

# Konstruktivske karakteristike brodova za transport ukapljenog prirodnog plina

---

**Valčić, Karlo**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2023**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:162:496582>

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

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



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

*Repository / Repozitorij:*

[University of Zadar Institutional Repository](#)



Sveučilište u Zadru

Pomorski odjel - Brodostrojarški odsjek  
Preddiplomski sveučilišni studij brodostrojarstva i tehnologije pomorskog prometa  
(jednopedmetni-izvanredni)

**Karlo Valčić**

**Konstruktivske karakteristike brodova za transport  
ukapljenog prirodnog plina**

**Završni rad**

Zadar, 2023.

Sveučilište u Zadru

Pomorski odjel - Brodostrojarški odsjek

Preddiplomski sveučilišno studij brodostrojarstva i tehnologije pomorskog prometa (jednoprredmetni-  
izvanredni)

Konstrukcijske karakteristike brodova za transport ukapljenog prirodnog plina

Završni rad

Student/ica:

Karlo Valčić

Mentor/ica:

izv. prof. dr. sc. Marko Valčić

Zadar, 2023.

## Sadržaj

<b>1. Uvod</b> .....	1
<b>2. Osnovne značajke plinske industrije</b> .....	2
2.1. <i>Prirodni plin</i> .....	2
2.2. <i>Proizvodnja i skladištenje prirodnog plina</i> .....	4
2.3. <i>Transport ukapljenog prirodnog plina</i> .....	8
<b>3. Skladištenje i zadržavanje tereta na brodovima za transport ukapljenog prirodnog plina</b> .....	11
3.1. <i>Sustav zadržavanja tereta</i> .....	12
3.2. <i>Samonosivi spremnik tipa 'B'</i> .....	13
3.3. <i>Membranski sustav zadržavanja</i> .....	14
3.4. <i>Moss sustav zadržavanja tereta</i> .....	16
3.5. <i>IHI SPB spremnik</i> .....	17
<b>4. Konstrukcijske karakteristike membranskih i sferičnih tankova za transport ukapljenog prirodnog plina</b> .....	18
4.1. <i>Membranski tankovi</i> .....	18
4.2. <i>Sferični tankovi</i> .....	25
<b>5. Tipične izvedbe brodova za transport ukapljenog prirodnog plina</b> .....	28
5.1. <i>Brod sa sferičnim tankovima</i> .....	28
5.2. <i>Brod s membranskim tankovima</i> .....	32
5.2.1. <i>Sustav kontrole tlaka u spremniku tereta</i> .....	33
5.2.2. <i>Oštećenja i ostali oblici narušavanja strukturnog integriteta konstrukcije tanka</i> .....	34
<b>6. Zaključak</b> .....	36
<b>Popis literature</b> .....	37
<b>Popis slika</b> .....	38
<b>Popis tablica</b> .....	39
<b>Sažetak</b> .....	40

**Summary.....41**

## 1. Uvod

Tema ovog završnog rada su konstrukcijske karakteristike brodova za transport ukapljenog prirodnog plina. Rad je napisan u šest poglavlja s pripadajućim potpoglavljima. Prvo poglavlje je uvodno.

Drugo poglavlje prikazuje osnovne značajke plinske industrije te također sadrži tri potpoglavljia koja govore o ukapljenom prirodnom plinu, proizvodnji i skladištenju ukapljenog prirodnog plina te transportu ukapljenog prirodnog plina. Također u ovim poglavljima prikazane su pripadajuće slike i jedna tablica vezane uz prirodni plin, skladištenje ukapljenog prirodnog plina i njegov transport.

Treće poglavlje prikazuje vrste brodova za prijevoz ukapljenog prirodnog plina, sustave zadržavanja, njihove osnovne karakteristike, njihovu svrhu i njihovu podjelu. Brodovi za transport ukapljenog prirodnog plina su specijalizirani brodovi za transport ukapljenog prirodnog plina pod odgovarajućim tlakom i temperaturom, dok se pod sustavima zadržavanja tereta podrazumijeva izgrađena konstrukcija u kojoj se skladišti teret odnosno ukapljeni prirodni plin. Ovo poglavlje ima pet potpoglavljia koja prikazuju vrste sustava zadržavanja tereta: samonosivi spremnik tipa B, membranski sustav zadržavanja pod koje spadaju Gaztransport i Technigaz sustavi zadržavanja, Moss sustav zadržavanja i IHI SPB sustav zadržavanja tereta.

Četvrto poglavlje, ujedno i najznačajnije u kontekstu teme rada, obuhvaća konstrukcijske karakteristike sferičnih i membranskih tankova za transport ukapljenog prirodnog plina. Poglavlje pobliže ukazuje na izbor materijala, izolaciju spremnika, unutarnje i vanjske slojeve tanka, fizikalne karakteristike, termo-mehanička naprezanja, čvrstoću i deformaciju strukture.

U petom poglavlju su prikazane studije slučaja brodova za transport ukapljenog prirodnog plina. U ovom poglavlju ukazuje se na neke od karakteristike tipične za sferične i membranske tankove, kao što su npr. detekcija curenja plina, operacija rukovanja teretom, oprema za teret, plovidba s teretom, tlakovi i oštećenja.

