizator kisika prosljeđuje upravljački signal na aktuator regulacijskog ventila kompresora zraka te u ovisnosti je li sadržaj kisika veći ili manji od dopuštenoga višak zraka iz kompresora ispušta u atmosferu ili se veća količina zraka dobavlja u komoru izgaranja. Volumni udio kisika u proizvedenom inertnom plinu se kreće u rasponu od 0,5% do 1% i mora se održavati u tim granicama, odnosno u granicama većim od minimalne jer bi u slučaju da inertni plin sadrži manji volumni udio kisika od minimalnog, tada bi i količina zraka za izgaranje bila manja, te bi se pospješilo nastajanje ugljičnog monoksida i čađe usljed nepotpunog izgaranja. Prilikom upućivanja generatora inertnog plina je omogućeno njegovo predpaljenje pomoću pilot gorionika na koji se posebnim cjevovodom dovodi određena količina goriva pomoću pumpi i zraka za izgaranje pomoću kompresora.

Komora izgaranja je formirana sa dvostrukom stijenkom između čijih dijelova cirkulira rashladna morska voda koju dobavlja posebna pumpa velikog kapaciteta. Prema [3], u ovisnosti o konstrukciji broda u tu namjenu se može koristiti i balastna pumpa. Nakon izgaranja u komori izgaranja, plinovi izgaranja prolaze kroz fazu ispiranja, odnosno čišćenja i hlađenja preko raspršivača morske vode koja se raspršuje u suprotnom smjeru od smjera kretanja plinova izgaranja (engl. Scrubbing). Na taj način se uklanjaju nečistoće u plinovima

