

Načini iskorištavanja isparenog plina na LNG brodovima

Vrsaljko, Karlo

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:187:257024>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-06-29**



Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet
University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies

Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies - FMSRI Repository](#)



**SVEUČILIŠTE U RIJECI
POMORSKI FAKULTET**

KARLO VRSALJKO

**NAČINI ISKORIŠTAVANJA ISPARENOSTI PLINA NA LNG
BRODOVIMA**

ZAVRŠNI RAD

Rijeka, 2022.

SVEUČILIŠTE U RIJECI
POMORSKI FAKULTET

NAČINI ISKORIŠTAVANJA ISPARENOG PLINA NA LNG
BRODOVIMA
BOIL OFF EXPLOITATION ON LNG SHIPS

ZAVRŠNI RAD

Kolegij: Tehnologija prijevoza tekućih tereta

Mentor: prof. dr. sc. Igor Rudan

Komentor: dr.sc. Matthew Sumner

Student/studentica: Karlo Vrsaljko

Studijski program: Nautika i tehnologija pomorskog prometa

JMBAG: 0112079193

Rijeka, 05/2022.

Student: Karlo Vrsaljko

Studijski program: Nautika i tehnologija pomorskog prometa

JMBAG: 0112079193

IZJAVA O SAMOSTALNOJ IZRADI ZAVRŠNOG RADA

Kojom izjavljujem da sam završni rad s naslovom „Načini iskorištavanja isparenog plina na LNG brodovima“

izradio samostalno pod mentorstvom prof. dr. sc. Igor Rudan te komentorstvom dr.sc. Matthew Sumner stručnjaka/stručnjakinje iz tvrtke Höegh LNG .

U radu sam primijenio metodologiju izrade stručnog/znanstvenog rada i koristio literaturu koja je navedena na kraju završnog rada. Tuđe spoznaje, stavove, zaključke, teorije i zakonitosti koje sam izravno ili parafrazirajući naveo u završnom radu na uobičajen, standardan način citirao sam i povezao s fusnotama i korištenim bibliografskim jedinicama, te nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Rad je pisan u duhu hrvatskoga jezika.

Student

karlo vrsaljko

Karlo Vrsaljko

Student: Karlo Vrsaljko

Studijski program: Nautika i tehnologija pomorskog prometa

JMBAG: 0112079193

IZJAVA STUDENTA – AUTORA
O JAVNOJ OBJAVI OBRANJENOG ZAVRŠNOG RADA

Izjavljujem da kao student – autor završnog rada dozvoljavam Pomorskom fakultetu Sveučilišta u Rijeci da ga trajno javno objavi i besplatno učini dostupnim javnosti u cjelovitom tekstu u mrežnom digitalnom repozitoriju Pomorskog fakulteta.

U svrhu podržavanja otvorenog pristupa završnim radovima trajno objavljenim u javno dostupnom digitalnom repozitoriju Pomorskog fakulteta, ovom izjavom dajem neisključivo imovinsko pravo iskorištavanja bez sadržajnog, vremenskog i prostornog ograničenja mog završnog rada kao autorskog djela pod uvjetima *Creative Commons* licencije CC BY Imenovanje, prema opisu dostupnom na <http://creativecommons.org/licenses/>

Student - autor

karlo vrsaljko

SAŽETAK

Predmet ovog rada su načini na koje se iskorištava ispareni dio tereta na LNG brodovima. Rad se sastoji od 7 poglavlja u kojima su opisane karakteristike samog prirodnog plina, nastanak isparavanja tereta te načini na koje se ispareni teret može iskoristiti ovisno o brodskim postrojenjima. U prvom poglavlju "Uvod" objašnjena je tema rada. Drugo i treće poglavlje pod nazivima "Prirodni plin", i "Ispareni plin" opisuje karakteristike prirodnog plina, te razloge nastanka isparavanja plina kod različitih manipulacija s teretom. U četvrtom poglavlju "Korištenje isparenog plina za pogon strojeva" opisani su strojevi koje koriste ispareni plin za pogon. U petom poglavlju "Sustav ukapljivanja isparenog plina na LNG brodovima" opisan je sustav reukapljivanja s podacima iz broskog manuala. Šesto poglavlje "Spaljivanje i ispuštanje isparenog tereta u atmosferu" opisuje načine rada spaljivača tereta i načine ispuštanja plina u atmosferu. Sedmo poglavlje je zaključak.

Ključne riječi : Ispareni plin, prirodni plin, spaljivač tereta, strojevi, ukapljivanje.

SUMMARY

The subject of this labour is using boil off on LNG ships. The labour is structured in 8 chapters which describe characteristics of natural gas, gas formation and methods which are using depending of ships facilities. In first chapter "Introduction" topic of the labour is explained. Second and third chapter "Natural Gas" and "Boil off gas" describe characteristics of natural gas and reasons of the evaporation during various cargo handling. In fourth chapter "Using boil off gas for main engines" are described different types of engines used on LNG ships. Fifth chapter "reliquefaction system on LNG ships" describes reliquefaction system from cargo operating manual. Sixth chapter " Burning and releasing boil off in atmosphere " describes work of gas combustion unit and ways of releasing gas into the atmosphere. Chapter seven is the conclusion.

Keywords: Boil off, natural gas, gas combustion unit, engines, reliquefaction.

SADRŽAJ

SAŽETAK.....	I
SUMMARY	I
SADRŽAJ.....	II
1.UVOD	1
2. PRIRODNI PLIN.....	2
2.1 KARAKTERISTIKE METANA	2
2.2. ZAPALJIVOST METANA	3
2.3. PRIJEVOZ PRIRODNOG UKAPLJENOG PLINA MOREM	4
3. ISPARAVANJE TERETA (eng. BOIL OFF)	6
3.1 KOLIČINA ISPARAVANJA U ODNOSU NA VRSTU TANKOVA.....	7
3.2. PLOVIDBA U BALASTU.....	8
3.3. UKRCAJ TERETA	10
3.4. PLOVIDBA POD TERETOM.....	10
3.5. ISKRCAJ TERETA	11
4. KORIŠTENJE ISPARENOSTI PLINA ZA POGON STROJEVA	12
4.1. PARNA TURBINA.....	15
4.2. DIZEL ELEKTRIČNI PORIVNI STROJ POGONJEN DVOSTRUKIM GORIVOM	16
4.3. VISOKOTLAČNI SPOROHODNI MOTOR S DVOSTRUKIM GORIVOM	17
(eng. ME-GI)	17
4.4. NISKOTLAČNI SPOROHODNI MOTOR S DVOSTRUKIM GORIVOM (eng. XD-F)...	18
4.5. USPOREDBA VISOKOTLAČNOG I NISKOTLAČNOG MOTORA S DVOSTRUKIM GORIVOM.....	19
4.6. PREDNOSTI I NEDOSTACI UPOTREBE PRIRODNOG PLINA ZA POGON STROJEVA	20
5. SUSTAV UKAPLJIVANJA ISPARENOSTI PLINA NA LNG BRODOVIMA	21
5.1 KRUG ISPARENOSTI PLINA	22

5.2. KRUG RASHLADNOG DUŠIKA	23
5.2.1 Opis sustava rashladnog dušika.....	25
5.3. TOK ISPARENOG PLINA	27
5.3.1 Mod pripravnosti	28
5.3.2 Normalno ukapljivanje	29
5.3.3 Rad sustava u slučaju velike količine isparenog plina	29
5.3.4 Mod niskog protoka isparenog plina	29
5.3.5 Djelomično ukapljivanje	29
6. SPALJIVANJE I ISPUŠTANJE ISPARENOG TERETA U ATMOSFERU	30
6.1. SPALJIVAČ TERETA (eng. GCU	30
6.2. ISPUŠTANJE ISPARENOG PLINA U ATMOSFERU	32
7. ZAKLJUČAK	33
LITERATURA.....	34
POPIS TABLICA	36
POPIS SLIKA	37
POPIS SHEMA.....	38

1.UVOD

Zbog svoje visoke ogrjevne moći metan je često korišten plin u industriji. Prema svjetskim istraživanjima potrošnja energije prirodnog plina će se u sljedećih 40-tak godina porasti toliko da će postati najvažniji energent. Potrošnja prirodnog plina narasla je dosta zbog prednosti prirodnog plina u odnosu na druge oblike energije. Prirodni plin je uz ugljen, jedini oblik energije koji se izravno koristi bez da se mora pretvarati u druge oblike energije koja znače dodatna ulaganja i energetske gubitke. Zbog svega toga brodovi za prijevoz prirodnog plina svake godine su sve brojniji. Svake godine broj naručenih LNG (*liquified natural gas*) brodova raste, a u 2020.-oj godini naručeno je čak 200 novih brodova. Bitna prednost metana je to da pri gorenju ne ispušta čađu ni dim, a to znači da na brodove ne treba ugrađivati pročišćivače ispušnih plinova (*scrubber*) koji su obvezni od 1. siječnja 2020. ako brodovi koriste gorivo koje ima više od 0.5% sumpora. [15]

Prilikom prijevoza LNG se stalno pokušava vratiti u plinovito (prirodno) stanje, zbog toga ispareni plin bi najbolje bilo iskoristiti, umjesto da se ispušta u atmosferu što uzrokuje mnoge opasnosti za ozon jer se u atmosferi može zadržati i do 12 godina, a pritom je 72 puta jači staklenički plin od CO₂ (period od 20 godina). Kako bi smanjili oštećenja ozona, ispareni plin bi najbolje bilo iskoristiti za poriv strojeva ili ga ponovo pretvoriti u tekuće stanje. Brodarske kompanije orijentiraju se za dugoročno smanjenje ulaganja, zato se sve više kompanija okreće korištenju prirodnog plina kao goriva za pogon strojeva, te razvijanju što efikasnijih i isplativijih brodskih postrojenja koja bi koristila LNG. Prirodni plin kao pogonsko gorivo je još u fazi razvoja zbog toga što je teško dosegnuti razinu iskoristivosti kakvu imaju strojevi koji koriste teško gorivo. Upotreba prirodnog plina zahtjeva visoka ulaganja pogotovo na postojeće brodove, stoga se smatra da će većina brodova koja će ga koristiti biti novogradnje. Dok sustav za reukapljivanje bar za sada nema veliki broj brodova zbog kompleksnosti samog sustava te visoke cijene koja svakom godinom pada zbog razvoja tehnologije, svakako u budućnosti se može očekivat sve više takvih sustava na brodovima.

2. PRIRODNI PLIN

Prirodni plin nastao je taloženjem ostataka biljaka i bakterija, koje su se taložile milijunima godina te zbog pomicanja zemljine kore bio masa je dospijevala na sve veće dubine gdje se raspadala zbog velike temperature i tlaka, prirodni plin se sastoji se od više plinova, zbog toga se naziva i smjesom plinova. Različiti postotak plinova ovisi o geografskom području crpljenja plina te termodinamičkim uvjetima nastanka, plin koji krcamo u Omanu ima oko 85.50% metana dok plin sa područja Trinidada ima oko 96.1% metana. Različiti postotci plinova ovise o različitom dnevnom isparavanju, različitoj gustoći te različitoj temperaturi ukapljivanja, zbog toga je jako bitno poznavati sastav plina koji se prevozi. [2,4]

Tablica 1. Sastav prirodnog plina [1]

Sastav %	LNG-lagani	LNG-srednji	LNG-teški
Metan	98	92	87
Etan	1.40	6.00	9.50
Propan	0.40	1.00	2.50
Butan	0.10	0.00	0.50
Dušik	0.10	1.00	0.50
Gustoća %	427.74	445.69	464.83

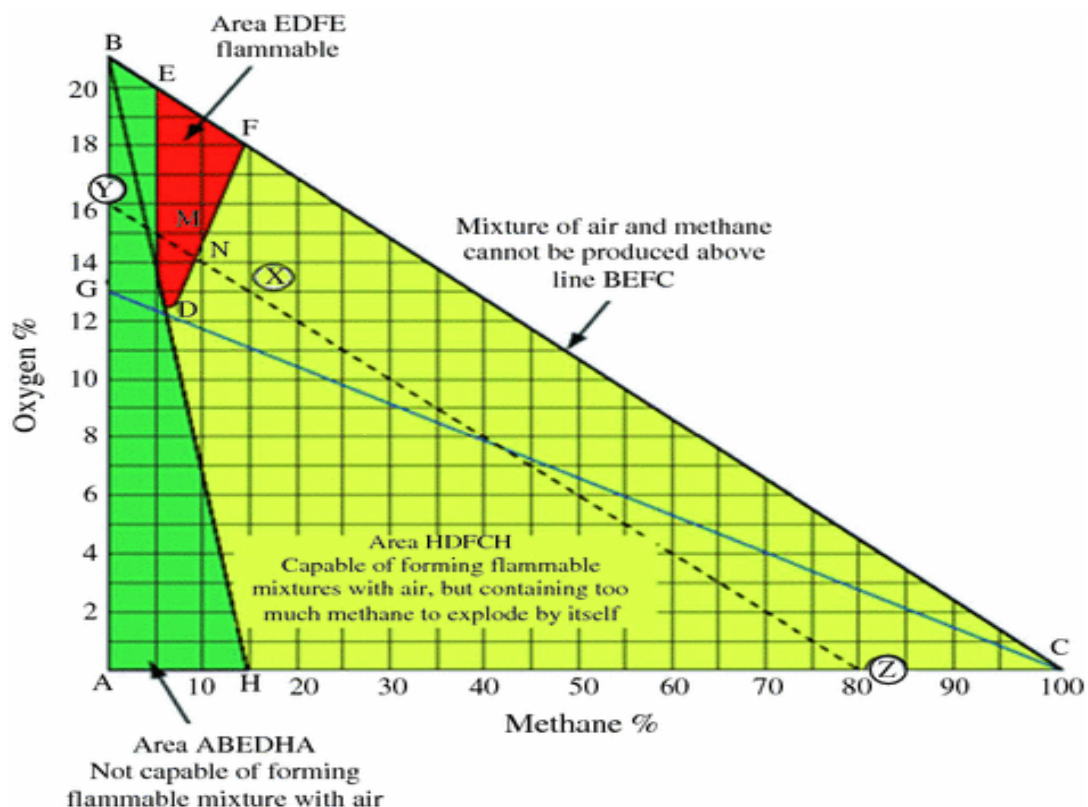
2.1 KARAKTERISTIKE METANA

Prirodni plin se najviše sastoji od metana koji je zasićen ugljikovodik. Zasićeni ugljikovodici su zapaljivi plinovi koji izazivaju gorenje ako su povezani sa zrakom ili kisikom, te pritom proizvode ugljični dioksid i vodenu paru. Navedene supstance u normalnim uvjetima ne predstavljaju opasnost za konstrukcijske materijale prijevoznih sredstava, međutim ukoliko postoji dovoljna količina vlage, zasićeni ugljikovodici mogu formirati hidrate. Metan je bezbojni plin te se jako teško otapa u vodi, sastoji se od jednog atoma ugljika i četiri atoma vodika (CH_4). U prirodi se nalazi u plinovitom stanju, gustoća mu je 0.657 kg/m^3 , te je lakši od zraka pri temperaturama većim od -110°C . Temperatura na kojoj se metan može zapaliti bez vanjskog izvora zapaljenja (temperatura samozapaljenja) je 585°C . Temperatura pri kojoj nije moguće ukapljiti metan bez obzira na tlak (kritična temperatura) iznosi -82.5°C . Vrijednost kritičnog tlaka je 44.7 bara (tlak potreban da bi plin

prešao u tekuće stanje pri vrijednostima kritične temperature). Točka vrelišta je -161.5°C (temperatura na kojoj plin prelazi u tekuće stanje pri tlaku manjem od kritičnog), na toj temperaturi počinje i isparavanje plina. [3]

2.2. ZAPALJIVOST METANA

Tri uvjeta moraju biti zadovoljena kako bi došlo do zapaljenja, a to su goriva tvar, toplina i kisik. Odnos između gorive tvari i kisika za svaki plin je različit. Temperatura zapaljenja (je najniža temperatura na kojoj para tekućine stvara zapaljivu smjesu sa zrakom) metana iznosi -175°C . Pošto se metan (kao najzastupljeniji plin u smjesi LNG-a), prevozi na temperaturama višim od temperature zapaljenja u teoriji to bi značilo da može doći do zapaljenja plina u tankovima, ali u praksi to nije moguće jer su tankovi uvijek ispunjeni isparenim plinom te ne postoji doticaj zraka i plina.