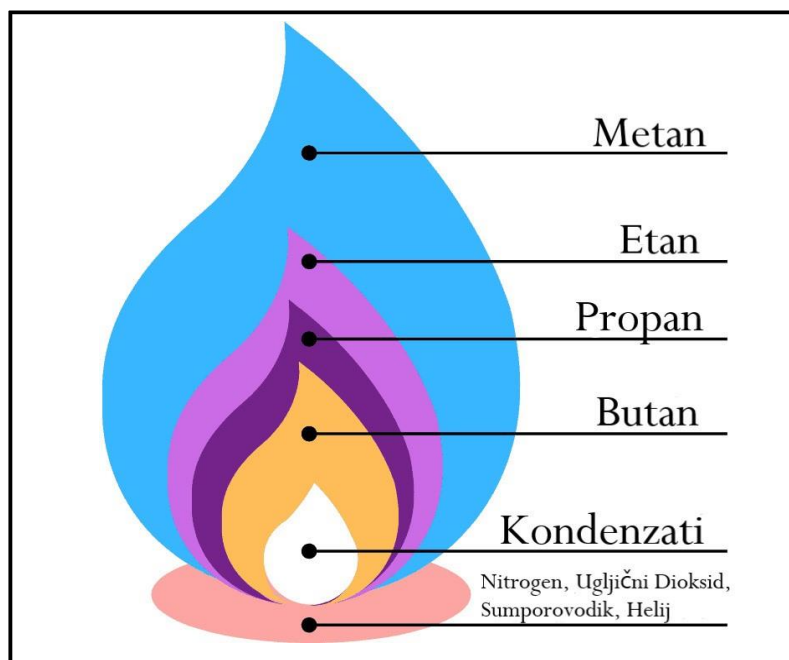
U šestom, ujedno i posljednjem poglavlju, istaknuti su najbitniji zaključci rada, nakon čega još slijede popisi literature, slika i tablica te sažetci na hrvatskom i engleskom jeziku uz odgovarajuće ključne riječi.

## 2. Osnovne značajke plinske industrije

### 2.1. Prirodni plin

Osnovno poznavanje prirodnog plina mora započeti ispitivanjem njegovih kemijskih i fizikalnih svojstava, što je preduvjet za dovoljno točnu procjenu potencijalnih opasnosti i rizika. Svojstva prirodnog plina ovise o njegovom sastavu, koji ovisi o izvoru ležišta originalnog plina i povijesti njegove obrade, tj. frakcioniranja.

Dok je ukapljeni prirodni plin pretežito metan (87-99 %), njegov sastav uključuje i druge više ugljikovodike, C<sub>2</sub>-C<sub>4</sub> i teže, u tragovima dušik i sumpor u CO<sub>2</sub> (Slika 1.) [2]. Ukapljeni prirodni plin (engl. Liquefied Natural Gas, LNG) je kriogena tekućina bez mirisa, boje i nekorozivan je pri normalnom atmosferskom tlaku. Kada se ukapljeni prirodni plin isparava, i koristi kao pogonsko gorivo stvara vrlo niske emisijske plinove i znatno niže emisije ugljika za razliku od drugih ugljikovodičnih goriva. Produkti izgaranja ukapljenog prirodnog plina gotovo ne sadrže nikakve sumporne okside i nisku razinu dušikovih oksida što ukapljeni prirodni plin čini praktički čistim izvorom energije. Također je i netoksičan.



Slika 1. Sastav prirodnog plina. [2]

Međutim, kao kod drugih plinovitih materijala, ispuštanje prirodnog plina odnosno interakciju s plinom može uzrokovati gušenje u neprovjetrenom, zatvorenom prostoru, a može se i zapaliti ako se kontaminira s zrakom, tj. s kisikom. Vrelište prirodnog plina varira o njegovom sastavu, no najčešće je oko  $-162\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Gustoća prirodnog plina obično pada između  $430\text{ kg/m}^3$  i  $470\text{ kg/m}^3$  što je manje od polovine gustoće vode. Ako se prirodni plin prolije po vodi, plutat će na vrhu te brzo ispariti jer je lakši od vode. Međutim, kako se plinske pare počinju zagrijavati u okolini i dosežu temperature od približno  $-110\text{ }^{\circ}\text{C}$ , gustoća para je lakša od zraka i pare postaju plutajuće. Veća je mogućnost da će se hladne pare prirodnog plina akumulirati u niskim područjima dok se pare ne zagriju. Ispuštanjem prirodnog plina u zatvorenim prostorima potisnut će zrak te taj prostor učiniti vrlo opasnim za disanje. Pare ispuštene iz prirodnog plina, ako nisu zadržane, pomiješat će se s okolnim zrakom i odnijeti niz vjetar, što stvara potencijalnu opasnost od stvaranja oblaka koji može postati zapaljiv i eksplozivan. Granice zapaljivosti su 5 % i 15 % volumena u zraku. Izvan ovog raspona, smjesa metan/zrak nije zapaljiva [1].

Kada koncentracija goriva prijeđe gornju granicu zapaljivosti, ono ne može gorjeti jer je prisustvo kisika premalo. To se može dogoditi, na primjer, u zatvorenom, sigurnom spremniku gdje je koncentracija para približna 100 % metana. Kada je koncentracija goriva ispod donje granice zapaljivosti, ne može gorjeti jer je prisutno premalo metana. Primjer je curenje male količine prirodnog plina u dobro prozračenom prostoru. U ovoj situaciji, pare ukapljenog prirodnog plina će se brzo pomiješati sa zrakom i rasipati se do koncentracije manje od 5 %. LNG industrija ima izvrsnu sigurnosnu evidenciju, što je rezultat niza čimbenika. Prvo, industrija je bila razvijena kako bi se osigurale sigurne i zaštićene operacije, od inženjerske do tehničke osposobljenosti osoblja. Drugo, fizikalna i kemijska svojstva ukapljenog prirodnog plina su dobro poznata i dizajn postrojenja je vrlo pouzdan što je dokazano dugogodišnjim radom bez ikakvih havarija. Treće, standardi, kodeksi i propisi koji su razvijeni za LNG industriju osiguravaju sigurnost i kontinuirano se razvijaju i poboljšavaju.