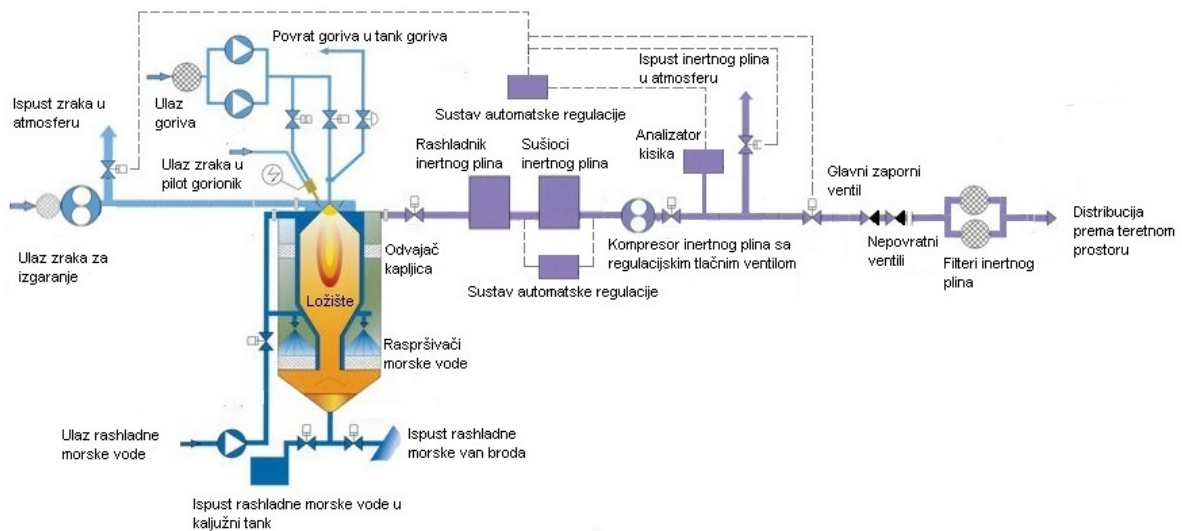


izgaranja nastale prilikom procesa izgaranja, kao što je primjerice čađa i topljivih plinova koji stvaraju kiseline i zaslužni su za koroziju metalnih dijelova generatora inertnog plina (npr. sumporov dioksid). Rashladnu morsku vodu za hlađenje i ispiranje dobavlja ista pumpa koja dobavlja i rashladnu morsku vodu za hlađenje komore izgaranja. Završetkom faze ispiranja se plinovi izgaranja dovode na temperaturu nešto veću od temperature rashladne morske vode (ta razlika iznosi otprilike 3 °C do 5°C). Međutim, zbog njihove visoke temperature prilikom ispiranja se javlja isparavanje morske vode, pa zbog toga ohlađeni plinovi izgaranja ostaju zasićeni vodenom parom i sadrže veliku količinu vodenih kapljica koju je potrebno izdvojiti budući da su one nepoželjne u teretnom prostoru. Veći dio kapljica vodene pare se odvaja u odvajaču kapljica (demisteru), te po izlasku iz njega nastupa faza obrade inertnog plina koja se odvija u dva stupnja izdvajanja cjelokupnog dijela kapljica vodene pare i to u rashladniku i sušiocima inertnog plina (adsorberima).

Prvi stupanj, odnosno stupanj rashlade u osnovi predstavlja najjednostavniji parno – rashladni proces koji se sastoji od kompresora rashladnog fluida, kondenzatora koji je obično hlađen rashladnom morskom vodom, ekspanzijskog ventila i isparivačke komore kroz koju struji dobiveni inertni plin. Budući da se izdvajanje vodene pare intenzivnije odvija pri nižim temperaturama, ona će se kondenzirati na isparivačkim cijevima komore kroz koju struji inertni plin, te se ona izvan broda odvodi posebnim cjevovodom. Po izlasku iz prvog stupnja obrade inertnog plina njegova temperatura iznosi otprilike 4 °C, nakon čega inertni plin ulazi u jedinicu za sušenje inertnog plina (adsorbere) koja se sastoji od dvije posude napunjene sa dehidratorima koji dodatno izdvajaju vlagu iz inertnog plina. Kako bi se omogućilo stabilno izgaranje, odnosno kako bi se omogućio povratni tlak inertnog plina u komoru izgaranja prilikom obrade inertnog plina, u sustavu je ugrađen i regulacijski tlačni ventil između jedinice za obradu inertnog plina i kompresora kojim se održava konstantan tlak u fazi obrade inertnog plina.

Nakon faze obrade se inertni plin dovodi u kompresor inertnog plina koji ga sa laganim pretlakom (otprilike oko 0,3bar) tlači prema teretnom sustavu, a jedan njegov dio se odvodi na analizator kisika kojim se upravlja regulacijskim ventilom na kompresoru zraka za izgaranje, te aktuatorom glavnog zapornog ventila i ventila za preusmjeravanje inertnog plina u atmosferu, odnosno njime se uspoređuju dobivene vrijednosti volumnog udijela kisika u inertnom plinu sa dopuštenim rasponom vrijednosti. Ukoliko je on izvan dopuštenih granica, tada sustav automatskog upravljanja preko upravljačkih signala analizatora kisika i aktuatora na glavnom zapornom ventilu zatvara dobavu inertnog plina prema teretnom prostoru i ispušta inertni plin u atmosferu. Prije uvođenja u teretni prostor su u sustav

ugrađeni nepovratni uređaj, odnosno palubna vodena brtva i dva nepovratna ventila koji sprječavaju povratni protok zapaljivih teretnih para. Također, daljnim prolaskom inertnog plina kroz daljnji cjevovod njihovo konačno pročišćavanje se odvija u filterima smještenima na palubi koji se sastoje od fine mrežice čija je namjena sprječavanje ulaska krutih nečistoća u inertnom plinu u teretni sustav. Navedene krute nečistoće mogu biti hrđa iz unutrašnjosti glavnog cjevovoda, kao i komadići dehidrata iz adsorbera. Filteri su opremljeni i sa diferencijalnim manometrima kojima se indicira prohodnost filtera na osnovu pada tlaka između ulaza i izlaza inertnog plina iz filtera. Na slici 8. je prikazan cjelokupni shematski prikaz generatora inertnog plina sa ostalim dijelovima cjelokupnog postrojenja za proizvodnju.