Slika 1. Zapaljivost metana [9]

Donja granica zapaljivosti označava minimalnu koncentraciju zapaljivog plina koja podržava gorenje, kod metana ona iznosi od 5.0%-5.3% , ispod ove koncentracije plina gorenje nije moguće jer je smjesa plinova presiromašna metanom. Gornja granica

zapaljivosti označava najveću koncentraciju zapaljivog plina koje podržavaju gorenje, kod metana ona iznosi od 14% do 15%, iznad te koncentracije gorenje nije moguće jer je smjesa zapaljivog plina i zraka prebogata zapaljivim plinom. Slika 1. prikazuje graf zapaljivost metana u odnosu na postotak metana i kisika.

Zelenom bojom označeno je područje u kojem gorenje nije moguće zbog male koncentracije kisika ispod 12.5% , odnosno male koncentracije metana ispod 5%. Žutom bojom označeno je područje u kojem koncentracija metana prelazi gornju granicu zapaljivosti (15%) te je smjesa previše zasićena metanom i gorenje nije moguće. Dok je u jednom dijelu slike prikazana koncentracija metana manja od gornje granice zapaljivosti, ali postotak kisika je manji od 12.5% pa nije moguće gorenje zbog manjka kisika. Crvenom bojom označeno je područje zapaljivosti, koje se javlja iznad 12.5% kisika, te se pritom raspon metana mora nalaziti unutar gornje i donje granice zapaljivosti (5%-15%).

2.3. PRIJEVOZ PRIRODNOG UKAPLJENOG PLINA MOREM

Prirodno stanje plina je u plinovitom stanju, kad bi se na takav način prevozio brodovima to ne bi bilo isplativo ni brodarima ni naručiteljima. Zbog toga plin se ukapljuje, odnosno pretvara se iz plinovitog stanja u tekuće stanje, to se može izvesti na dva načina, hlađenjem na -162°C ili tlačanjem na 350 bara tlaka. Puno je isplativije hladiti teret i proizvoditi takvu vrstu tankova nego ga tlačiti jer bi tada debljina samog tanka bila jako velika, a to znači da bi masa tankova bila velika. Problem se javlja zbog toga što bi većina ukupne nosivosti otišla na posrednu nosivost (nosivost koja ne donosi brodu zaradu), a samo mali dio ukupne nosivosti bi ostao za korisnu nosivost (teret). Gustoća ukapljenog prirodnog plina je od 420 do 500 kg/m^3 . Cilj ukapljivanja plina je ta da mu se smanji volumen te da se veća količina tereta može prevesti za jednaki volumen tankova. Prirodnom plinu se prilikom hlađenja na -162°C volumen smanji za približno 600 puta. Temperatura ukapljivanja ovisi o sastavu plina. Veći postotak propana, butana i etana unutar LNG-a plin će se ukapljiti na višoj temperaturi jer se etan ukapljuje na -89°C , propan na -42°C i butan na samo -1°C . Porastom dušika u LNG-u plinu se snižava temperatura ukapljivanja jer se dušik ukapljuje na -196°C . Ukapljivanje plina izvodi se na obalnim postrojenjima te se u tekućem stanju šalje obalnim pumpama prema brodu. Zadatak posade broda je zadržati što više plina u tekućem stanju odnosno isparavanje plina smanjiti na minimum. Bitno je naglasiti temperatura ključanja LNG-a raste sa porastom tlaka. To nam govori da ako prevozimo teret

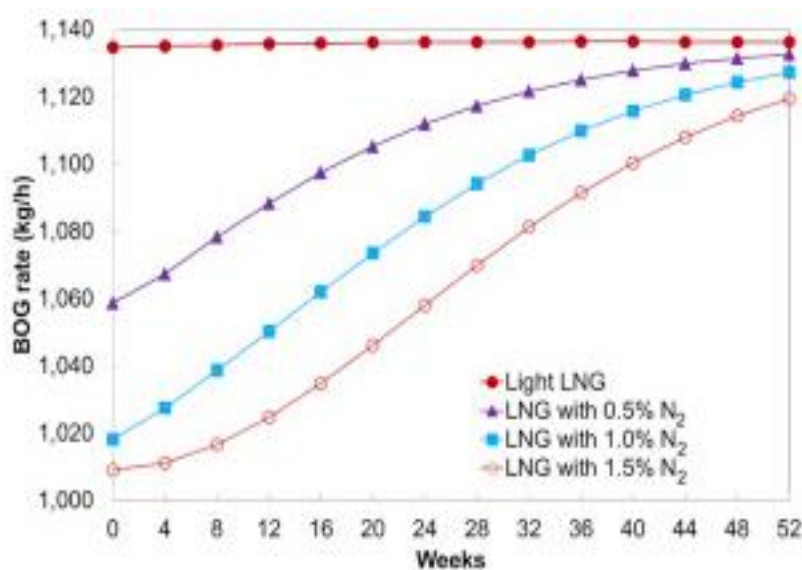
u tankovima pod nešto povišenim tlakom, temperatura tereta će porasti, a samim time i količina isparavanja. Sukladno tome, ukoliko prevozimo ili skladištimo ukapljeni prirodni plin pod nižim tlakom, teretu će pasti temperatura ključanja, te će se smanjiti rata isparavanja tereta. Stoga se preporuča skladištiti teret na tlakovima što bližim atmosferskom tlaku, kako ne bi došlo do nekontroliranog isparavanja ili neželjenog gubitka tereta. Tako pothlađen plin se prevozi morem u različitim vrstama tankova koje dijelimo na neovisne tankove tipa A, B i membranske tankove koji se najčešće koriste za prijevoz LNG-a morem. Sve vrste tankova moraju imati sljedeća obilježja:

- biti nepropustan kako ne bi došlo do miješanja plina sa zrakom ili ispuštanja plina izvan tanka;
- biti dobro izoliran kako bi se u što većoj mjeri spriječilo zagrijavanje tereta ili hlađenje trupa broda;
- biti dovoljno čvrst da izdrži „hidrostatski“ tlak ukapljenog prirodnog plina i mali predtlak koji se može javiti prilikom ukrcaja odnosno iskrcaja;
- biti dovoljno čvrst da u slučaju nagiba broda izdrži udaranje fluida na stjenke tanka (eng. Sloshing effect) gdje dolazi do povećanja tlaka;
- biti dovoljno čvrst da izdrži sudare s drugim brodovima te naprezanja brodske konstrukcije (membranski tankovi). [3,4]

3. ISPARAVANJE TERETA (eng. BOIL OFF)

Svaka tvar se želi vratiti u svoje prirodno stanje ako se ne nalazi u njemu. Za prijevoz prirodnog plina brodom, plin se pretvara u tekuće stanje (hlađenjem na -162°C) da bi mu se smanjio volumen. LNG se pokušava vratiti u plinovito stanje zbog toga što nije moguće cijelo vrijeme održavati toliko nisku temperaturu u tanku, te zbog toga što se ne nalazi u svom prirodnom stanju. Iz tog razloga na površini tekućeg plina pri vrhu tanka gdje se nalazi najtopliji sloj tereta molekule napuštaju tekućinu i postaju pare plina, taj ispareni dio tereta se naziva *boil off*. Razlikujemo dvije vrste *boil off*-a, prirodni (*natural*) koji nastaje zbog razlike temperature u tanku i izvan tanka i *forced boil off* kojeg sami proizvodimo grijanjem tereta ako nam je potreban dodatan plin za sprječavanje vakuma u tanku. Zbog isparavanja tereta nastaje tlak u tanku koji se naziva tlak zasićene pare, svaki teret ima svoj tlak zasićene pare na određenoj temperaturi, zbog različitosti u sastavu plina. Kako tlak ne bi prešao granične vrijednosti ispareni plin se mora izbaciti iz tanka. Ispareni plin može se iskoristiti za pogon strojeva, može se ispustiti u atmosferu ili ga se može ponovno pretvoriti u tekućinu i vratiti u tank. Uzroci povećanog isparavanja mogu biti:

- loša izolacija tanka;
- pomicanje tereta zbog valjanja broda (*sloshing of cargo*) gdje dolazi do povećanog trenja između tereta i stijenke tanka što uzrokuje dodatnu toplinu;
- hlađenje tankova prije ukrcaja (*Cooling down*) gdje su tankovi još topli pa dolazi do velikog isparavanja;
- visoke temperature zraka i mora;
- *Rollover* – Pojava koja nastaje kad se teži sloj formira iznad lakšeg sloja, tada dolazi do reakcije miješanja težeg i lakšeg sloja i nastaje nekontrolirano isparavanje koje može biti i do 10 puta veće od uobičajenog. To dovodi do visokog tlaka te otvaranja odušnih ventila, postoji i mogućnost deformacije tankova. *Rollover* češće se događa u spremnicima na kopnu gdje teret duže stoji u spremniku, pa se zbog novog tereta događa miješanje. Za sprječavanje *rollovera* treba izbjegavati dugačke periode prekida ukrcaja tereta, pomno promatrati i obrađivati podatke o temperaturi tereta i brzini isparavanja, te reagirati ukoliko podaci ukazuju na *rollover*. [3]



Slika 2. Isparavanje tereta u odnosu na sadržaj dušika [7]

Slika 2. prikazuje kako količina isparavanja tereta ovisi i o sastavu plina, plin sa više dušika puno manje isparava zbog toga što LNG sa većim postotkom dušika ukapljuje se na nižoj temperaturi te zbog toga se javljaju manja isparavanja.

3.1 KOLIČINA ISPARAVANJA U ODNOSU NA VRSTU TANKOVA

Uobičajeno dnevno isparavanje tereta najviše ovisi o vrsti tanka odnosno vrsti izolacije tanka, okolnoj temperaturi i sastavu plina. Na sastav plina i okolnu temperaturu se ne može utjecati, ali cilj je spriječiti prevelika isparavanja (BOR- *boil off rate*). Zbog toga su osmišljene posebne vrste izolacija na tankovima kako bi se umanjili isparavanja.

Tablica 2. Toplinska vodljivost materijala [21]

Materijal	Toplinska vodljivost na 10°C [W/(mK)]
Drvo balsa	0.05
Mineralna vuna	0.03
Perlit	0.04
Poliuretan	0.025
Polistiren	0.036

U tablici 2. nalaze se toplinske vodljivosti materijala koji se koriste za izolaciju tankova. Materijali sa manjom toplinskom vodljivošću slabije prenose toplinu, kod tankova je to bitno jer takvi materijali manje preuzimaju temperaturu iz okoline na stjenke tanka, odnosno na teret. Iz tablice 2. je vidljivo da toplinska vodljivost ovih materijala je jako mala

za razliku od drugih materijala. Radi usporedbe aluminijska toplinska vodljivost iznosi 200W/mK, nehrđajući čelik ima od 12.11 do 45.0 W/mK, voda 0.6 W/mK i zrak oko 0.025 W/mK. [6]

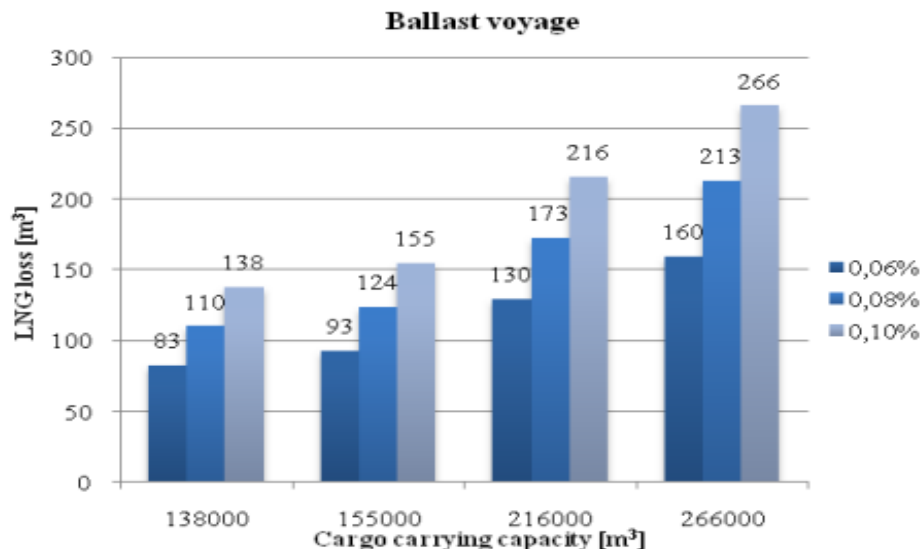
Tablica 3. Karakteristike tankova [21]

	Naziv tanka			
	Mark III	GT No. 96	Kværner Moss Rosenberg	IHI SPB
Boil-off rate [%]	0.13-0.15 0.26-1995.god	0.15 - 0.16 0.104 (najnoviji)	0.10 - 0.15	0.13
Godina uvođenja	<1993 (Mark I - 1971)	<1994	1973	1965
Materijal	Nehrđajući čelik	Invar (čelik sa 36% nikla). 0.2% ugljika	Aluminijska legura sa 9% nikla	Aluminijska legura
Debljina izolacijskog sloja [mm]	250	250-300	220-300	Oko 300
Vrsta izolacije	Poliuretanska pjena,alumijska folija staklena vuna i smola	Šperploče punjene perlitom koji je impregniran silikonom,staklena vuna	Fenolna pjena Polistiren	Poliuretanska pjena sa alumijskom folijom

BOR je definiran kao postotak isparenog plina na dan u odnosu na ukupan kapacitet tanka, on ne bi trebao prelaziti 0.15% pri normalnim vremenskim uvjetima. U tablici 3 nisu uzeta u obzir isparavanja pri održavanju tanka hladnim i isparavanje prilikom ukrcanja ili iskrcanja, gdje su isparavanja znatno veća. BOR nije fiksni postotak, on varira svako putovanje zbog različitosti u sastavu LNG-a te zbog vremenski uvjeta i temperatura.