regeneraciju šalje se u jedinicu za regeneraciju sumpora, koja se obično sastoji od Clausove jedinice i jedinice za obradu isparenog plina. Ispareni plin se iz apsorbera spaljuje. Slatki plin iz jedinice za zaslađivanje plina mora se sušiti u jedinici za dehidraciju koristeći molekularna sita ispod 0,1 ppmv kako bi se izbjeglo stvaranje hidrata u jedinici za regeneraciju tekućeg prirodnog plina. Slatki plin je zasićen vodom, a u uvjetima vruće klime sadržaj vode može biti značajan. Uklanjanje većine vode prije prolaska do jedinica molekularnih sita je više energetski učinkovito i isplativo za prvu fazu hlađenja slatkog plina. Molekularno sito također može biti dizajnirano za uklanjanje merkaptana iz osušenog plina kako bi zadovoljio specifikaciju za sumpor. Tragovi žive prisutni su u dovodnom plinu, koji se moraju ukloniti na manje od 10 nanograma po kubičnom metru kako bi se izbjegla korozija žive nizvodno u kriogenim izmjenjivačima. Osušeni plin usmjerava se u jedinicu za oporavak tekućeg prirodnog plina, koja je dizajnirana za uklanjanje i obnovu C<sub>2</sub> ili C<sub>3</sub> ugljikovodike i proizvesti osiromašeni plin za ukapljivanje. Uklanjanje komponenata bi eliminiralo potrebu za pročišćavanjem u postrojenju za ukapljivanje, što se obično koristi za uklanjanje aromata i teških ugljikovodika kako bi se izbjeglo stvaranje voska u glavnom izmjenjivaču. Komponente tekućeg prirodnog plina, C<sub>3</sub> do C<sub>5</sub> tekućine, vrijedni su tržišni proizvodi. Propan i butan se izvoze zasebno ili kao kombinirani proizvod mješavine propan-butana. C<sub>5</sub> i teže komponente mogu se izvesti za miješanje benzina. Ako su merkaptani bili prisutni u napojnom plinu, pojavili bi se u C<sub>5</sub> tekućinama koje se moraju tretirati kako bi zadovoljile specifikaciju tekućine za sumpor.

#### b) Skladištenje ukapljenog prirodnog plina

LNG se skladišti pri atmosferskom tlaku u izoliranim spremnicima s dvostrukim stjenkama koji su dizajnirani za skladištenje tekućine na ekstremno niskim temperaturama. Izolacija je dizajnirana tako da minimizira prijelaz topline i da reducira nastanak smanjenja topline prilikom isparavanja tereta. Brzina isparavanja iz spremnika je oko 0,05 % volumno po danu. Kapacitet spremnika je obično 160000 m<sup>3</sup>, što odgovara veličini prosječnog broda za prijevoz ukapljenog prirodnog plina. Veliki spremnici kapaciteta od 200000 m<sup>3</sup> ili veći također se grade i mogli bi postati norma za noveterminale kako bi se više pogodovalo današnjim velikim LNG prijevoznima [1].

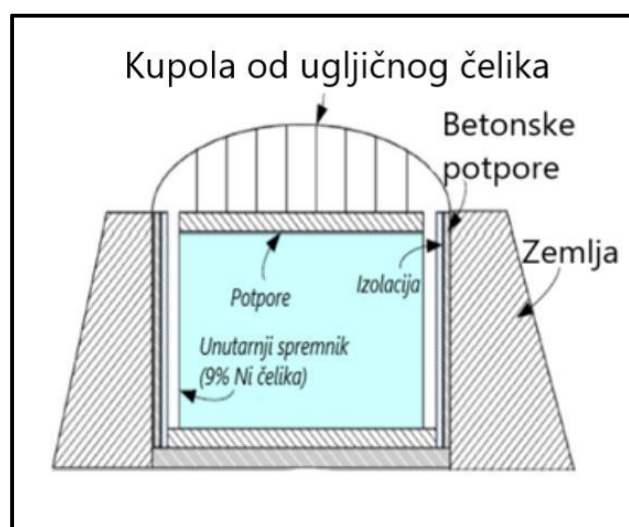
Tipični radni uvjeti LNG spremnika prikazani su u Tablici 1. LNG spremnici za skladištenje različitih dizajna koriste se diljem svijeta. Postoje dvije glavne vrste spremnika za LNG:

- Podzemni spremnici
- Nadzemni spremnici.

Podzemni spremnik (Slika 3.) sastoji se od membrane i izrađen je od nehrđajućeg čelika ili invara kojeg podupire poliuretanska pjenasta izolacija. Krov se sastoji od konstrukcije sačinjene od ugljičnog čelika u obliku kupole koja podupire viseću palubu izoliranu staklenom vunom. Podzemne spremnike razvio je Tokyo Gas Engineering ranih 1970-ih godina, na temelju ranijih projekata u Ujedinjenom Kraljevstvu, Sjedinjenim Državama i Alžiru, a kasnije su ih koristili i druge japanske tvrtke. Od 2005. godine u Japanu je postojao 61 podzemni spremnik. Rekord za najveći LNG spremnik u svijetu koji je postavljen podzemno veličine je od 200000 m<sup>3</sup>, iako su nedavno izgrađeni nadzemni spremnici sličnog kapaciteta [1].

Tablica 1. Radni uvjeti LNG spremnika [1].

Konstrukcijske karakteristike skladišnog LNG tanka s odgovarajućim radnim tlakovima	
Maksimalni projektirani tlak	30 kPa
Vakumski projektirani tlak	-1,5 kPa
Normalni radni tlak	10 kPa
Minimalni radni tlak	2,5 kPa
Maksimalni radni tlak	25 kPa

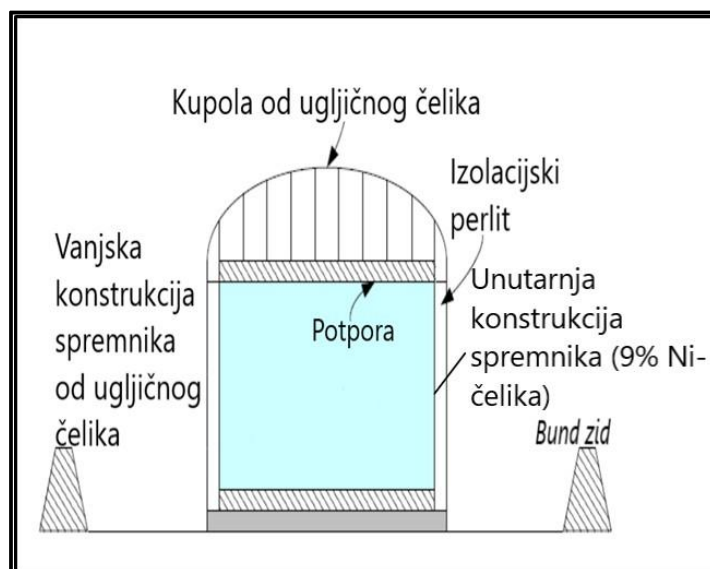


Slika 3. Podzemni LNG spremnik. [1]

Ovi spremnici su skuplji i potrebno im je više vremena da se izgrade u usporedbi s nadzemnim spremnicima. Otprilike 4 do 5 godina potrebno je za izgradnju podzemnog spremnika, a nadzemni spremnik potrebno je 3 godine. Najviše se primjenjuju u Japanu i Koreji jer je dobro zaštićen od potresa [1].