**Slika 8: Shematski prikaz rada postrojenja sa generatorom inertnog plina [15]**

## 5.2. KONSTRUKCIJSKI DIJELOVI GENERATORA INERTNOG PLINA

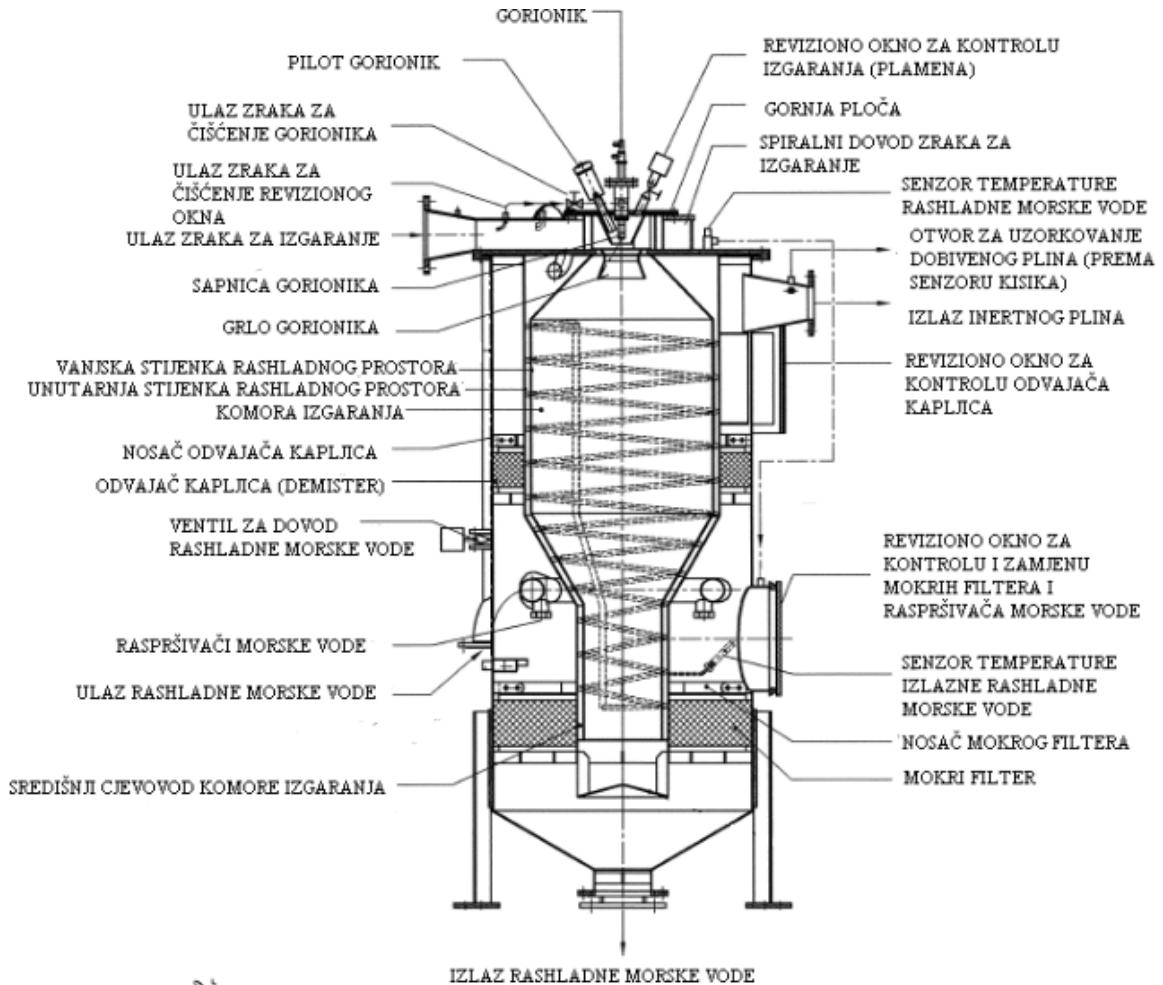
U osnovi generator inertnog plina predstavlja ložište opremljeno sa gorionikom u kojemu se regulacijom izgaranja, odnosno postizanjem stehiometrijskih uvjeta izgaranja stvaraju plinovi izgaranje koji se pomoću određenih dijelova generatora obrađuju, kontroliraju i transportiraju prema teretnom prostoru. Za primjer je uzet generator inertnog plina Moss tvrtke Wärtsilä prikazan na slici 9. Gorivo potrebno za izgaranje se dovodi u gorionik pomoću pumpe s kojom se održava konstantan tlak ubrizganog goriva. Raspršeni mlaz goriva se provodi kroz tangencijalne kanale u gorioniku pomoću kojih se postiže rotacijsko gibanje mlaza goriva, a samim time i bolje miješanje raspršenog goriva i zraka i kvalitetnije izgaranje goriva. Prema [1], izgaranje goriva je omogućeno predpaljenjem