3.2. PLOVIDBA U BALASTU

Nakon iskrcanja tereta u svakom tanku ostane mala količina LNG-a, ta količina može se ostaviti u svakom tanku pojedinačno ili se iz svih tankova može prebaciti u jedan tank. Kod kraćih balastnih putovanja do 18 dana se teret drži u svim tankovima, dok kod dužih putovanja uobičajeno je ostaviti veću količinu ostatka tereta u jednom tanku. [3]



Slika 3. Dnevni gubitak tereta zbog isparavanja na brodovima različitog kapaciteta i različitog BOR-a u balastnom putovanju [6]

Plovidbom u balastu BOR iznosi od 0.6% - 0.10 %, ako brod koristi LNG za pogon onda taj postotak isparavanja najčešće nije dovoljan za rad strojeva, pogotovo ako se plovi punom snagom . Tada se tekući LNG iz tanka preko *sprey* linije šalje prema isparivaču tereta gdje se grije i pretvara u paru te se kompresorima nižeg kapaciteta (*LD compressor*) šalje prema potrošačima. Bitno je i pripremiti tankove za ukrcaj tereta, tankovi moraju biti pothlađeni kako ne bi došlo do velikih naprezanja te pucanja tankova. Kod dužih putovanja teret se ostavlja u jednom tanku, tada iz toga tanka preko *sprey* linije šaljemo LNG na mlaznice koje se nalaze u svakom tanku. Pri početku pothlađivanja javljaju se velika isparavanja tereta zbog toga što je tank još uvijek puno topliji za razliku od tereta, tada dolazi do povećanja tlaka u tankovima koji se rješava tako da se pare tereta preko LD kompresora šalju prema strojarnici ili se spaljuju. Karakteristika membranskog tanka je da dok god je određena količina tereta pri dnu, temperatura na vrhu tanka se neće povisiti iznad -50°C (ovisno o izvedbi tanka). Međutim, ukoliko je putovanje dugačko, lakše frakcije tereta (uglavnom metan) će prvi ispariti, te će ostati teži plinovi (LPG) koji imaju višu temperaturu i relativno visoku gustoću, što otežava crpljenje i održavanje temperature u tankovima. Tank se smatra ohlađenim kad temperatura u tanku nije iznad -130°C , za to je potrebno približno oko 10 sati pothlađivanja. Kod brodova sa postrojenjem za reukapljivanje, ostatak tereta se koristi isključivo za pothlađivanje tankova, dok se generirani ispareni dio tereta reukapluje. [3,6]

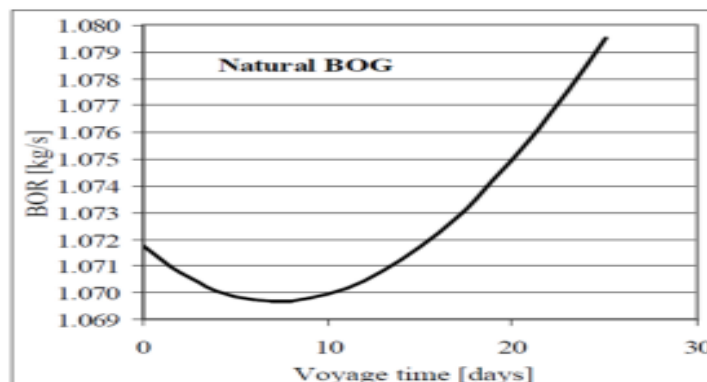
3.3. UKRCAJ TERETA

Nakon što su se takovi ohladili te su se svi sustavi provjerili ukrcaj može započeti. Ukrcaj se obavlja obalnim pumpama preko cjevovoda za ukapljeni plin (eng. *liquid line*). Prilikom ukrcaja javljaju se isparavanja LNG-a (8-10 puta veća od normalnog) jer su tankovi još uvijek puno topliji od tereta. Isparavanja se mogu umanjiti na način da se što bolje ohlade tankovi i cjevovodi. Kako ne bi došlo do prevelikog tlaka u tanku ispareni dio tereta se kompresorima velikog kapaciteta (eng. *HD compressor*) preko cjevovoda za ispareni dio tereta (eng. *vapor line*) šalje na kopno. Pri početku ukrcaja javljaju se najveća isparavanja, iz tog razloga koriste se i dva HD kompresora kako tlak ne bi prelazio vrijednost od 10 kPa, u slučaju da u toj situaciji ne koristimo 2 kompresora zbog povećanja tlaka može doći do otvaranja odušnih ventila, a to znači da bi se hladan plin ispustio iz tanka te bi se zadržavao u razini palube što može dovesti do velike opasnosti. U slučaju ne mogućnosti održavanja tlaka u tanku jedini način za sprječavanje otvaranja odušnih ventila je pritvaranje ventila na manifoldu i smanjenje rate ukrcaja ili privremeno zaustavljanje ukrcaja. Brod sa membranskim tankovima je jako bitno držati na ravnoj kobilici sve dok tekući plin ne dođe u doticaj sa vertikalnom stijenkom tanka, da je brod nagnut došlo bi do nerazmjerne izmjene topline što bi moglo uzrokovati velika isparavanja unutar tanka. [3,6]

3.4. PLOVIDBA POD TERETOM

Tankovi se obično pune do 98.5% volumena, ostali dio je ispunjen parama tereta. Kroz cijelo putovanje mora se održavati konstantni tlak (5 -10 kPa). Za vrijeme plovidbe pod teretom BOR iznosi od 0.10% - 0.15% u većini slučajeva to je dovoljna količina isparenog plina za pogon strojeva pa nije potrebno proizvoditi dodatan plin za razliku od putovanja u balastu gdje BOR iznosi od 0.6% - 0.10%. Pri početku putovanja nastaju veća isparavanja (prikazano u slici 4.) jer su međumembranski prostori još uvijek nedovoljno ohlađeni. Prilikom velikog valjanja broda dolazi većeg isparavanja tereta pa je tada potrebno sagoriti plin u posebnim sustavima sa izgaranje (ako brod nema sustav za reukapljivanje). Dolaskom u iskrcajnu luku, poželjno je tlak u tankovima držati nisko, s obzirom da će se brzina kretanja broda smanjiti na manevarsku i tada će potražnja za plinom biti malena, pa ukoliko se stvori prevelika količina isparenih para, a tlak u tankovima je visok, postoji mogućnost ispuštanja plina u atmosferu.

Ako brod ima sustav za reukapljivanje taj plin se pretvara u tekuće stanje i ponovno vraća u tank, ako je tlak u tanku viši, zbog zagrijavanja količina tereta može biti veća nego što je bila na ukrcaju. Ako sustav ne uspijeva reukapljiti sav plin onda se taj plin izgara [3,6]



Slika 4. Isparavanje tereta u odnosu na dane putovanja [6]

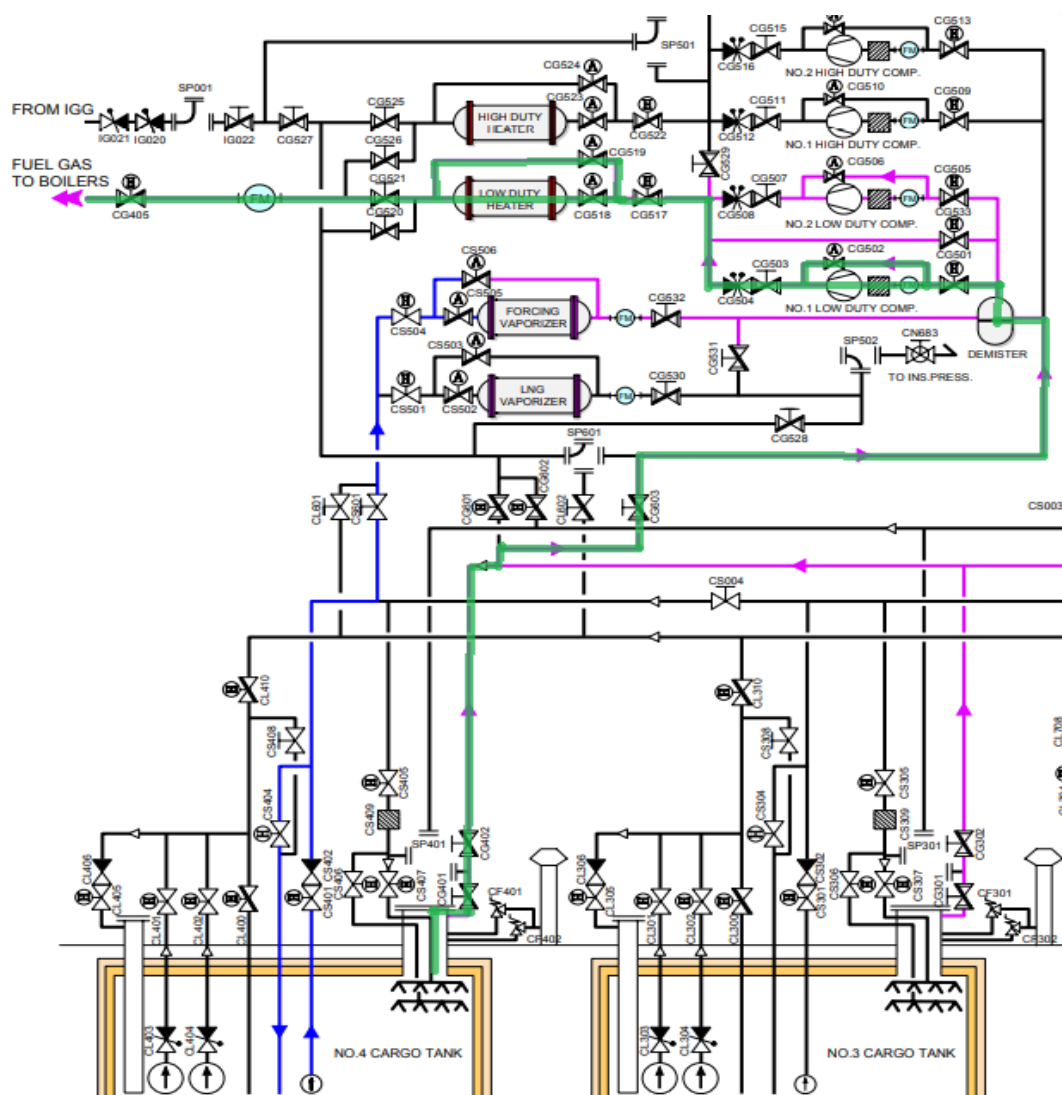
Slika 4. prikazuje povećano isparavanje tereta *boil off gas* (BOG) odmah pri ukrcaju jer tada međumembranski prostori još nisu u potpunosti ohlađeni, sljedećih nekoliko dana vanjska temperatura još nema velik utjecaj na izolaciju, pa iz tog razloga isparavanje je malo. Nakon otprilike 12 dana počinje rast isparavanja jer dolazi do grijanja stjenki tanka koje uzrokuje pojačano isparavanje tereta, sve dok se teret ne iskrca isparavanje se povećava.

3.5. ISKRCAJ TERETA

Prije iskrcaja bitno je pothladiti cjevovode tekućeg tereta, iskrcaj se obavlja brodskim pumpama koje su uronjene u tank. Uobičajeno se na brodu ostavlja određeni dio tereta (eng. *heel*) kako bi se na povratnom putovanju (do ukrcajne luke) tankovi držali pothlađenima i kako bi se ispareni dio tereta koristio kao pogonsko gorivo (osim na brodovima sa reukapljivanjem). Količina tereta koji se ostavlja ovisi o dužini putovanja, brzini potrebnj za putovanje i o samom dogovoru sa unajmiteljem broda. Kako ne bi došlo do vakuma u takovima prilikom iskrcaja, sa obale se šalju pare plina kroz vapor line koji ulazi sa vrha tanka. U slučajevima da količina dostavljenog plina nije dovoljna, dodatna količina plina se mora proizvest na brodu uz pomoć isparivača tereta. Nakon iskrcaja u tankovima se nalaze pare plina koje onemogućavaju ulazak kisika čime nema opasnosti od gorenja. U tom slučaju nije potrebno koristiti dušik za inertiranje koji je jako skup, a generator dušika na brodu ne može proizvesti tolike količine za ispunjavanje svih tankova.

4. KORIŠTENJE ISPARENOG PLINA ZA POGON STROJEVA

Isparavanje plina koje nastaje povećava tlak u tankovima pa ga je potrebno izbaciti iz tanka. Plin se može spaliti u spaljivaču tereta (*eng. Gas Combustion Unit – GCU*), iskoristiti za pogon strojeva ili reukapljit. U ovom poglavlju opisivat će se radnje potrebne za korištenje plina kao pogonskog goriva. Da bi se koristio *boil off* za pogon bitno je znati količinu isparavanja te potrebnu količinu tereta koju moramo ostaviti u tankovima nakon iskrcaja (*heel*). Dok je brod u plovidbi pod teretom rijetko se javlja potreba za proizvodnjom dodatnog *boil off*-a jer teret prirodno isparava (0.15% volumena tanka u jednom danu).