Nadzemni LNG spremnici (Slika 4.) imaju dva sloja zadržavanja. Primarno zadržavanje osigurava unutarnji spremnik koji sadrži LNG. Sekundarno zadržavanje osigurano je nasipima, branama oko skladišnih tankova ili izgradnjom drugog tanka oko primarnog skladišnog tanka koji će zaštititi primarni spremnik od oštećenja. Svi LNG spremnici za skladištenje konstruirani su s toplinskom izolacijom kako bi se smanjio prijenos topline od isparene pare i zaštitio materijale od ugljičnog čelika od postizanja kriogenih temperatura. Sustav zadržavanja dizajniran je u skladu s LNG kodeksima i standardima koji predviđaju smjernice za odabir materijala i projektne zahtjeve za LNG spremnike i drugu opremu na LNG postrojenjima. U osnovi postoje tri vrste spremnika kojise koriste za kopnene terminale:

- a) Jednostruki spremnik
- b) Dvostruki spremnik za zadržavanje
- c) Puni spremnik.



Slika 4. Nadzemni LNG spremnik. [1]

### *2.3. Transport ukapljenog prirodnog plina*

Prirodni plin postao je najbrže rastući izvor energije u svijetu u posljednjih 20 godina, potaknut niskom emisijom stakleničkih plinova te visokom energetsom učinkovitošću. Gotovo cijelo stoljeće, prirodni plin se transportirao s visokom razinom sigurnosti, pouzdanosti i ekonomičnosti putem cjevovoda. Cjevovodi su se potvrdili kao idealni izbor za opskrbu i za tržišne uvjete 20. stoljeća kada su veliki rezervoari prirodnog plina na pristupačnim mjestima. Cjevovodi su osiguravali stabilnost i sigurnost opskrbe i nastavljaju to činiti tamo gdje su preostale rezerve prirodnog plina. Međutim, postalo je jasno da su značajne količine prirodnog plina na vrlo nepristupačnim mjestima. U međuvremenu, pažnja se prenijela na velike rezerve plina za koje se smatralo manje pristupačnim ili skupim za daljnji razvoj i vađenje. Trenutno su u tijeku razmatranja za brojna rješenja kako bi se mogle iskoristi teže pristupačne rezerve prirodnog plina. S druge strane, u protekla tri desetljeća, samo industrija ukapljenog prirodnog plina uspješno je spojila daleka plinska polja s tržištem koja su nedostižna plinovodom (npr. Japan, Južna Koreja). Unatoč tome što je jedan od obilnijih izvora energije na planetu, više od jedne trećine globalnih rezervi prirodnog plina ostaju neiskorištene, a polja nerazvijena. Rastuća globalna potražnja za energijom, sve manji izvori nafte, porast cijene nafte, propisi o zabrani spaljivanja, te prednosti nižih emisija stakleničkih plinova od izgaranja prirodnog plina dovode do urgentnosti u potrazi za komercijalno isplativim tehnologijama za dugotrajni transport neiskorištenog plina na velike udaljenosti. Tijekom posljednja dva desetljeća razvijene su i predložene različite tehnologije za unovčavanje sada udaljene rezerve plina.

Postoje neke od opasnosti prilikom transporta i skladištenja prirodnog plina. Sustavi za transport i skladištenje prirodnog plina mogu stvoriti različita zagađenja i sigurnosne probleme te ih treba pažljivo nadzirati, pregledavati i kontrolirati kako bi se izbjeglo istjecanje i emisija opasnog prirodnog plina. Skladišta plina mogu biti podvrgnuta značajnim varijacijama u tlaku plina i stresnim uvjetima skladištenja kao rezultat čestog utiskivanja. Česti nadtlak i podtlak skladišnog prostora plina mogu uzrokovati starenje, zamor i razne druge vrste oštećenja skladišta, stvarajući i povećavajući mogućnost curenja plina i popratnih opasnosti. S točke skladištenja plina, iscrpljeni rezervoari, vodospreme i slane kupole često sadrže prirodne nedostatke, uključujući prirodne pukotine i rasjede, koji mogu omogućiti nesmetano curenje plina. Curenje i nakupljanje u blizini površine tla velikih količina plina iz skladišta stvaraju potencijalno opasne situacije, poput požara

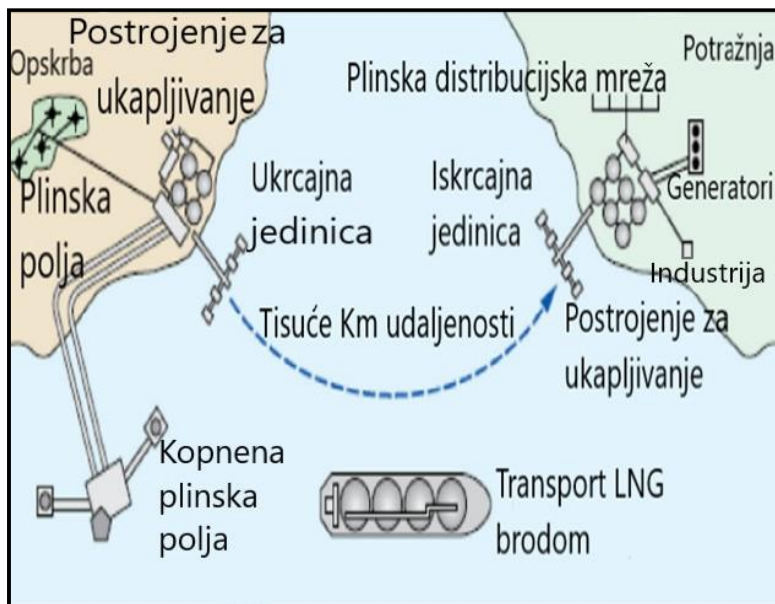
i eksplozija, te probleme onečišćenja okoliša, uključujući štetne mirise i druge zdravstvene opasnosti. Ipak, curenja plina iz podzemnih skladišta su prirodna i neizbježna te ih treba pažljivo pratiti kako bi se izbjegle potencijalne opasnosti po zdravlje i sigurnost.