goriva pomoću pilot gorionika koji je zavaren na otvor gornje ploče i kojemu se dio zraka potrebnog za izgaranje dovodi na kućište u svrhu hlađenja. Također je opremljen i sa grijačem (žarnicom) pomoću koje se raspršeno gorivo za predpaljenje pali. Vrijeme predpaljenja navedenog generatora, odnosno vrijeme koje prođe od aktivacije žarnice do opskrbe glavnog gorionika sa Diesel gorivom iznosi oko 35 sekunda. Kod navedenog tipa generatora inertnog plina je omogućeno aksijalno pomicanje mlaznice gorionika kako bi se omogućila adekvatna pozicija ubrizgavanja goriva. Također, brtvljenje plinova izgaranja oko mlaznice gorionika je omogućeno sa brtvenicom, a njihova kontrola preko revizionog okna u koje je ugrađena i fotoelektrična ćelija i pojačalo signala pomoću kojih se posredstvom automatske regulacije vrši djelovanje na smjesu goriva i zraka za izgaranje. Istovremeno i zrak potreban za izgaranje prolazi kroz tangencijalne kanale u gorionik čime se i on dovodi u rotacijsko gibanje suprotno gibanju raspršenog goriva i omogućuje se bolje miješanje sa gorivom za izgaranje, te se tako dobivena smjesa raspršenog goriva i zraka kroz grlo gorionika u kojemu se pospješuje rotacijsko gibanje smjese uvodi u komoru izgaranja. Ona je podijeljena u gornji dio izveden u cilindričnom obliku i donji izveden u obliku krnjeg stošca, te sa dvije stijenke, odnosno vanjskom i unutarnjom formira rashladni prostor kroz koji struji rashladna morska voda pomoću koje se termička naprezanja komore izgaranja usljed visokih temperatura izgaranja goriva u njoj smanjuju.

Plinovi izgaranja napuštaju komoru izgaranja kroz njezin središnji cjevovod, te prolaze kroz mokri filter koji je konstrukcijski izveden sa čeličnom mrežicom i djelomično je potopljen u morsku vodu, te se njime izdvajanje nečistoća (posebice krutih) ostvaruje prolaskom plinova izgaranja kroz morsku vodu. Također, dio rashladne morske vode se preko raspršivača uvodi u plinove izgaranja i to u suprotnom smjeru od smjera strujanja plinova izgaranja, čime se oni čiste i hlade. Nakon navedenog postupka, plinovi izgaranja prolaze kroz odvajač kapljica (demister) prije nego što napuste generator inertnog plina. Čelični odvajač kapljica je dimenzioniran na način da efektivno spriječi odnošenje bilo kakvih kapljica vode skupa sa proizvedenim plinovima izgaranja, odnosno inertnim plinom. Na istoj visini u odnosu na raspršivače je ugrađeno i reviziono okno pomoću kojega se može pratiti stanje mokrih filtera i raspršivača morske vode, kao i izvršiti zamjena u slučaju potrebe.