Shema 1. Tok isparenog plina iz tanka prema strojarnici prilikom prirodnog isparavanja (*natural boil off*) [8]

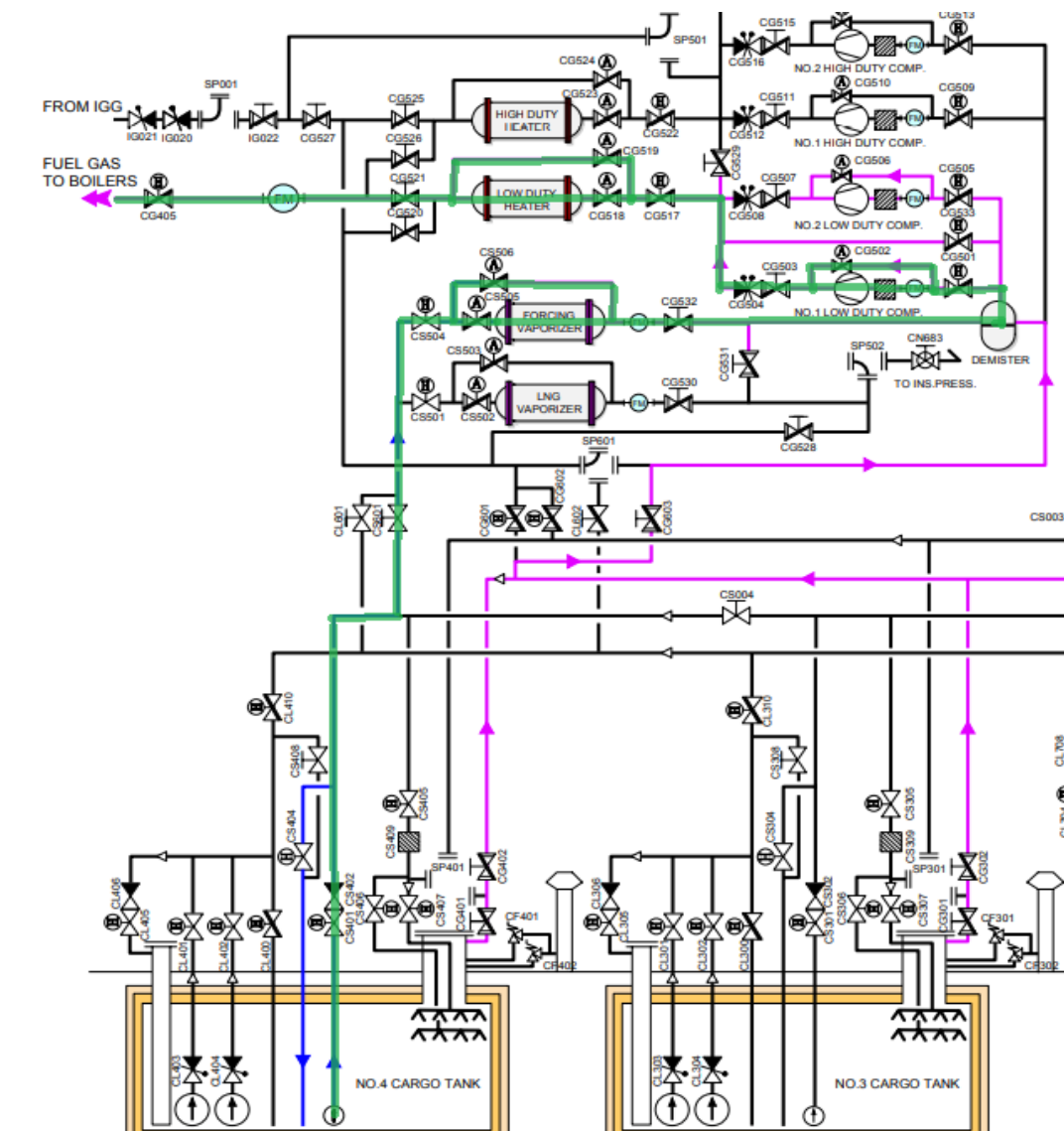
Shema 1. i shema 2. uzete su sa broda *LNGC Disha*, također opis sustava se poklapa sa shemama te karakteristikama postrojenja koji se nalaze na brodu *LNGC Disha*. Shema 1. prikazuje tank NO 4 i tank NO 3, u ovom radu operacija korištenja *boil off*-a te LNG-a za potrebe strojarnice bit će prikazana podebljanom zelenom bojom te će se odnositi samo na tank tereta NO 4.

Pare koje se nalaze na vrhu tanka idu preko vapor linije do sakupljača kapljica (*demistera*), njegova je uloga ukloniti svu kapljevину koja se nalazi u isparenom plinu kako ne bi došlo do oštećenja rotora LD kompresora koji se okreće maksimalno do 24.300 okretaja u minuti. LD kompresor šalje plin dalje prema zagrijaču tereta pod tlakom od 196 kPa, temperatura na izlazu iz kompresora je oko -68°C (ovisno o temperaturi plina u tanku), u zagrijaču tereta nalaze se cijevi kroz koje prolazi plin, a oko njega nalazi se para koja mu predaje toplinu. Na zagrijaču se nalaze ventili s kojima se može regulirati temperatura plina, ako nam je temperatura previsoka zatvaramo ventil CG518 i otvaramo *bypass* ventil CG519, plin onda zaobilazi grijač te smanjuje temperaturu plina nakon grijača. Temperaturni senzor je spojen nakon točke miješanja, te šalje podatak u kontroler temperature koji automatski otvara i zatvara ventile na ulaznoj i zaobilaznoj liniji. Inicijalno je uvijek potrebno manualno kontrolirati temperaturu dok se sustav ne stabilizira. Poželjno je u potpunosti otvoriti ventil na zaobilaznoj liniji (CG519), te postepeno otvarati ventil na ulaznoj liniji (CG518). Temperatura pare na izlazu iz zagrijača je oko $+30^{\circ}\text{C}$ (maksimalna je $+47^{\circ}\text{C}$) ovisno o kakvoj vrsti pogona se radi, ali temperatura nikako ne smije prijeći $+80^{\circ}\text{C}$ jer bi tada došlo do topljenja izolacije cjevovoda, tankova i oštećenja odušnih ventila. Ako imamo veću količinu *boil off*-a nego što je potrebna za rad kotla, kako ne bi došlo do povećanja tlaka u tanku te potrebe za ispuštanjem plina u atmosferu, sav višak plina se izgara u kotlu, a nastali višak pare ide u kondenzator (*steam dump*), proces je moguće izvest čak i kad brod stoji.

U slučaju kad prirodno isparavanje tereta nije dovoljno za rad strojeva, to je najčešće prilikom velikih brzina plovidbe te plovidbe u balastu, tada je potrebno koristiti isparivač dodatnog plina (*Forcing Vaporizer*). U shemi 2. prikazan je (zelenom podebljanom bojom) postupak stvaranja *boil off*-a te slanje istoga prema strojarnici.

LNG se preko *stripping* pumpe kroz *sprey* liniju šalje prema isparivaču dodatnog plina (*forcing vaporizer*), pri pokretanju pumpe povrat plina prema tanku regulira se ventilom CS404. *Forcing vaporizer* pretvara LNG u plin na način da ga grije parom (isti princip kao i zagrijač tereta). Količina potrebnog isparenog tereta kontrolira se ventilom koji se nalazi prije isparivača plina. Temperatura plina na izlasku iz isparivača se prilagođava na jednaki

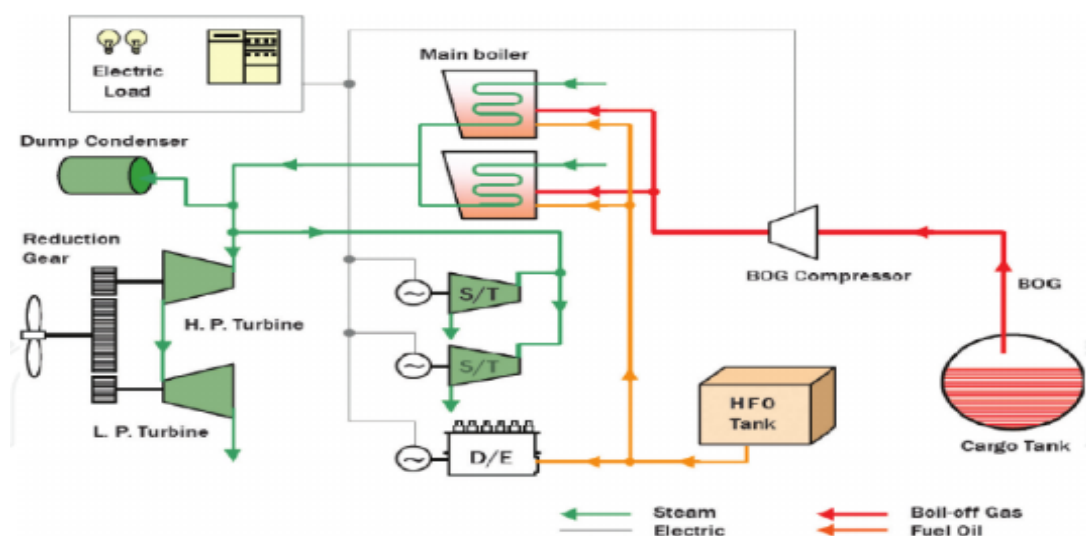
način kao i kod zagrijača, s time da je potrebno pratiti upute proizvođača na koju se točno temperaturu treba postaviti kontroler. Uobičajena je praksa da je ta temperatura negdje oko -40°C prije nego uđe u *demister*. Nakon što se iz plina odstrani sva kapljevina, plin ulazi u LD kompresor koji ga šalje do zagrijača tereta gdje se dodatno grije na $+40^{\circ}\text{C}$ (ovisno o vrsti pogona) i kao takav ide kroz mjerac protoka prema ventilu CG405 koji se otvara tek kada je zadovoljena temperatura plina koja je potreba za pogon strojeva, u suprotnom može doći do automatskog gašenja strojeva. U slučaju pada tlaka na manometru u tanku ispod 0.3 kPa dolazi do zatvaranja ventila CG 405 kako bi se spriječio potencijalni nastanak vakuma u tanku te je nakon toga potrebno propuhivanje cjevovoda dušikom.[3,8]



Shema 2. Stvaranje dodatnog plina i slanje prema strojarnici (forced boil off) [8]

4.1. PARNA TURBINA

Razlog primjene parnih kotlova i turbina na ovim brodovima jest korištenje isparenog metana kao goriva u brodskim parnim kotlovima pri čemu se ispareni plin iz spremnika cjevovodima i kompresorom vodi prema kotlovima, održavajući na taj način stalni tlak u tankovima. U novije vrijeme parna turbina se sve manje koristi zbog manje iskoristivosti (35% - 40% pri punom opterećenju) u odnosu na druge vrste, također manje je efikasna zbog veće potrošnje i velike strojarne koja je potrebna za smještaj turbina. Najnovija izvedba turbina je UST- *ultra steam turbine plant* s kojom je smanjena potrošnja za 15%. Ispareni plin koji nastaje u tankovima ili plin koji sami proizvodimo (*forced boil off*) se preko LD kompresora šalje u zagrijače tereta koji ga griju na otprilike $+40^{\circ}\text{C}$ te kao takav ide prema kotlovima. U kotlovima izgaraju zajedno pare prirodnog plina i teško gorivo (omjer nije točno definiran, pa to uvelike olakšava rukovanje s parama isparenog plina) te griju vodu koja počinje isparavati u isparivačkim cijevima, para se nastavlja grijati kako bi postala suhozasićena para (para koja ne sadrži kapljice vode), a nakon toga para se još dodatno grije na temperaturu preko 500°C kako bi joj se povećao specifični volumen te iskoristivost. Jedino takva para se koristi za pogon parnih turbina jer bi u suprotnom kapljice vode mogle oštetiti lopatice turbine. Para ide u turbine pod tlakom od 60-70 bara i temperaturi oko 520°C . Para prvo ulazi u visokotlačnu turbinu dok niskotlačna turbina služi za vožnju krmom. Turbina okreće osovinu koja ide preko reduktora koji smanjuje broj okretaja propulzora (smanjenje broskog skliza). Jedan dio pare ide na pokretanje generatora za proizvodnju struje, a drugi dio prema kondenzatoru (*dump condenser*) koji zagrijava dovod vode kako bi se smanjili gubici odnosno smanjuje se potrošnja plina/teškog goriva. [3,11,10]

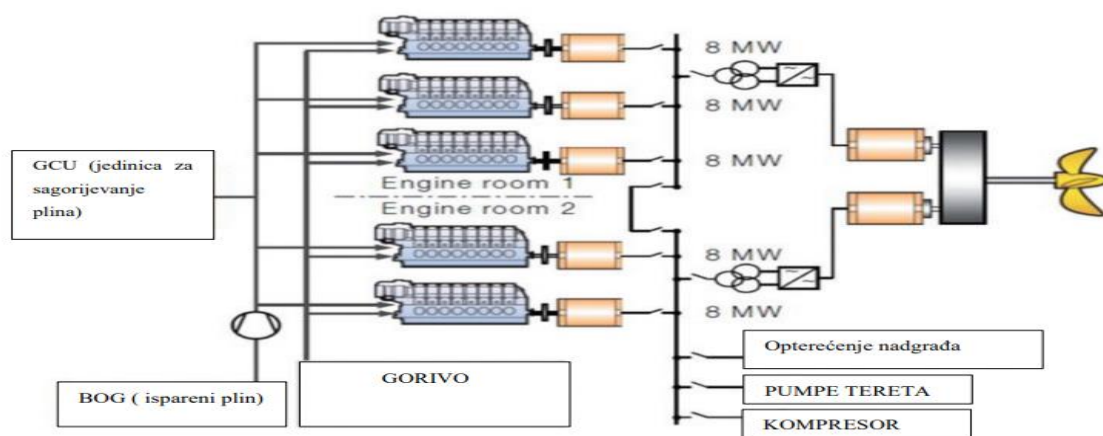


Slika 5. Modificirano pogonsko postrojenje s parnom turbinom (UST) [12]

U slučaju kad turbina radi na malom opterećenju ili ne radi uopće, ispareni plin se umjesto spaljivanja u spaljivaču tereta može slati i u kotao, višak pare koji nastane u kotlu ide u kondenzator i izbacuje se u more. Do 2018. godine čak 48% LNG brodova koristilo je parnu turbinu za pogon strojeva, no nakon 2020. godine jako mali broj novih LNG brodova koristi parnu turbinu zbog manje efikasnosti u odnosu na novu vrstu porivnih strojeva. [12]

4.2. DIZEL ELEKTRIČNI PORIVNI STROJ POGONJEN DVOSTRUKIM GORIVOM

Dizel električni porivni stroj s dvostrukim gorivom (eng. *Dual Fuel Diesel Electric - DFDE*) pruža jednostavniji raspored pogonskog sustava. Istraživanje koje je provedeno 2016. pokazuje da je 20% brodova koji su tad bili naručeni imali DFDE vrstu poriva. Brodovi s ovakvim sustavom često imaju azimutalnu propulziju ili dva vijka na različitim osovinama što uvelike poboljšava manevarska svojstva broda. Sustav se sastoji od nekoliko jednakih četverotaktnih srednjehodnih dizel motora koji su spojeni na generatore koji opskrbljuju brod sa električnom energijom. Kao gorivo ovi motori koriste ispareni plin, teško gorivo i brodski dizel. Kad imamo veće količine isparenog plina tada motori rade na principu Ottovog ciklusa (goriva smjesa se stvara izvan cilindra). Pri takvom načinu rada plin se miješa za zrakom u usisnoj grani te onda mješavina plina i zraka ulazi u komoru za sagorijevanje (cilindar). Takav sustav omogućuje kompresiju i ubrizgavanje pri tlaku od 5-6 bara, s time se smanjuje rizik korištenja prirodnog plina pod tlakom. Mala količina dizela (oko 1%) se ubrizgava u cilindar na kraju drugog takta (kompresija) te se zapali zbog visoke temperature u cilindru i daje visokoenergetski izvor paljenja za glavno punjenje goriva u komori za izgaranje.