Nepristupačne količine plina na tržište dolaze primarno putem dvije već uspostavljene tehnologije, tj. oko 70 % plina kojim se trguje međunarodno se izvozi cjevovodom, a ostalih 30 % ukapljenim prirodnim plinom. Za kratke udaljenosti plinovodi su obično ekonomičniji. LNG je konkurentan za rute na velikim udaljenostima, posebno one koje prelaze oceane ili druge vode, budući da je cijena izgradnje podmorskih cjevovoda obično previsoka. Kada se prirodni plin ohladi na približno  $-160\text{ }^{\circ}\text{C}$  pri atmosferskom tlaku, kondenzirana tekućina je LNG. Smanjenje volumena je oko 1/600 volumena prirodnog plina. Kondenzirani oblik LNG-a transportira se putem teretnih brodova ili kamiona/vlakova. Za transport plina na velikim udaljenosti, opcija plinovoda zahtijevala bi cijevi velikog promjera i postrojenja za rekompresiju za prevladavanje pada tlaka prijenosa, koja su vrlo skupa. LNG opcija nudi ekonomičnost, fleksibilnost i sigurnost opskrbe u odnosu na plinovod i druge tehnološke alternative. Mnoge zemlje u Europi i Aziji prihvaćaju LNG upravo zbog tih razloga, iako bi velike količine plina iz Rusije, Sjeverne Afrike i Bliskog istoka mogle zadovoljiti svoje domaće energetske potrebe kroz postojeće i planirane cjevovodne priključke [1].

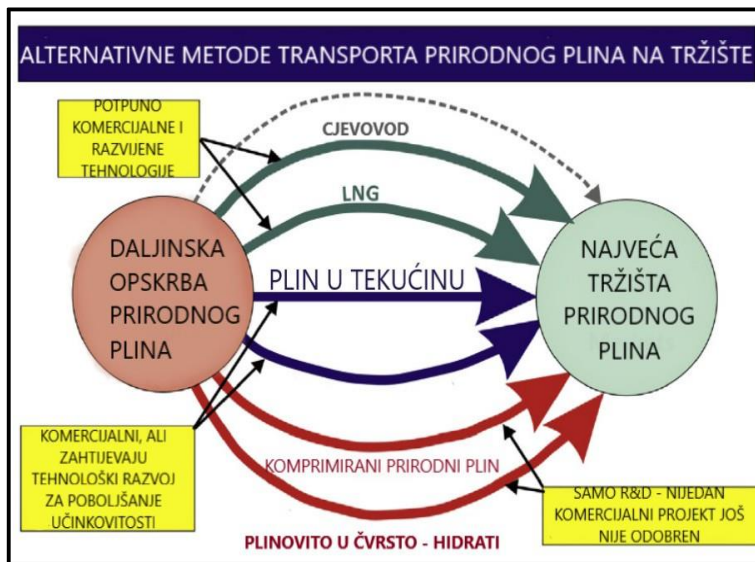
Kako bi LNG bio dostupan za korištenje u zemlji, energetske tvrtke moraju ulagati u niz različitih objekata koji su jako povezani i ovisе jedni o drugima. Sljedeći korak u opskrbnom lancu LNG-a (Slika 5.) je transport ukapljenog prirodnog plina do regasifikacije objekata.

Primarni načini prijevoza su brodovi i kamioni (Slika 6.). LNG se transportira specijaliziranim brodovima s izoliranim dvostrukim tankovima, dizajniranim za sadržavanje tereta malo iznad atmosferskog tlaka na kriogenoj temperaturi od približno  $-160\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Tipično, skladišni spremnici rade na 0,3 bara s projektiranim tlakom od 0,7 bara [1]. Konstrukcija spremnika osigurava cjelovitost sustava trupa i pruža izolaciju za skladište LNG-a. Budući da izolacija ne može spriječiti svu vanjsku toplinu da dopre do LNG-a, dio tekućine vrije i isparava tijekom plovidbe. Isparavanje LNG-a nije homogeno, komponente s najnižom točkom vrelišta (dušik i metan) imaju tendenciju da ispare lakše nego komponente koje su teže. Ova pojava se naziva starenje ili trošenje te njegova posljedica je ta da sastav LNG-a postaje teži, a ogrjevna vrijednost i Weberov indeks LNG-a povećavaju se tijekom vremena. Ispareni plin, obično u količini od oko 0,10 do 0,15 % volumena skladišta po danu, mora se ukloniti kako bi brodski tankovi bili pod stalnim pritiskom. Ispareni plin

može se koristiti kao pogonsko gorivo ili se ponovno ukapljuje te vraća u tankove tereta, ovisno o konstrukcijskim karakteristikama LNG broda [1].



Slika 5. Opskrbni lanac ukapljenog prirodnog plina. [1]



Slika 6. Metode transporta prirodnog plina na tržište. [1]

### **3. Skladištenje i zadržavanje tereta na brodovima za transport ukapljenog prirodnog plina**

U službi je velik broj brodova koji su konstruirani za prijevoz plinova u tekućem stanju. Mnogi manji brodovi konstruirani su za prijevoz ukapljenog naftnog plina (engl. Liquefied Petroleum Gas, LPG), dok je manji broj brodova namijenjen za prijevoz ukapljenog prirodnog plina. Međutim, došlo je do značajnog povećanja LNG brodova velikih dimenzija te je prirodni plin danas postao jedan od najtraženijih izvora energije.

LNG brodovi (Slika 7.), specijalizirani su brodovi za transport ukapljenog prirodnog plina na temperaturama od  $-160\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Prvi transport ukapljenog prirodnog plina ovim brodovima je bio 1958. godine prošlog stoljeća. Poslije toga nastupa znatno širenje flote koje traje i danas. Najčešće izvedbe broda za transport ukapljenog prirodnog plina su s membranskim i sferičnim tankovima. Može se reći da se danas najviše koriste brodovi s membranskim tankovima. Kapacitet brodova za transport prirodnog plina su od  $80.000\text{ m}^3$  do  $270.000\text{ m}^3$  [4]. LNG brodovi konstruirani su s dvostrukom oplatom koja ima svrhu skladištenja balastnih voda. LNG brodovi imaju mogućnost korištenja tereta kao pogonskog goriva, što ga čini vrlo iskoristivim tipom broda. Prazni prostori u konstrukciji broda ispunjavaju se inertnim plinom koji se generira u sustavu za proizvodnju inertnog plina, dok kod sferičnih tankova iskoristavamo suhi zrak umjesto inertnog plina.