Prilikom revizije i održavanja samog generatora inertnog plina je, prema [9] potrebno izvršiti provjeru javlja li se proces korodiranja ili oštećenja stijenki komore izgaranja, raspršivača morske vode, oštećenja osjetnika temperature, razine morske vode i odvajača kapljica. Revizija cjelokupnog generatora inertnog plina se vrši za vrijeme boravka broda u

suhome doku, dok se pojedine komponente periodično provjeravaju i to na način da se ispravnost osjetnika temperature i razine morske vode vrši svakih šest mjeseci, dok se čišćenje odvajачa kapljica obavlja u vremenskim razmacima od tri mjeseca, što ovisi o još i o preporukama proizvođača.



**Slika 9: Poprečni presjek Moss generatora inertnog plina [2]**

### 5.3. INERTIRANJE TERETNIH PROSTORA PRIJE UKRCAJA TERETA

Kao što je slučaj i sa iskrcajem tereta, prije ukrcaja tereta se inertiranje teretnih tankova, opreme za manipulaciju teretom i cjevovoda vrši primarno u svrhu ostvarivanje nezapaljive i neeksplozivne atmosfere tijekom, naročito nakon što je tank prethodno bio degaziran, prilikom čega se uvodi svjež zrak u tank odstranjivajući zapaljive pare i inertni plin i povećavajući sadržaja kisika do 21% volumena u svrhu mogućnosti ulaska u tank. Prema [6], postoje dvije moguće radnje koje se mogu koristiti prilikom inertiranja teretnih prostora i ostale opreme, a to su istiskivanje ili raslojavanje i razrjeđivanje ili miješanje.

Inertiranje pomoću istiskivanja se zasniva na zasićenju atmosfere teretnog tanka inertnim plinom na osnovu razlike u gustoćama plinova (para) koji ulaze u tank i koji se već nalaze u tanku. Inertni plin se u teretni tank dovodi s određenim pretlakom i po mogućnosti što manjom brzinom kako bi se umanjio utjecaj turbulencija, a budući da je manje gustoće od para tereta, ima tendenciju zadržavanja pri vrhu tanka, dok istovremeno istiskuje prisutne pare tereta prema dnu tanka. U praksi se ovakav način inertiranja teško ostvaruje, budući da su razlike u gustoćama inertnog plina i para tereta vrlo male, pa se on koristi u kombinaciji sa razrjeđivanjem. Kod navedenog načina inertiranja se inertni plin miješa sa parama tereta, odnosno dovodi se pod većom brzinom u teretni tank, čime se ostvaruje turbulencija u tanku. Također, razrjeđivanje se može ostvariti na tri načina, a to su razrjeđivanje sa ponavljajućim stlačivanjem, razrjeđivanje sa ponavljajućim vakuumom i konstantno razrjeđivanje, od kojih se prve dvije najviše upotrebljavaju.

Razrjeđivanje sa ponavljajućim stlačivanjem podrazumijeva upotrebu teretnog kompresora za komprimiranje inertnog plina u teretni tank, pri čemu se ostatak plinova sa dna tanka pod utjecajem tlaka inertnog plina ispušta u atmosferu i svaka ponovna procedura dovodi atmosferu tanka na koncentraciju inertnog plina. Budući da se teretni tankovi mogu podvrgnuti određenom vakuumu, može se ostvariti i razrjeđivanje sa ponavljajućim vakuumom. Na ovaj način se pomoću teretnog kompresora stvara podtlak u teretnom tanku, a zatim se inertni plin pod utjecajem podtlaka, odnosno razlike tlakova uvodi u teretni tank. Ova metoda razrjeđivanja predstavlja najekonomičniju budući da se koristi minimalna količina inertnog plina za željenu razinu inertiranja, ali je s obzirom na metodu stlačivanja ova metoda dosta dugotrajnija budući da se u slučaju stvaranja određenog podtlaka u teretnom tanku pomoću kompresora njegov volumen dobave smanjuje.