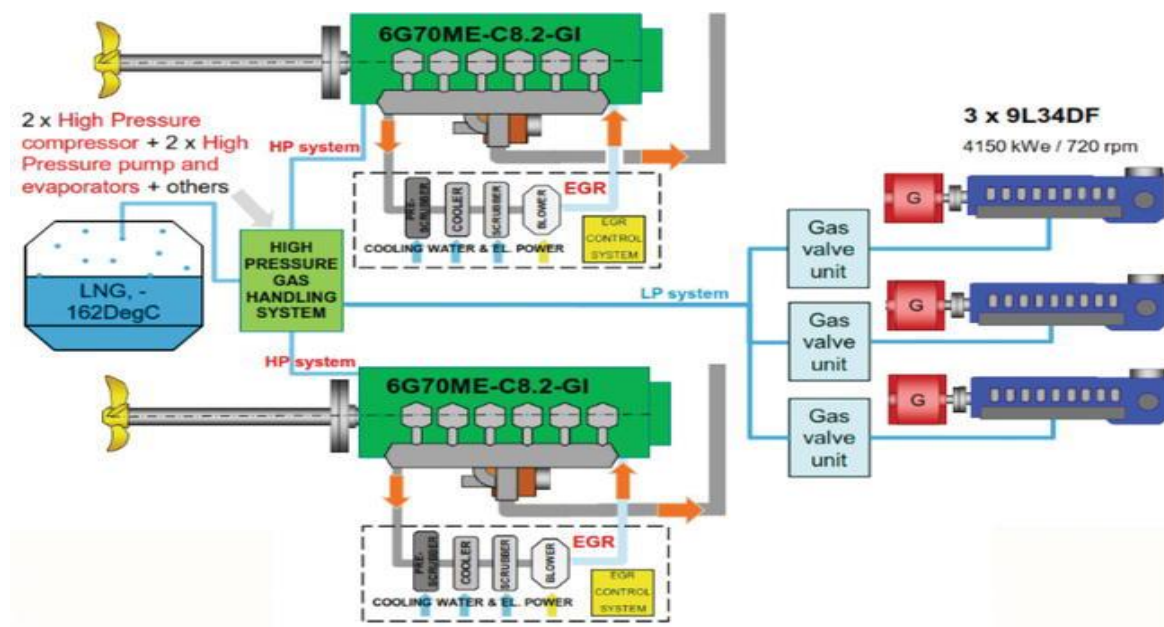


Slika 6. DFDE postrojenje [4]

Kod drugog načina rada motora, motor radi kao i svaki dizelski motor gdje se gorivo uz pomoć visokotlačne pumpe ubrizgava pod visokim tlakom u cilindar. Prebacivanje između dva načina rada provodi se bez prekida u napajanju. Dizelski način rada bolji je u smislu toplinske učinkovitosti i dinamičkog odziva, dok plinski način ima prednosti u pogledu troškova goriva i emisije ispušnih plinova. Ako postoji prevelika količina isparenog plina tada se plin izgara u spaljivaču tereta (GCU). Najveći nedostatak sustava su velika ulaganja, veliki troškovi i velika količina opreme koja je potrebna za rad električnog pogonskog sustava. Nakon 2020. godine proizvodnja ovakvih porivnih sustava znatno pada zbog manje efikasnosti u odnosu na novu vrstu motora. [10,13]

4.3. VISOKOTLAČNI SPOROHODNI MOTOR S DVOSTRUKIM GORIVOM (eng. ME-GI)

Dvotaktni sporohodni motori na dvostruko gorivo nude puno veću efikasnost u usporedbi sa parno-turbinskim i sa DFDE postrojenjem koji su na početku bili zapravo jedina propulzijska rješenja za LNG brodove. Od svih vrsti pogonskog postrojenja na LNG brodovima ova vrsta je danas najzastupljenija. MAN Diesel&Turbine proizveli su ovakvu vrstu stroja koji radi pri visokim tlakovima takozvani ME-GI (*M-type, Electronically Controlled Gas Injection*). Ovakva vrsta motora radi na dizelskom ciklusu gdje se ispareni plin tlači kroz sustav za opskrbu gorivom (eng. *Fuel Gas Supply System – FGSS*) te se ubrizgava u cilindar pod tlakom od čak 250-310 bara.



Slika 7. ME-GI pogonsko postrojenje [13]

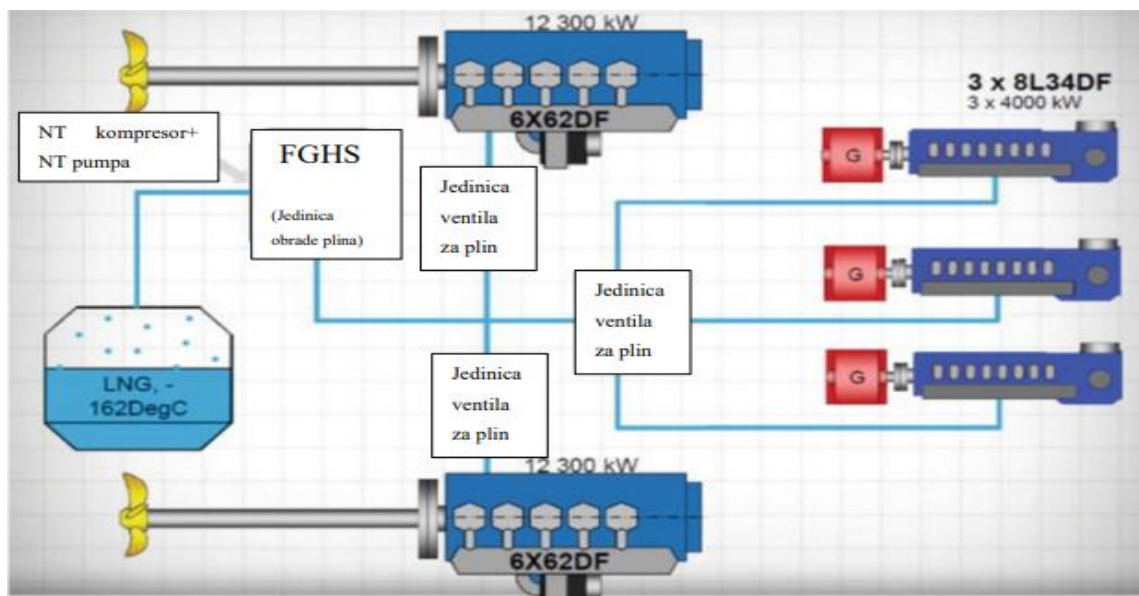
Značajna razlika ovog motora je ta što se ispareni plin direktno izgara u cilindrima na način da se plin dovodi kroz ventile u cilindar nakon što se pilot gorivo zapali blizu gornje mrtve točke. Motor radi s jednakom učinkovitošću na plin i na gorivo pa u slučaju manjka isparenog plina nije potrebno stvarati dodatne količine plina. Prednost dizelskog ciklusa je ta da u slučaju nevremena i visokih temperatura nema opasnosti od pogrešnog paljenja. Visokotlačni FGSS izveden je na dva načina:

- napajanje ME-GI motora preko stapnog kompresora;
- napajanje ME-GI motora preko LNG pumpe i isparivača.

Plin iz FGSS-a se u strojarnicu doprema preko sustava cjevovoda dvostrukog zida gdje se plin nalazi u unutarnjoj cijevi, a prostor između cjevovoda i stjenke vanjske cijevi opremljen je mehaničkom podtlačnom ventilacijom tako da ne bi postojala mogućnost prodora plina u strojarnicu te kako bi se udovoljilo zahtjevu IGC (eng. *IGC - international gas carrier code*) pravilnika. Višak isparenih plinova koji nisu potrebni za pogon se preusmjeravaju preko parcijalnog postrojenja za reukapljivanje natrag u LNG tankove. Isparene pare plina na nižim tlakovima se šalju u generatore električne energije. [3,4,13]

4.4. NISKOTLAČNI SPOROHODNI MOTOR S DVOSTRUKIM GORIVOM (eng. XD-F)

Ova vrsta motora radi na principu osiromašenog Ottovog ciklusa gdje se gorivo i zrak prethodno miješaju i sagorijevaju u visokom omjeru goriva i zraka. Mješavina zraka i plina ulazi u cilindre kad se stap nalazi na otprilike sredini hoda kompresijskog takta, tad je tlak u cilindru relativno nizak, a plin se ubrizgava pod tlakom od 5-16 bara. Zbog niskog tlaka u cilindru potreban je izvor paljenja kako bi se smjesa zapalila, izvor zapaljenja je najčešće pilotsko gorivo (dizel) koje se ubrizgava s količinom manjom od 0.5 % od ukupnog ubrizganog goriva.



Slika 8. XD-F propulzijsko postrojenje [4]

Model niskog tlaka nudi mogućnost primjene jednostavnog FGSS-a, obzirom da se plin miješa sa zrakom za ispiranje na sredini hoda, tlak potreban za ubrizgavanje plina je ispod 16 bara. Dobava plina niskog tlaka znači širi odabir dobavljača sustava i ugradnju pomoćnih motora manje snage, čime se smanjuju investicijski i operativni troškovi.

4.5. USPOREDBA VISOKOTLAČNOG I NISKOTLAČNOG MOTORA S DVOSTRUKIM GORIVOM

Visokotlačni ME-GI motori imaju bolju učinkovitost u pogledu snage (u odnosu na XD-F) koja je usporediva s dizelskim motorima, također dinamički odaziv je usporediv s dizelskim motorima. Ovi motori smanjuju emisije NO_x za 40% u usporedbi sa teškim gorivom što spada u IMO II. ((eng. *IMO - International Maritime Organisation*) razinu NO_x ograničenja. Motori mogu imati i EGR (eng. *Enhanced Exhaust Gas Recirculation*) s kojim se smanjuje emisija dušičnih oksida. CO₂ emisija je smanjena na 24 % dok su emisije metana na niskoj razini 0.2 g/kWh. Toplinska učinkovitost motora je oko 50%.

XD-F motori imaju nižu emisiju NO_x plinova zbog manje temperature plamena (IMO III razina), zbog toga nije potrebno dodatno obrađivati ispušne plinove. Ovi motori imaju nešto veću potrošnju plina ali zato imaju manju potrošnju pilot goriva koje više zagađuje, bitno je naglasiti da XD-F motori imaju manje investicijske troškove te imaju veću količinu propuštanja metana (3g/kWh) koji nastaje zbog nepotpunog izgaranja unutar najhladnijeg

dijela komore za izgaranje pri manjim opterećenjima. U svakom slučaju oba motora imaju svoje prednosti i mane, ali to su budućnost pogonskih strojeva na LNG brodovima, 2020. godine od 126 novo naručenih brodova čak 84 broda ima XD-F sustave. [13,14]

4.6. PREDNOSTI I NEDOSTACI UPOTREBE PRIRODNOG PLINA ZA POGON STROJEVA

U tablici 4. vidimo prednost LNG goriva što je jako važno zbog odredbi koje nalaže IMO, također u posebnim područjima tzv. ECA (*eng.Emission Control Area*) pod koje spadaju Sjeverna Amerika, Sjeverno more, Baltičko more i Europa, ograničenje za udio sumpora ne smije prelaziti količinu od 0.1%. Zbog lošije kvalitete teškog ili dizelskog goriva ta razina sumpora može biti i viša od ove u tablici 4. , kod LNG-a takav problem ne postoji pa nije potrebna ugradnja pročišćivača ispušnih plinova. Iz tablice se jasno vide prednosti prirodnog plina u smislu emisije sumpora, dušičnih oksida te čestica koje nastaju nakon izgaranja. Najveći problem kod korištenja LNG-a za pogon strojeva nastaje zbog stakleničkih plinova (CO_2 i CH_4) koji nastaju zbog metanskog skliza. Metanski skliz nastaje zbog nepotpunog izgaranja u motorima te zbog toga dolazi do ispuštanja prirodnog plina (metana) u atmosferu, metan je čak 72 puta jači staklenički plin od CO_2 . Prije industrijske revolucije (1750.) razina metana bila je 0,0000700% ,a danas iznosi 0,0001745% te se zbog toga raspravlja o daljnjim metodama mjerenja njegovog utjecaja na globalno zagrijavanje. [4,15]

Tablica 4. Emisije različitih vrsta goriva nakon izgaranja [4]

Emisije	Teško gorivo	Dizelsko gorivo	LNG
SO_x	0.049	0.003	Tragovi
CO₂	3.114	3.206	2.750
CH₄	Tragovi	Tragovi	0.051
NO_x	0.093	0.087	0.008
Čestice	0.007	0.001	Tragovi

5. SUSTAV UKAPLJIVANJA ISPARENOG PLINA NA LNG BRODOVIMA

Tehnologija ponovnog ukapljivanja prvo se počela koristiti na LPG (*Liquefied petroleum gas*) brodovima zbog toga što se nafti plin ukapljuje na puno višoj temperaturi pa je zbog toga oprema puno jeftinija, jednostavnija i ne zahtjeva veliku količinu energije. Nakon 2000. godine sustavi za ponovno ukapljivanje počinju se razvijati na LNG brodovima. Postoje LNG brodovi koji ne koriste ispareni dio plina za pogon strojeva, a to su brodovi koji najčešće imaju dizel motore za pogon. Takvi brodovi moraju imati sustave za upravljanje s isparenim plinom kako bi se uvijek u tanku održavao tlak što bliži atmosferskom. Većina takvih brodova imaju ugrađeni sustav koji ispareni plin hladi te ga ponovno vraća u tank u tekućem stanju (sustav reukapljivanja), ovakav sustav mogu imati i brodovi koji koriste dvotaktne sporohodne motore na dvostruko gorivo (dizel i ispareni plin) pa se neiskorišteni dio plina ukapljuje ili spaljuje u spaljivaču tereta. Da bi se sustav reukapljivanja ugradio na brodove on treba zadovoljiti sljedeće zahtjeve:

- mogućnost ukapljivanja kompletne količine isparenog plina u normalnim uvjetima;
- sustav za ukapljivanje mora biti opremljen sa 100%-tnom zalihošću koja se zahtijeva IGC Codom;
- spaljivač tereta mora biti ugrađen kako potpuna zamjena sustavu za ukapljivanje;
- dušik koji je dio prirodnog plina se ne može ukapljiti pa se mora odstraniti u spaljivaču tereta;
- obvezna opremljenost sustava automatskom kontrolom kapaciteta;
- mogućnost zaustavljanja rada sustava dok rade pumpe tereta;
- za rashladno sredstvo koristi se dušik koji se dobiva pomoću generatora dušika, te on zadržava svoju plinovitu fazu tijekom cijelog rashladnog procesa.

Na LNG brodovima najčešće se koriste sustavi za ukapljivanje pod nazivom *Hamworthy Mark- i, Mark- iii, Tractebel tge* i *Cryostar Ecorel*. Pri projektiranju ovakvih sustava primarno je bilo smanjiti utrošak električne energije potrebne za rad sustava, daljnjim projektiranjem potrošnja se smanjila za 15-20%. Sustav “Mark III” troši 0.78 kW

po kilogramu isparenog plina. Svaki sustav se sastoji od kruga isparenog plina i kruga rashladnog dušika, također svaki sustav koristi inverzni Braytonov ciklus za hlađenje dušika.