Za popunjavanje međubarijernog prostora na tipovima broda s membranskim sustavom zadržavanja koristi se dušik koji se proizvodi u sustavu za proizvodnju dušika.

Postoje četiri vrste teretnog sustava na ovakvim brodovima [5]:

1. Gaztransport membrana
2. Technigaz membrana
3. Kvaerner Moss sferični – neovisni Tip 'B'
4. Spremnik IHI SPB – prizmatični.

Svi LNG brodovi imaju dvostruke trupove po cijeloj duljini tereta koji osiguravaju odgovarajući prostor za balast. Zajednička karakteristika većine LNG brodova je da izgaraju teret kao gorivo.



Skladišni prostori oko tankova tereta kontinuirano se inertiraju, osim u slučaju sferičnog zatvorenog prostora tipa „B” gdje se skladišni prostori mogu ispuniti suhim zrakom pod uvjetom da postoji odgovarajući način za inertiranje takvih prostora u slučaju istjecanja tereta. Većina LNG brodova ima pogonska postrojenja s parnom turbinom.



Slika 7. Brod za prijevoz ukapljenog prirodnog plina. [4]

### *3.1. Sustav zadržavanja tereta*

Sustav zadržavanja tereta je izgrađena konstrukcija koja uključuje primarnu barijeru, sekundarnu barijeru, pripadajuće izolacije, sve međuprostore te susjedne strukture koje služe za podupiranje navedenih elemenata.

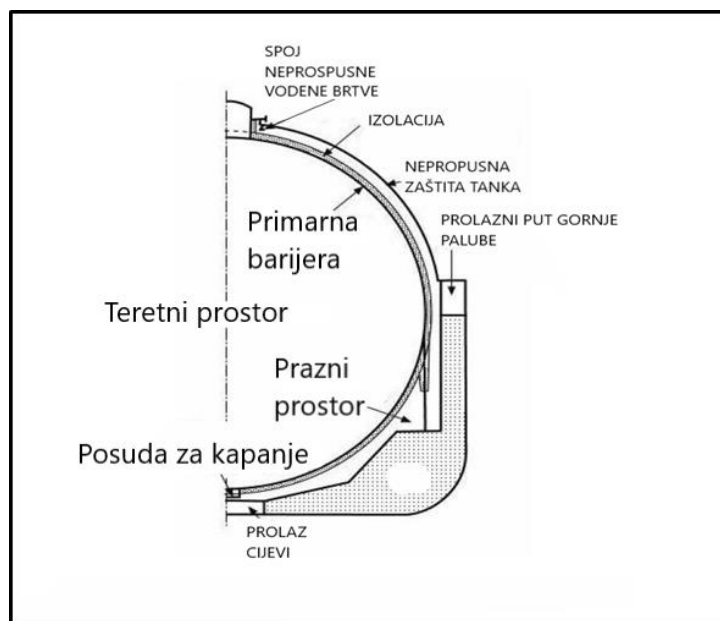
Sustav zadržavanja tereta ima dvije svrhe:

1. Za držanje LNG tereta na kriogenoj temperaturi (-160 °C)
2. Za izolaciju tereta od strukture trupa.

Materijali korišteni za strukturu trupa odabrani su da izdrže niske temperature. Na temperaturama ispod navedenih granica, ovi čelici će se kristalizirati i postati kruti. Materijali korišteni za sustav zadržavanja reduciraju prijelaz topline s konstrukcije trupa broda kako bi minimalizirali isparavanje plina iz tereta, kao i zaštitili strukturu trupa od utjecaja kriogene temperature.

### 3.2. Samonosivi spremnik tipa 'B'

Spremnici tipa 'B' mogu biti izrađeni od ravnih površina ili mogu biti sfernog tipa (Slika 8.). Ovaj tip sustava zadržavanja predmet je mnogo detaljnije analize naprezanja u usporedbi sa sustavima tipa A. Kontrole moraju uključivati ispitivanje vijeka trajanja od zamora i analizu širenja pukotine. Ovi spremnici mogu izdržati tlakove do 0,7 bara [5].



Slika 8. Neovisni sferični samonosivi spremnik tipa 'B'. [5]

Ovaj spremnik je dizajn Kvaerner Moss. Zbog poboljšanih čimbenika dizajna, spremnik tipa 'B' zahtijeva samo djelomičnu sekundarnu barijeru u obliku posude za kapanje. Spremni prostor u ovoj izvedbi je normalno ispunjen suhim inertnim plinom. Međutim, kada se usvoji moderna praksa, može se napuniti suhim zrakom pod uvjetom da se može postići inertiranje prostora ako sustav za detekciju pare pokaže curenje tereta. Zaštitna čelična kupola prekriva primarnu barijeru iznad

razine palube, a izolacija se nanosi na vanjsku stranu spremnika. Sferični spremnik tipa 'B' gotovo se isključivo primjenjuje na LNG brodove, rijetko se pojavljuje u trgovini LPG-om. Međutim, spremnik tipa 'B' ne mora biti sferičan. Kod brodova za prijevoz ukapljenog prirodnog plina, spremnici mogu biti i 'B' prizmatičnog oblika. Prizmatični spremnik tipa 'B' ima prednost postizanja većih volumetrijskih učinkovitosti trupa broda imajući cijeli spremnik tereta smješten ispod glavne palube. Tamo gdje se koristi prizmatični oblik, najveći proračunski tlak parnog prostora je, kao i za spremnike tipa A, ograničen na 0,7 bara [5].