#### **5.4. ALARMI U SUSTAVU GENERATORA INERTNOG PLINA**

Dojava abnormalnosti u slučaju grešaka omogućava članovima posade strojarnice dijagnosticiranje trenutnog stanja sustava i poduzimanje adekvatnih mjera kako bi se spriječili kvarovi i ugrožavajuće situacije, zbog čega alarmni sustav predstavlja neizostavni dio navedenog postrojenja kao i svakog drugog strojnog sustava na brodu. Prema Hrvatskom registru brodova, za sve generatore inertnog plina se moraju predvidjeti zvučni i svjetlosni znakovi upozorenja za sljedeće: niski tlak rashladne vode ili malu brzinu protoka rashladne vode u raspršivačima morske vode, odnosno u pročišćivaču inertnog plina, visoku temperaturu proizvedenog inertnog plina, visoku razinu rashladne morske vode u

pročišćivaču inertnog plina, visoki volumni udio kisika u inertnu plinu, neispravnosti u napajanju energijom aktuatora glavnog zapornog ventila, nisku razinu vode u palubnoj vodenoj brtvi, nizak tlak inertnog plina u glavnom cjevovodu, neispravnost visokotlačnog puhala ili kompresora inertnog plina, te visoki tlak inertnog plina. Aktivacijom navedenih alarma se posredstvom sustava automatske regulacije odvija preusmjeravanje inertnog plina u atmosferu, odnosno prestanak dobave inertnog plina prema teretnom prostoru ili cjelokupno zaustavljanje postrojenja dok posada strojarnice ne otkloni kvar. Uz spomenute, u postrojenje mogu biti ugrađeni i alarmi za visoku temperaturu izlazne rashladne morske vode, nizak tlak goriva u gorionicima, nisku razinu rashladne morske vode u košuljici generatora inertnog plina i nisko opterećenje kompresora inertnog plina, pri čemu se također oglašava alarm i posredstvom automatske regulacije se zaustavlja rad postrojenja. Znakovi upozorenja za navedeno se moraju davati u prostoriji strojeva kao i upravljačkoj stanici tereta (ukoliko ona postoji), ali u svakom slučaju na mjestu na kojem odgovorna osoba može brzo primiti upozorenje. [4]

## 6. ZAKLJUČAK

Uz napredovanje brodograđevne industrije tijekom ovog stoljeća, svjetska flota teretnih brodova se povećava, a posebice brodova za prijevoz tekućih tereta. Samim time, raste i broj potencijalnih rizika od nesreća na moru koji ne moraju uvijek biti uzrokovane ljudskim faktorom, nego se to djelomično može očitovati u problemu sa opremom. Za nekolicinu navedenih brodova je prošlo stoljeće bilo fatalno iz razloga što se nije poznao sustav inertnog plina, a čije bi postojanje sigurno spriječilo nastanak nesreće. Uz svu opremu koju današnja posada stroja ima, uključujući i sustave inertiranja teretnih tankova koji predstavljaju neizostavnu cjelinu na svim brodovima za prijevoz tekućih tereta, pored znanja o njihovoj funkcionalnosti i ispravnom radu je potrebno vršiti i redovitu kontrolu radnih parametara nad njima, odnosno od posade se očekuje njihovo redovito održavanje, što bi podrazumijevalo praćenje degradacije sustava i reagiranje na bilo kakve abnormalnosti, jer u koliko se o tome vodi briga, sustav može besprijekorno funkcionirati i koristeći se stečenim znanjem kroz iskustvo ili bilo kakav drugi oblik i uz pruženu tehnologiju posada može otkloniti problem ukoliko postoji i poboljšati već postojeći sustav.