5.1 KRUG ISPARENOG PLINA

U krugu isparenog plina dolazi do izvlačenja plina iz tankova, tlačenja, hlađenja i na kraju do pretvaranja plina u tekućinu koja se vraća nazad u tank tereta. Krug isparenog plina sastoji se od:

- **Pothlađivača isparenog plina-** svrha pothlađivača je održavanje konstantne temperature plina na način da se ukapljeni prirodni plin preko pumpe za pothlađivanje i *sprey* linije dovodi iz tankova tereta. Prilikom pothlađivanja plinu se povećava gustoća, čime mu se povećava i maseni protok kroz kompresor, to dovodi do povećavanja njegovog stupanja djelovanja. Pothlađivač zadržava kondenzat težih komponenti isparenog plina te na taj način štiti kompresore od oštećenja. [2,16,17]
- **Kompresora isparenog plina-** to je najčešće kompresor koji se sastoji od dva ili tri stupnja i ima mogućnost zakretanja lopatica, na taj način se regulira kapacitet, a tlak na tlačnoj strani kompresora treba održavati konstantnim. Glavna zadaća kompresora isparenog plina je održavanje propisanog tlaka u tankovima, te povišenja tlaka prije ulaska u izmjenjivač topline. Bitno je naglasiti da se povećanjem tlaka povećava i temperatura kondenzacije, što je veća temperatura kondenzacije plin se treba hladiti na manju temperaturu da bi došao u tekuće stanje, pa zbog toga raste ukupan stupanj djelovanja cijelog postrojenja. [2,16,17]
- **Glavnog izmjenjivač topline-** to je dio rashladne kutije (eng. *cold box*) u kojem se ispareni plin pothlađuje i kondenzira. Pločasti izmjenjivač topline većinom se sastoji od 2 prolaza dušika i jednog prolaza prirodnog plina gdje topli dušik pod visokim tlakom ulazi od dna prema vrhu u rashladnu kutiju te se pothlađuje niskotlačnim dušikom, zatim taj dušik ekspandira u ekspanzijskoj turbini i vraća se puno hladniji u rashladnu kutiju. Takav dušik hladi topli dušik i ukapljuje prirodni plin koji se nalazi u rashladnoj kutiji. Temperatura plina kod pločastog izmjenjivača topline najniža je na dnu. Temperatura se ne smije previše razlikovati od dozvoljenih temperatura zbog mogućnosti termalnog stresa koji može uzrokovati pukotine, zbog toga postoji ventil koji će se otvoriti u slučaju višeg tlaka te podtlaka. [2,16,17]

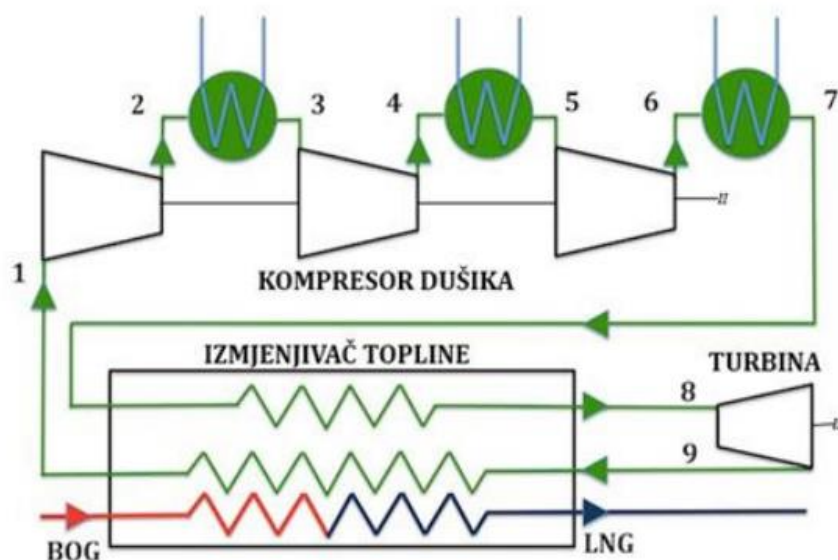
- **Separatora** - Nakon što se prirodni plin ukaplji on se sakuplja u separatoru kako bi se odvojili plinovi koji se ne mogu ukapljiti. Takvi plinovi (najviše dušik) se odvođe u spaljivač tereta (GCU). Troputni ventil usmjeruje prirodni plin ili u GCU preko grijača ili vraća plin natrag u tankove preko teretnih pumpi. Ako se tekućina u separatoru podigne iznad dopuštene, kontrolni ventil se otvara sve dok razina ne padne ispod dopuštene. Tlak u separatoru je uvijek dovoljan kako bi vratio ukapljeni plin u tank tereta i u pothlađivač isparenog plina na početku procesa. Separator i izmjenjivač topline su smješteni u rashladnoj kutiji koja je izolirana kako bi se smanjio prodor topline. [2,16,17]
- **LNG transfer pumpi** - pumpa koja šalje ukapljeni plin iz rashladne kutije, točnije iz separatora u tankove tereta.

5.2. KRUG RASHLADNOG DUŠIKA

Dušik se koristi kao rashladno sredstvo jer mu je temperatura vrenja (-196°C) niža od temperature vrenja metana (-161.5°), dušik je inertan plin pa je siguran i prihvatljiv za brod. Dušik na brod možemo dobiti s kopna i možemo ga sami proizvest u generatorima dušika, svi LNG brodovi imaju generator dušika pa se ukrcaj dušika s kopna ne izvodi jer nije praktično i dosta je skupo. Najuoobičajeniji sustav za generaciju dušika radi na principu odvajanja dušika iz zraka. Ovaj sustav radi na principu odvajanja sastavnih čestica zraka prilikom prolaska komprimiranog zraka kroz prozirne vlaknaste membrane. Svaki od ovih plinova (kisik, dušik i ostali plinovi) ima svoju stopu propusnosti (permeacije), koja je okarakterizirana funkcijom otapanja i neutralizacije kroz membranu. Ova karakteristika dopušta “bržim” plinovima kao što je kisik da se odvoji od “sporijih” plinova kao što je dušik. Membrane odvajaju zrak u dva ogranka – jedan ogranak je dušik, dok drugi sadrži kisik, ugljični dioksid i ostale plinove zraka. Sustav može proizvoditi dušik koji je od 95% do 97% čistoće. Kapacitet sustava ovisi o broju instaliranih membranskih modula, kao i o ulaznom tlaku zraka, temperaturi i željenoj čistoći dušika. [3]

Na brodovima se za hlađenje dušika koristi obrnuti *Braytonov* ciklus koji se pokazao kao najoptimalniji. U sljedećoj shemi prikazan je modificirani Braytonov sustav reukapljivanja kakav se koristi na današnjim LNG brodovima.

Dušik ulazi u kompresor gdje se tlačí, tlačanjem povećava mu se temperatura pa ga je potrebno ohladiti u rashladnicima gdje se izmjena topline obavlja morskom vodom ili nekim drugim medijem. Takav postupak ponavlja se još 2 puta jer sustav ima 3 kompresora kako bi se dušik što bolje stlačio. Dušik stanja 7 ulazi u izmjenjivač topline pod konstantnim tlakom gdje se hladi hladnim dušikom koji se nalazi unutra. Nakon toga dušik ulazi u ekspanzijsku turbinu gdje naglo ekspandira te uslijed toga dolazi do naglog pada temperature i tlaka. Takav ohlađeni dušik ulazi u izmjenjivač topline te preuzima toplinu od toplijeg dušika prvi vrhu izmjenjivača topline i hladi (ukapljuje) ispareni plin koji prolazi po dnu izmjenjivača topline gdje se nalazi najniža temperatura. Ispareni plin koji je ušao pri dnu u izmjenjivač topline izlazi iz njega kao prirodni ukapljeni plin. Bitan dio Braytonovog sustava je da se dušik ne kondenzira ni u jednoj točki procesa . [16,17]



Slika 9. Braytonov rashladni sustav dušika [18]

Krug rashladnog dušika sastoji se od:

- **Kompandera** - sklop koji se sastoji od 2 do 3 radijalna centrifugalna kompresora koji su pogonjeni elektromotorima preko reduktora koji smanjuje broj okretaja kompresora. Sklop se sastoji i od ekspanzijske turbine u kojoj dolazi do nagle ekspanzije plina te se time smanjuje tlak plina i dolazi do velikog pada temperature plina. Nakon svakog stupnja kompresije nalazi se rashladnik kroz koji prolazi morska ili slatka voda te tako snižava temperaturu plinu nakon izlaska iz kompresora

Kompander će se isključiti ako temperatura dušika prije ulaska u kompander iznosi najčešće preko 50°C ili ako tlak bude viši od 1200 kPa odnosno niži od 20 kPa.

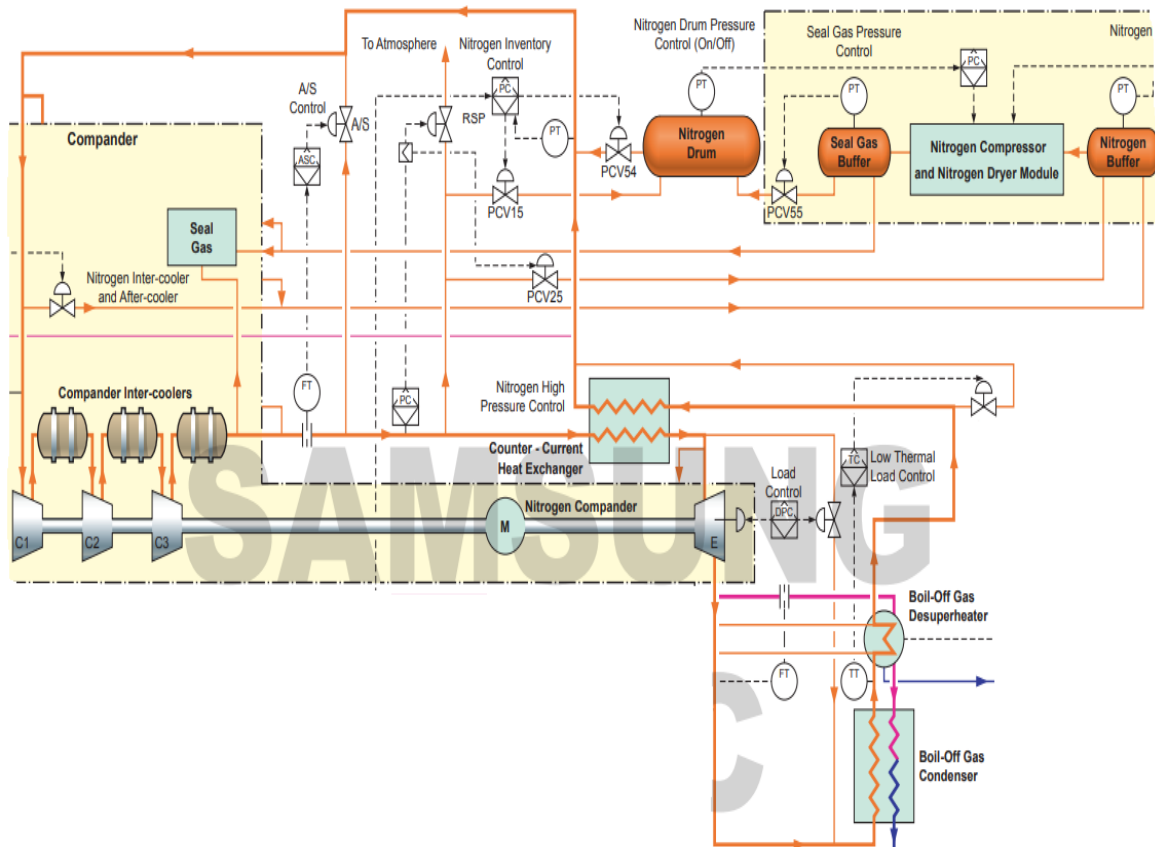
- **Izmjenjivača topline (rashladna kutija, eng.cold box)**- u izmjenjivaču topline dolazi do ukapljivanja prirodnog plina tako da hladni dušik ulazi sa dna izmjenjivača i hladi ispareni plin. Dušik se grije i nastavlja se kretati prema vrhu izmjenjivača gdje hladi dušik koji je u izmjenjivač došao preko zadnjeg stupnja kompresora.
- **Kompresora dušika** - namijenjeni su za održavanje tlaka u spremnicima na temelju unaprijed određenih vrijednosti kao i za nadopunjavanje te za izdvajanje dušika iz rashladnog kruga dušika. To se postiže tako da se uputi jedan kompresor kada je postignuta donja granica, te se isključi nakon što je postignuta gornja granica.
- **Sušioca dušika** - Prije ulaska u sušioc dušik prolazi kroz filtere gdje se uklanja kondenzat, prljavština i uljne čestice. Svaki sustav kompresora ima sušilac za apsorpciju s izmjenjivim fazama apsorpcije i regeneracije. Dušik će se naizmjenično sušiti u jednom apsorpcijskom dijelu dok se drugi regenerira. Svrha sušioca je pripremiti dušik prije ulaska u kompresor.
- **Spremnika dušika**- Nazivaju se i *buffer* tankovi, mogu se puniti s kopna ili preko generatora dušika.

5.2.1 Opis sustava rashladnog dušika

Glavna zadaća sustava je pružiti dovoljno hladan mediji (dušik) koji može ukapljiti pare isparenog plina. Na shemi se nalazi sustav rashladnog dušika sa LNG broda Al Mafyar. Temperature i tlakovi odnositi će se na maksimalne dozvoljene vrijednosti koje se nalaze u *cargo operating manual*-u broda Al Mafyar.

Dušik ulazi u kompander pri temperaturi oko 40°C, kompander se sastoji od 3 kompresora i ekspanzijske turbine. Nakon izlaska iz prvog kompresora dušik se nalazi na temperaturi do 100°C i tlaku ne višem od 16 bara. Plin se nakon toga hladi u rashladniku na temperaturu od 42°C. Nakon izlaska iz drugog kompresora temperatura dušika raste za 1°C a tlak raste za čak 13 bara. Nakon izlaska iz trećeg kompresora tlak dušika raste do 51 bar, a temperatura nakon prolaska plina kroz posljednji rashladnik ostaje skoro ista kao i na početku (40°C). Visokotlačni dušik se nakon trećeg stupnja kompresije hladi u izmjenjivaču topline na -103°C uz pomoć niskotlačnog dušika koji je došao iz *cold box*-a. Nakon toga ulazi u ekspanzijsku turbinu gdje mu tlak naglo pada sa 50 na 10 bara, a temperatura se snižava na -165°C. Niskotlačni hladni dušik se u *cold box* dovodi na dno i tako preuzima

toplinu prirodnom isparenom plinu te ga hladi na temperaturu nižu od -161.5°C , na takav način prirodni plin se ukapljuje. Takav niskotlačni dušik ide dalje prema vrhu izmjenjivača topline gdje hladi visokotlačni dušik koji je izašao iz trećeg stupnja kompresora te se nalazi na temperaturi od 42°C . Niskotlačni dušik je preuzeo na sebe toplinu i ide natrag prema prvom stupnju kompresora.