### *3.3. Membranski sustav zadržavanja*

Koncept membranskih sustava za zadržavanje tereta bazirana je na vrlo tankoj primarnoj barijeri, od 0,7 do 1,5 mm debljine, koja je podržana kroz izolaciju. Dosta tankova nije samonosivog tipa, tj. ne ponašaju se kao neovisni tankovi ili unutarnji trup sa samonosivom strukturom.

Membranski tip sustava za zadržavanje tereta mora uvijek imati sekundarnu barijeru kako bi se osigurala cjelovitost sustava u slučaju curenja tereta iz primarne barijere. Membrana je konstruirana tako da se toplinsko širenje i skupljanje može kompenzirati bez pretjeranog naprezanja same membrane.

Postoje dvije vrste membranskih sustava za zadržavanje koje se koriste:

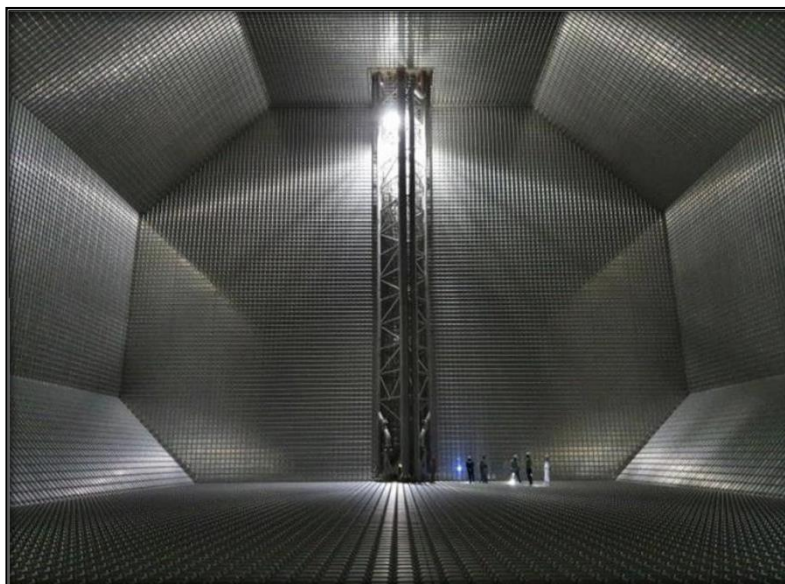
1. Gaz Transport
2. Technigaz.

Obje vrste ovih sustava zadržavanja nazvane su po tvrtkama koje su ih i proizvele.

Technigaz je osmislio izvedbu membranskih LNG sustava za zadržavanje s valovitom (korugiranom) primarnom membranom od nehrđajućeg čelika poduprtom drvenim konstrukcijama ispunjenim izolacijskim materijalom (Mark I/III). Sekundarna barijera je također poduprta drvenim konstrukcijama ispunjenim izolacijskim materijalom, osigurava zadržavanje kriogenog tereta u slučaju da primarna membrana propusti teret. Naboranost primarne membrane omogućuje skupljanje metala pod kriogenim temperaturama.

Gaztransport je ponudio vrlo sličnu izvedbu sustava za zadržavanje koji se sastoji od primarne membrane podržane izolacijom u konstrukcijama od šperploče i sekundarne membrane, također podržane izolacijom u konstrukcijama od šperploče. Ovaj sustav nazvan je sustav br. 88 i sadržavao je primarnu i sekundarnu membranu od čelične legure sa zanemarivim koeficijentom kontrakcije. Poboljšanja su bila tijekom godina i trenutni sustav je br. 96, koji se koristi sada na LNG brodovima koji se grade u Koreji i Kini. Za razliku od primarne barijere kod Tehnigaz sustava, koja se izrađuje od nehrđajućeg čelika, kod Gaz Transport sustava stjenka primarne barijere je izrađena od legure čelika s 36 % nikla koja se u praksi naziva *invar*, što bi bio skraćeni naziv koji dolazi od engleske riječi *invariable*, tj. nepromjenjiv. Debljina ove stjenke je samo 0,7 mm, dok je kod Technigaz sustava nešto deblja i uglavnom iznosi od 1,2 do 1,3 mm [5].

Nakon konkurentnog natjecateljskog perioda, Gaztransport i Technigaz ujedinili su se u GTT (Gaztransport & Technigaz) sustav (Slika 9.), koji je paralelno razvijao i promovirao oba membranska tipa sustava zadržavanja. Glavna prednost sustava za zadržavanje membranskog tipa je njihov prizmatični oblik, koji ovim sustavima omogućuje da u vrlo visokoj mjeri iskoriste raspoloživi prostor unutar trupa LNG broda. Sa spremnicima za teret udubljenim duboko u trup niske palube, LNG brodovima membranskog tipa nije potrebna visoka paluba da bi imali dobru vidljivost.

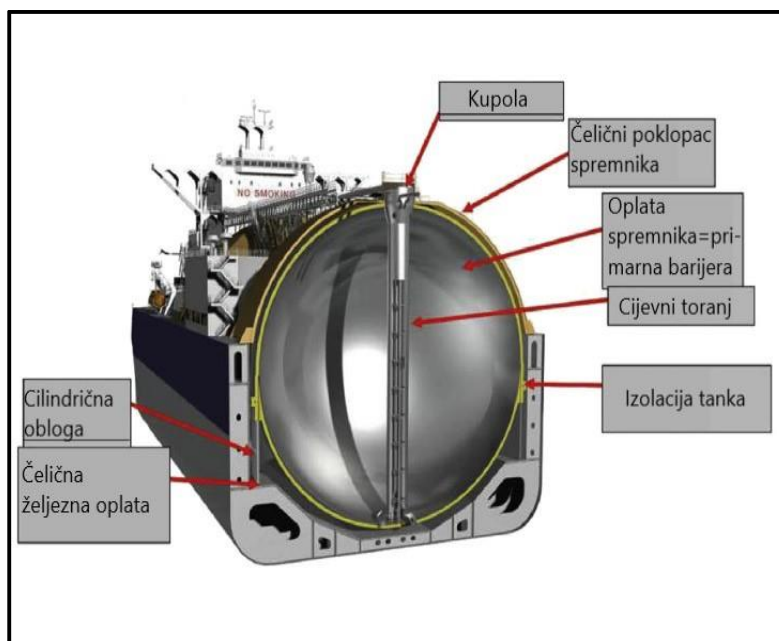


Slika 9. Gas Transport Technigaz LNG spremnik. [6]