## LITERATURA

- [1] Witherby and Co., Ltd.: *Liquefied Gas Handling Principles On Ships and in Terminals*, Third Edition, Bermuda, 2000.
- [2] Samsung Heavy Industries Co., Ltd. – *Instruction Manual for MOSS Inert Gas System for Gas Carrier*, Norway, 2012.
- [3] dr.sc. Lalić, B.: *Autorizirana predavanja iz kolegija Brodski strojni sustavi*, Sveučilište u Splitu, Pomorski fakultet u Splitu, 2019.
- [4] Hrvatski registar brodova: *Popis pravila Hrvatskog registra brodova*, Split, 2005.
- [5] Kurtela, Ž.: *Osnove brodstrojarstva*, Sveučilište u Dubrovniku, 2000.
- [6] International Maritime Organization: *Inert Gas Systems*, London, 1990.
- [7] izv. prof. dr.sc. Komar, I.: *Autorizirana predavanja iz kolegija Priprema i upravljanje postrojenjem*, Sveučilište u Splitu, Pomorski fakultet u Splitu, 2020.
- [8] National Research Council (U.S.): *Material Aspects of Inert Gas Systems for Cargo Tank Atmosphere Control*, National Academy of Sciences Washington, D.C., 1980.
- [9] Netherlands Regulatory Framework (NeRF) – Maritime: *Revised Guidelines for Inert Gas System*, Netherlands, 1983.
- [10] Nepoznato: <https://study.com/academy/lesson/inert-gas-definition-types-examples.html> (pristupljeno 25.04.2020.)
- [11] Nepoznato: <https://cultofsea.com/tanker/inert-gas/> (pristupljeno 28.04.2020.)
- [12] Nepoznato: <https://www.alfalaval.com/products/process-solutions/safety-solutions/inert-gas-system/smit-gas-combustion/> (pristupljeno 06.05.2020.)
- [13] Nepoznato: <https://www.psitechnologies.com/portfolio/nitrogen-generation/> (pristupljeno 17.05.2020.)
- [14] Nepoznato: <http://www.machineryspaces.com/fire-fighting-inert-gas-system.html> (pristupljeno 18.05.2020.)
- [15] Nepoznato: <https://www.ravebo.nl/marine-a-offshore/kangrim6/inert-gas-system> (pristupljeno 11.06.2020.)



## POPIS SLIKA

Slika 1: Prikaz dijagrama eksplozivnosti [5].....	4
Slika 2: Faze nastanka zapaljive koncentracije u teretnom tanku [5].....	5
Slika 3: Postrojenje za proizvodnju inertnog plina uporabom plinova izgaranja [14] .....	12
Slika 4: Shematski prikaz rada generatora dušika [13] .....	13
Slika 5: SEN9 senzor kisika [2].....	15
Slika 6: Poprečni presjek kroz mokru palubnu vodenu brtvu [12].....	17
Slika 7: Shematski prikaz jedinice za sušenje inertnog plina [1] .....	18
Slika 8: Shematski prikaz rada postrojenja sa generatorom inertnog plina [15] .....	21
Slika 9: Poprečni presjek Moss generatora inertnog plina [2].....	23

## **POPIS TABLICA**

Tablica 1: Sastav inertnog plina u ovisnosti o proizvodnom postrojenju [3, 11] ..... 9

## POPIS KRATICA

LEL (engl. <i>Lower Explosive Limit</i> )	donja granica eksplozivnosti
UEL (engl. <i>Upper Explosive Limit</i> )	gornja granica eksplozivnosti
SOLAS (engl. <i>International Convention of Safety Of Life At Sea</i> )	Međunarodna konvencija o zaštiti ljudskih života na moru
LPG (engl. <i>Liquefied Petroleum Gas</i> )	ukapljeni naftni plin
LNG (engl. <i>Liquefied Natural Gas</i> )	ukapljeni prirodni plin