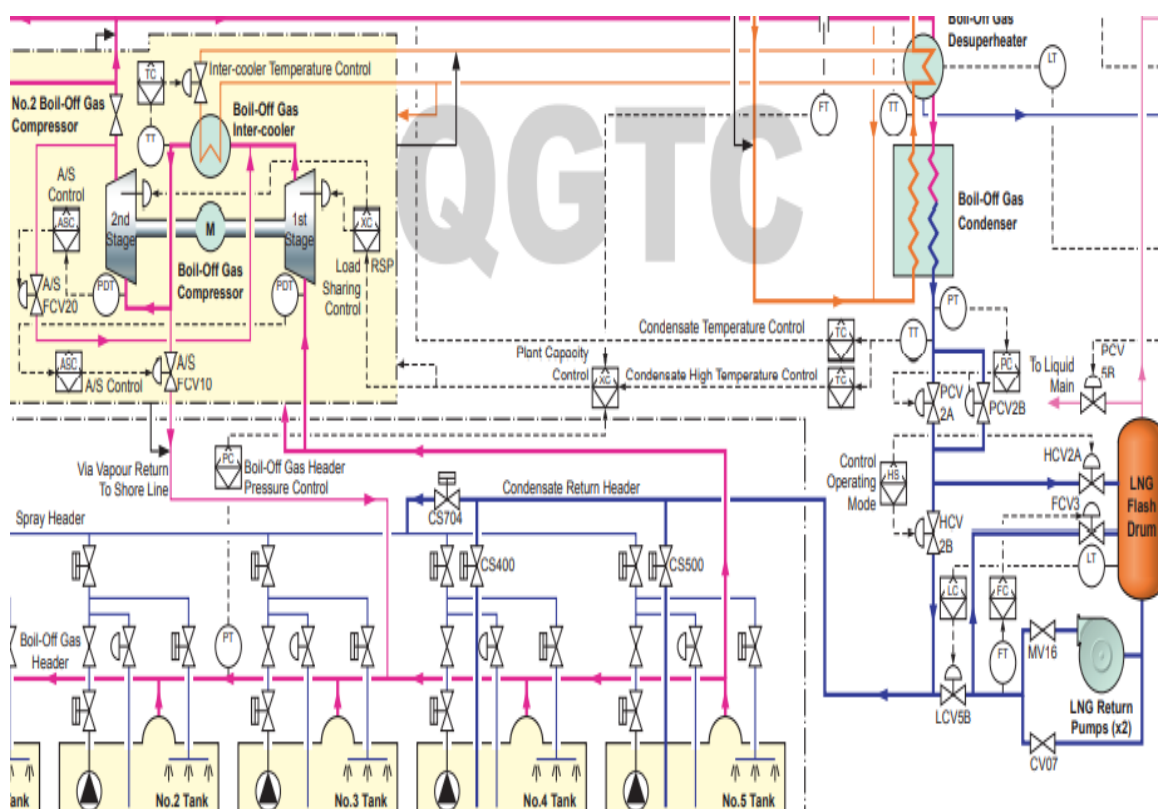


Shema 3. Sustav rashladnog dušika na brodu Al Mafyar [18]

Kroz cijelo vrijeme isti dušik cirkulira sustavom jer se radi o zatvorenom sustavu ukapljivanja. Kod povećanog opterećenja komandera potrebne su veće količine dušika. Tad se dušik preko kompresora dušika šalje iz *buffer* tanka u *seal gas buffer* tank i u *nitrogen drum* otvaranjem PCV 55 ventila. Iz *nitrogen drum*-a dušik se šalje u sustav rashladnog dušika otvaranjem PCV 54 ventila. Tlak u *nitrogen drum*-u ne smije prelaziti vrijednost od 3,160 kPa. Prije usisa kompresora dušika nalazi se sušioc koji čisti i suši dušik kako ne bi došlo do oštećenja kompresora, a kasnije i cijelog sustava dušika.

5.3. TOK ISPARENOG PLINA

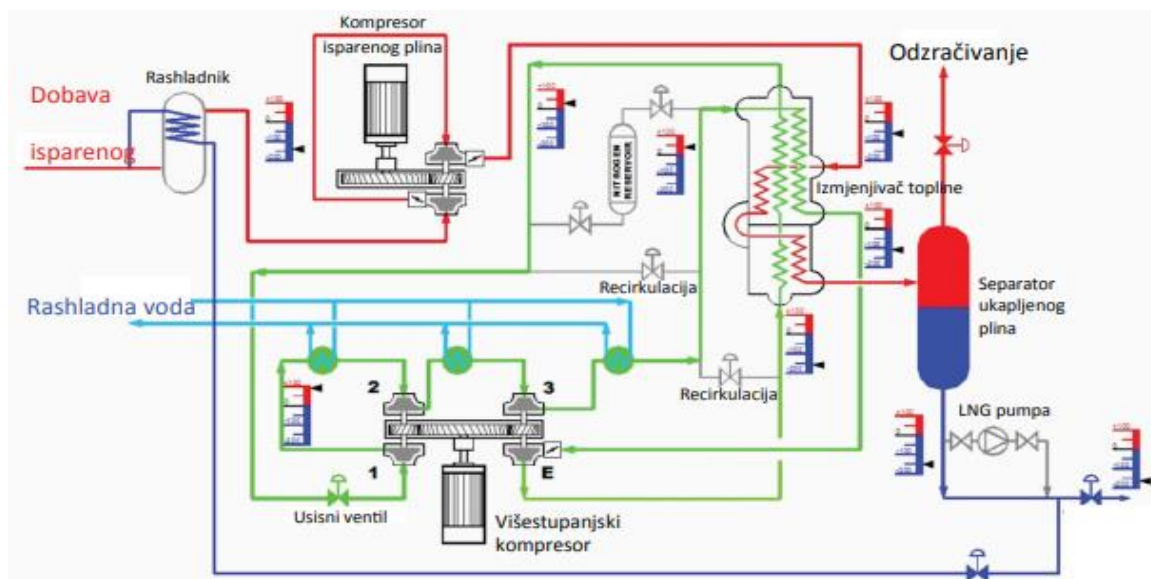
Ispareni plin iz tankova tereta ide u prvi stupanj kompresora isparenog plina (eng. BOG compressor) pri temperaturi oko -106°C , nakon prvog stupnja kompresije plin se ugrije te se mora ohladiti u međuhladnjaku (eng. *Boil-Off Gas Inter-cooler*) kroz koji prolazi hladni niskotlačni dušik koji je izašao iz rashladne kutije te se nalazi na temperaturi oko -110°C . Nakon što se ispareni plin pothladi, ulazi u drugi stupanj kompresora pri temperaturi oko -124°C i tlaku 264 kPa. Izlaskom plina iz drugog stupnja kompresora plin se stlačio na 602 kPa i nalazi se na temperaturu od -66°C . Ispareni plin ulazi sa vrha rashladne kutije odnosno izmjenjivača topline i hladi se niskotlačnim dušikom koji je izašao iz ekspanzijske turbine te se nalazi na temperaturi nižoj od -163.5°C . Ispareni plin se prolaskom prema dnu (na dnu je najniža temperatura) rashladne kutije hladi na temperaturu ispod -160°C te izlazi iz nje u tekućem stanju. LNG ulazi u *flash drum* gdje se pri vrhu stvara para koja se sastoji od plinova koji se ne mogu ukapljiti (dušik) pa se te pare odvođe do uređaja za spaljivanje (GCU), na dnu *flash drum*-a nalazi se LNG koji se pumpama šalje natrag u tankove tereta.



Shema 4. Krug isparenog plina na brodu Al Mafyar [18]

Sljedeća shema 5. prikazuje Mark III sustav za reukapljivanje koji se razlikuje po nekim stvarima od sustava prikazanog u shemi 4. U ovom sustavu plin se prije ulaska u kompresor isparenog plina hladi u pothlađivaču isparenog plina kroz koji prolazi LNG koji

je doveden preko *sprey* linije iz tankova tereta u rashladnik. Druga razlika je što se plin nakon izlaska iz rashladne kutije šalje u separator u kojem se odvajaju plinovi koji se ne mogu ukapljiti. Ukapljeni se plin šalje u tankove tereta uz pomoć LNG pumpe, osim u slučaju kad kompresori isparenog plina rade dovoljno visok tlak u separatoru koji može savladati tlak u tankovima tereta. Plin koji se ne može ukapljiti izlazi na vrhu separatora i ide prema GCU uređaju.



Shema 5. Mark III sustav ukapljivanja tereta [17]

Upravljački sustav postrojenja za ukapljivanje prirodnog plina predstavlja njegov najsloženiji dio. Funkcija ovoga sustava je upravljanje radom postrojenja s obzirom na stanje isparenog prirodnog plina (temperaturu, protok, sastav plina i tlak u tanku tereta) sve u svrhu kako bi postrojenje ispravno funkcioniralo bez nadzora (automatski) za vrijeme plovidbe. Zbog toga sve operacije u postrojenju za ukapljivanje prirodnog plina moraju biti potpuno automatizirane. Upravljački sustav automatski prebacuje na određeni režim rada, koji odabire na temelju ispravnosti sustava i tlaka u tanku tereta koji ovisi o trenutnoj količini isparenog plina. [16]

5.3.1 Mod pripravnosti

U ovom načinu rada sustav za ukapljivanje priprema se za rad na način da se LNG ne šalje u tankove. Krug rashladnog dušika je u pogonu i hladi ispareni prirodni plin koji prelazi u tekuće stanje u separatoru. Rad sustava u pripravnosti postignut je tek kada tekući plin u separatoru dosegne minimalnu razinu tekućine, nakon čega se zatvara ventil koji propušta ispareni plin u izmjenjivač toplote. Pokretanje iz toplih uvjeta zahtijeva da dio iz

izmjenjivača topline u kojem se hladi ispareni plin, ima slobodan dotok isparenog plina iz tankova tereta kako bi se povećala razina kapljevine u separatoru. [17]

5.3.2 Normalno ukapljivanje

Ovaj način se koristi kad se tlak u tankovima može regulirati sa jednim BOG kompresorom i sa jednim kompanderom dušika. BOG kompresor osigurava dovoljan tlak u separatoru pa nije potrebno paliti LNG transfer pumpe za povrat LNG-a u tank. Ako sustav dušika nema dovoljan kapacitet uključuje se GCU uređaj kako bi paralelno radio sa sustavom hlađenja dušikom sve dok se ne postigne potreban kapacitet. [2,16]

5.3.3 Rad sustava u slučaju velike količine isparenog plina

Zbog povećanog tlaka u tankovima potrebno je pokrenuti oba BOG kompresora, višak isparenog plina koji kapacitet kompresora ne može „pratiti“ šalje se u GCU uređaj. Ako GCU nije u mogućnosti sagorjeti sav višak plina, tada se plin mora ispuštati u atmosferu.

5.3.4 Mod niskog protoka isparenog plina

Kod manjeg BOR-a nije potrebno koristiti BOG kompresor pa zbog niskog tlaka u separatoru nije potrebno koristiti ni LNG pumpu za prebacivanje LNG-a u tankove tereta.

5.3.5 Djelomično ukapljivanje

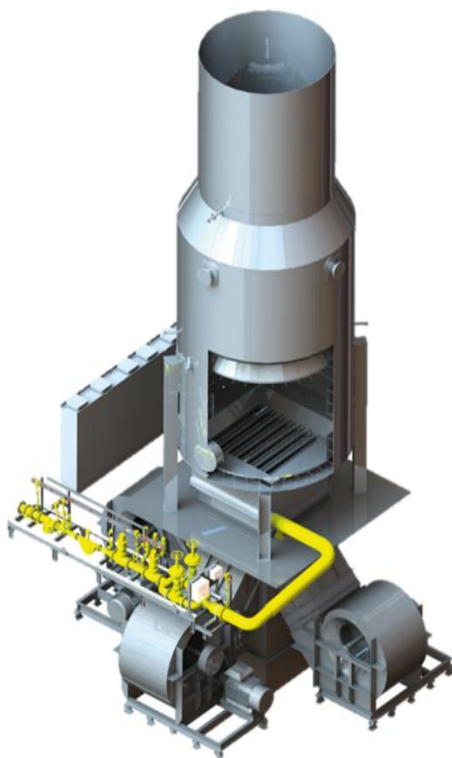
Ovakav način upotrebljava se kada teret sadrži veću količinu dušika. Pare neukapljenih plinova koje se nalaze u separatoru vraćaju se u tankove ako je tlak u tankovima tereta nizak ili se izgaraju u GCU uređaju ako je tlak visok. [16]

6. SPALJIVANJE I ISPUŠTANJE ISPARENOG TERETA U ATMOSFERU

Brodovi koji ne koriste ispareni dio tereta za pogon strojeva moraju biti opremljeni spaljivačem tereta kako bi mogli regulirat tlak u tankovima. Brodovi koji imaju sustav ponovnog ukapljivanja također moraju biti opremljeni sa spaljivačem u slučaju da sustav zakaže. Krajnja mjera za sprječavanje visokog tlaka u tankovima je ispuštanje isparenog tereta u atmosferu.

6.1. SPALJIVAČ TERETA (eng. GCU)

Svrha uređaja za spaljivanje plina je sigurno spaljivanje tereta kad je sustav za ponovno ukapljivanje preopterećen ili u kvaru, ili u slučaju kad motori i generatori pare ne uspijevaju sagorjeti sav ispareni plin. U oba slučaja može doći do povećanja tlaka unutar teretnih tankova pa koristimo GCU za spaljivanje viška plina kako tlak u tanku ne bi prelazio propisane vrijednosti. Uređaj je dizajniran tako da se u nekoliko minuta može pokrenuti do punog kapaciteta.



Slika 10. Uređaj za spaljivanje plina [20]

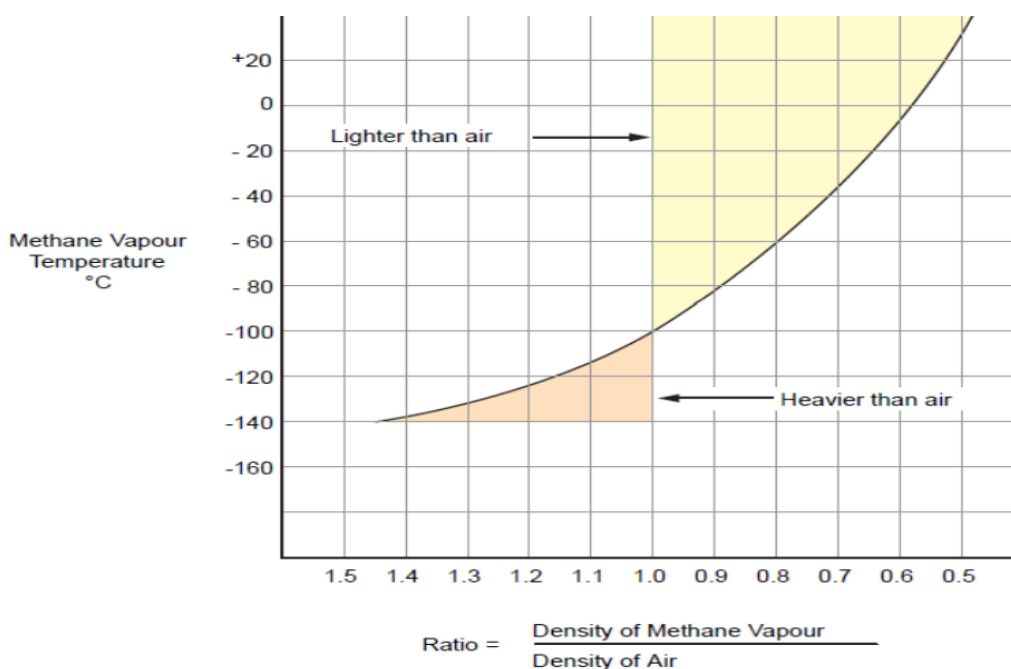
Spaljivač tereta kontrolira se automatski i ručno te prima informacije od sustava za ukapljivanje, ovisno o tim informacijama odnosno režimima rada GCU se pali ili gasi te tako nadopunjuje sustav reukapljivanja koji ima prioritet nad GCU uređajem. GCU ima prioritet u odnosu na sustav reukapljivanja u modu s spaljivačem plina kad krug rashladnog dušika nije u funkciji pa se ispareni plin zbog nemogućnosti ponovnog ukapljivanja mora spaljivati. [16,19]

Spaljivanje isparenog plina obavlja se preko *dual-fuel* plamenika koji se sastoji od plamenika za paljenje goriva i plamenika koji izgara ispareni plin. Plamenik za paljenje goriva koristi dizel gorivo koje se preko pumpi šalje u plamenik pri tlaku od 30 bara, plamenik se opskrbljuje i komprimiranim zrakom koji služi za raspršivanje goriva. Plamenik za paljenje plina ima oblik plinske mlaznice obložene u prstenastu cijev kroz koju prolazi otpadni neukapljeni plin koji se naknadno koristi za izgaranje. Niz mlaznica radijalno se šire oko plamenika, služe za dobavu isparenog plina u plamenik za izgaranje. Dobava zraka za izgaranje obavlja se uz pomoć dva ventilatora pri punom opterećenju. Kako bi temperatura dimnih plinova bila u dozvoljenim granicama, dva ventilatora dostavljaju dodatni zrak u komoru za sagorijevanje te se miješaju sa dimnim plinovima i tako smanjuju temperaturu. Postoje i dva ventilatora za otplinjavanje akumuliranog isparenog plina iz kućišta plinskog ventila. Upravljanje plamenikom je dio sustava koji automatski prati i kontrolira plamenik i njegovu opremu potrebnu za sigurno pokretanje i isključivanje paljenja goriva u ispravnom radu za GCU, postoje 3 različita načina upravljanja sustavom[19]:

- Način ukapljivanja - GCU se automatski upravlja kontrolnim signalom koji dolazi iz sustava za ukapljivanje za postupke pokretanja, paljenja i isključivanja. [19]
- GCU način rada- ručno se upravlja iz upravljačke sobe teretnim sustavima (*eng. cargo control room*), operater ima primarnu odgovornost za postupke paljenja, pokretanja i isključivanja. [19]
- Način prirodnog propuhivanja - koristi se za spaljivanje manje količine plina iz sustava za ukapljivanje. Ovaj način se odabire samo kad sustav djeluje u GCU modu i ventilatori zraka za izgaranje i razrjeđivanje djeluju u prisilnom načinu rada s isparenim plinom. Kod ovog načina rada svo prisilno izgaranje i ventilatori zraka za razrjeđivanje su automatski zaustavljeni. Tada su zabranjene automatske kontrolne naredbe iz sustava za ukapljivanje.[16,19]

6.2. ISPUŠTANJE ISPARENOG PLINA U ATMOSFERU

U slučajevima kad se visoki tlak u tankovima ne može riješiti izgaranjem plina u porivnim strojevima, izgaranjem u spaljivaču tereta i reukapljivanjem, tada je posada primorana ispustiti taj plin u atmosferu. Svaki tank na sebi ima dva odušna ventila koja u slučaju povećanja tlaka iznad 25 kPa(g) automatski otvaraju i ispuštaju plin u atmosferu. Sigurnosni ventili ispuštanja (*relief valves*) su spojeni na kupole tanka tereta, cjevovodima se spajaju na odušni toranj (*vent riser*). Odušnici su putem tornja podignuti na sigurnu visinu kako bi se spriječio ulazak isparenih para tereta u prostorije posade i ostale sigurnosne zone.



Slika 11. Gustoća i temperatura ukapljenog i isparenog plina [3]

Zbog jako niske temperature plina i veće gustoće od okolnog zraka taj plin će snažno evaporirati i kondenzirati vodenu paru koja se nalazi u zraku, kondenzacija će dovesti do pojave bijelog oblaka koji će se zadržavati na razini mora sve dok ne primi toplinu od okolnog zraka. Prirodni plin je lakši od zraka na temperaturama višim od približno -110°C (ovisi o sastavu plina) te se takav plin neće zadržavati u razini broda nego će sve pare plina brzo povezati sa molekulama u zraku i nestati u atmosferi. Iz tog razloga ispareni plin na brodovima se zagrijava u isparivačima plina na temperaturu sto bližu okolnoj kako ne bi došlo do pojave bijelog oblaka i zadržavanje plina u razini broda. Bitno je naglasiti kako se ova operacija izvodi u krajnjem slučaju kad ne možemo spriječiti povećanje tlaka u tankovima. [3]

7. ZAKLJUČAK

Odabrao sam ovu temu kako bi se što više upoznao sa postupcima i načinima iskorištavanja isparenog plina koji se provode na LNG brodovima. Istraživanjem ove teme te uvidom u *cargo manual* broda Al Mafyar detaljno sam upoznao većinu sustava koji se u nekim segmentima znatno razlikuju od drugih LNG brodova. Smatram da je bitno poznavati samu strukturu i princip rada sustava koji je na svim brodovima približno isti. Poznajući teoretski pristup rada te samih struktura sustava na LNG brodovima, kasnije u praksi puno se lakše prilagoditi ostalim izvedbama sustava na drugim brodovima. Svakako se može očekivati daljnje razvijanje ovakvih sustava na LNG brodovima kako bi se posada i okolina dovela u što manju opasnost, te kako bi se iskoristivost svih sustava podigla na višu razinu. U shemi 1. i shemi 2. prikazao sam i opisao sustav koji ima svaki LNG brod kako bi se mogao kontrolirati tlak u tankovima tereta, i on je jako sličan na svim LNG brodovima. Najviše pažnje sam posvetio sustavu reukapljivanja za kojeg smatram da je najstroženiji od svih sustava te ga nemaju svi LNG brodovi. Izvedbe takvog sustava često se razlikuju od broda do broda, zato sam detaljno objasnio sustav reukapljivanja sa broda Al Mafyar uz pomoć *cargo manuala* i sustav Mark III kako bi se uočile razlike.

LNG pogon postaje sve više isplativ zbog velikog porasta cijene teškog goriva. Korištenje prirodnog plina je i dalje puno ekonomičnije i puno ekološki prihvatljivije ne samo za brodove nego i za termoelektrane. Iz tog razloga novoizgrađeni brodovi počinju koristiti sustave sa motorima koji koriste dizel i prirodni plin. Svi veliki europski industrijski gradovi su također počeli s korištenjem prirodnog plina za industrijske svrhe samo je pitanje mogu li izdržati sankcije koje je Europska Unija uvela prema Rusiji zbog rata s Ukrajinom. Rat je uzrokovao porast cijena plina za čak 10 puta, pa će SAD u vrlo kratkom vremenu postati najveći izvoznik LNG-a u svijetu zbog sankcija koje je Europa uvela prema Rusiji. Sve to može dovesti do povećanja LNG brodova koji će prevoziti plin za potrebe Europskih država. Sve ovo dovelo je do toga da LNG brodovi nikad nisu bili traženiji zbog porasta potražnje i vozarine. Potražnjom brodova raste i potražnja za posadom pa se nadam da će mi ovo moje istraživanje uvelike pomoći u snalaženju i razumijevanju ovakvih sustava, ako u budućnosti budem plovio na brodu za prijevoz ukapljenog plina.

LITERATURA

- [1] Saratlija, M. 2015 'Sustav za ponovno ukapljivanje tereta na LNG brodovima', Online: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:164:576074> (2.4.2022.)
- [2] Škapul, M. 2017 'Ukapljivanje LNG-a', online: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:187:520399> (2.4.2022.)
- [3] Sumner, M. 2015 'TEHNOLOGIJA PRIJEVOZA UKAPLJENIH PLINOVA MOREM', Pomorski fakultet Sveučilišta u Rijeci, Rijeka.
- [4] Hrvatin, J. 2021 'Uporaba LNG-a kao brodskog goriva', online: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:187:308045> (17.3.2022.)
- [5] Dobrota Đ., Lalić B., Komar I. 'Problem of Boil - off in LNG Supply Chain', online <file:///C:/Users/KARLO/Desktop/ZAVR%C5%A0NI/BOIL%20OFF%20I%20OSNOVNO%20O%20METANU/lng%20za%20zavrshi.pdf> (20.3.2022)
- [6] Głomski, P. Michalski, R 'PROBLEMS WITH DETERMINATION OF EVAPORATION RATE AND PROPERTIES OF BOIL-OFF GAS ON BOARD LNG CARRIERS', online: <file:///C:/Users/KARLO/Desktop/ZAVR%C5%A0NI/BOIL%20OFF%20I%20OSNOVNO%20O%20METANU/014.pdf> (20.3.2022)
- [7] Miglore C., Tubileja C., Vesović V., 2015 'Weathering prediction model for stored liquefied natural gas (LNG) ' online: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1875510015300202#undfig1> (25.3.2022)
- [8] Izradio student Karlo Vrsaljko na temelju 'Cargo operating manual LNGC Disha (H2210)', online: H2210 LNGC Disha Cargo Operating Manual 34555 2.pdf (15.4.2022.)
- [9] Whitehead, L. 2016 'Flammable Cryogenic Liquid Carriers', online: <https://silo.tips/download/flammable-cryogenic-liquid-carriers> (15.4 2022.)
- [10] Nader, P. 2019 'ENVIRONMENTAL AND COST-EFFECTIVENESS COMPARISON OF DUAL FUEL PROPULSION OPTIONS FOR EMISSIONS REDUCTION ONBOARD LNG CARRIERS', online: <file:///C:/Users/KARLO/Desktop/ZAVR%C5%A0NI/REUKAPLJIVANJE,MOTORI/mot ori.pdf> (15.4.2022.)
- [11] Kralj, P. 2017 'BRODSKI ENERGETSKI SUSTAVI', Pomorski fakultet Sveučilišta u Rijeci, Rijeka.

- [12] Tu Huan, Fan Hongjun, Lei Wei and Zhou Guoqiang, 'Options and Evaluations on Propulsion Systems of LNG Carriers',
online: <file:///C:/Users/KARLO/Desktop/ZAVR%C5%A0NI/REUKAPLJIVANJE,MOTORI/motoriii.pdf> (16.4.2022.)
- [13] Jurišić, V. 2020 'IGF Pravilnik i uporaba LNG-a kao brodskog goriva',
online: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:155:948329> (4.5.2022)
- [14] Stanivuk, T., Mahić, J., Stazić, L. 2021, 'LNG MARKET AND FLEET ANALYSIS', University of Split, Faculty of Maritime Studies,
online: <file:///C:/Users/KARLO/Desktop/ZAVR%C5%A0NI/usporedba%20motora.pdf>
- [15] Wikipedija, online: <https://hr.wikipedia.org/wiki/Metan> (5.5.2022)
- [16] Kukuljan, D., Bernečić, D., Orović, J. 2012, 'OPRAVDANOST UGRADNJE I PRINCIP RADA UREĐAJA ZA PONOVO UKAPLJIVANJE PRIRODNOG PLINA NA BRODU', Sveučilište u Rijeci /Pomorski fakultet u Rijeci, online: <file:///C:/Users/KARLO/Desktop/ZAVR%C5%A0NI/REUKAPLJIVANJE,MOTORI/REUAPLJIVANJE.pdf> (7.5.2022)
- [17] Rukavina, L. 2017, 'Sustavi ukapljivanja na LNG brodovima',
online: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:187:950395> (8.5.2022)
- [18] Al Mafyar 'CARGO OPERATING MANUAL', Nakilat (9.5.2022)
- [19] Tijan, M. 2018, 'Izgaranje tereta na LNG brodu',
online: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:187:898497> (15.5.2022)
- [20] online: <https://www.saacke.com/marine/product-overview-marine/gas-combustion-unit-gcu> (22.5.2022)
- [21] Izradio student Karlo Vrsaljko na temelju Głomski, P. Michalski, R 'PROBLEMS WITH DETERMINATION OF EVAPORATION RATE AND PROPERTIES OF BOIL-OFF GAS ON BOARD LNG CARRIERS'.
Online:
<file:///C:/Users/KARLO/Desktop/ZAVR%C5%A0NI/BOIL%20OFF%20I%20OSNOVNO%20O%20METANU/014.pdf>

POPIS TABLICA

Tablica 1. Sastav prirodnog plina [1]	2
Tablica 2. Toplinska vodljivost materijala [21].....	7
Tablica 3. Karakteristike tankova [21].....	8
Tablica 4. Emisije različitih vrsta goriva nakon izgaranja [4]	20

POPIS SLIKA

Slika 1. Zapaljivost metana [9]	3
Slika 2. Isparavanje tereta u odnosu na sadržaj dušika [7]	7
Slika 3. Dnevni gubitak tereta zbog isparavanja na brodovima različitog kapaciteta i različitog BOR-a u balastnom putovanju [6]	9
Slika 4. Isparavanje tereta u odnosu na dane putovanja [6]	11
Slika 5. Modificirano pogonsko postrojenje s parnom turbinom (UST) [12]	15
Slika 6. DFDE postrojenje [4]	16
Slika 7. ME-GI pogonsko postrojenje [13]	17
Slika 8. XD-F propulzijsko postrojenje [4]	19
Slika 9. Braytonov rashladni sustav dušika [18]	24
Slika 10. Uređaj za spaljivanje plina [20]	30
Slika 11. Gustoća i temperatura ukapljenog i isparenog plina [3]	32

POPIS SHEMA

Shema 1. Tok isparenog plina iz tanka prema strojarnici prilikom prirodnog isparavanja (natural boil off) [8]	12
Shema 2. Stvaranje dodatnog plina i slanje prema strojarnici (forced boil off) [8]	14
Shema 3. Sustav rashladnog dušika na brodu Al Mafyar [18]	26
Shema 4. Krug isparenog plina na brodu Al Mafyar [18]	27
Shema 5. Mark III sustav ukapljivanja tereta [17]	28