Oba membranska sustava imaju zajednički nedostatak. Zbog utjecaja valova i vjetra dolazi do ljujanja broda, a time i zapljuskivanja tereta unutar spremnika (engl. sloshing). Nastali valovi u spremnicima LNG-a pri udaru na stjenke spremnika mogu oštetiti primarnu barijeru i konstrukcije koje podupiru primarnu barijeru. Kako bi se spriječilo oštećenje spremnika od zapljuskivanja, GTT savjetuje da operateri upravljaju brodovima s razinama u spremnicima većim od 90 % ili manjim od 10 %. Za primjene koje zahtijevaju operacije s djelomičnim opterećenjem, kao što su LNG plutajuće skladišne jedinice i jedinice za replinifikaciju (LNG FSRU), razvijeni su membranski sustavi s posebno ojačanim drvenim konstrukcijskim elementima.

#### 3.4. Moss sustav zadržavanja tereta

Moss sferični LNG sustav zadržavanja (Slika 10.) nema problema sa zapljuskivanjem tereta kao membranski spremnici. Njegove aluminijske kuglaste konstrukcije imaju dovoljnu strukturnu čvrstoću da izdrže udar vala zbog interakcije između tereta i gibanja broda. Sustav Moss ne treba punu sekundarnu barijeru kao membranski sustav, postoji mala posuda ispod sfera za prikupljanje tekućine koja curi.

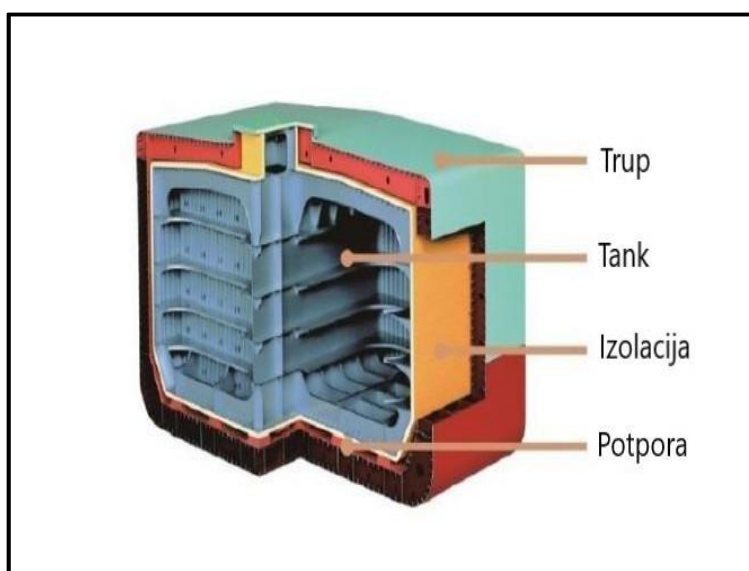


Slika 10. Moss sustav zadržavanja tereta. [1]

Filozofija izvedbe koja stoji iza sustava Moss je da spremnik treba biti projektiran tako da bude dovoljno čvrst kako se u spremnicima ne bi smjele pojaviti pukotine tijekom životnog vijeka plovila. Strukturna čvrstoća sustava zadržavanja upravo je razlog zašto su stari brodovi s Moss tankovima vrlo popularni za pretvorbu u LNG FSRU ili čak plutajuća postrojenja za proizvodnju LNG-a. Nedostatak kod brodova Moss je da sustav zadržavanja ima vrlo nisku stopu iskorištenja prostora trupa.

### 3.5. IHI SPB spremnik

LNG sustav za zadržavanje tereta tipa IHI SPB (Slika 11.), uspješno kombinira prednosti membranskog sustava i Moss sustava te također minimalizira nedostatke oba sustava. Prizmatični oblik spremnika osigurava visoku stopu iskorištenja skladišnog prostora i niže težište, dok čvrsta aluminijska konstrukcija sa središnjom pregradom i poprečnim nagibnim pregradama smanjuje gibanje tekućine u spremnicima i minimalizira rizik od oštećenja koja mogu nastati zbog zapljuskivanja, čak i pri uvjetima djelomičnog opterećenja. Zbog visoke cijene ovog sustava zadržavanja, spriječena je široka primjena. Uz moguće licenciranje u inozemstvu, SPB sustav bi mogao postati vrlo ozbiljan konkurent u svijetu LNG sustava zadržavanja.



Slika 11. IHI SPB sustav zadržavanja tereta. [7]

## 4. Konstrukcijske karakteristike membranskih i sferičnih tankova za transport ukapljenog prirodnog plina

### 4.1. Membranski tankovi

Membranski spremnici su nesamonosivi spremnici koji se sastoje od tankog sloja (membrana) koji je poduprt izolacijom susjedne strukture trupa. Membrana je izvedena na taj način da se toplinska ekspanzija kompenzira bez pretjeranog naprezanja membrane. Tank tereta, sustavi tereta i konstrukcija broda projektirani su po sljedećim osnovama:

(1) Gustoća tereta za LNG je  $470 \text{ kg/m}^3$  za opću konstrukcijsku izvedbu broda,  $500 \text{ kg/m}^3$  za dimenzije trupa, sustav za zadržavanje tereta i pumpe tereta, a gustoća za čisti metan je  $425 \text{ kg/m}^3$ . Minimalna projektirana temperatura je  $-163 \text{ °C}$  [9]. Uvjeti tlaka okoline su [9]:

- (a) Raspon atmosferskog tlaka: 95 do 104 kPa
- (b) Projektirani tlak spremnika, prikazan je u Tablici 2.

Tablica 2. Projektirani tlak spremnika [9].

Raspon tlaka	od -1 do 25 kPa
Normalni radni tlak	106 kPa

(2) Sastav tereta

Prosječne toplinske vrijednosti tereta su prikazane u Tablici 3. Očekuje se da sastav LNG-a s kojim će se rukovati dok je utovaren na brodu bude unutar sljedećeg raspona pojedinih komponenti, kako je navedeno u Tablici 4.

Tablica 3. Toplinska vrijednost tereta [9].

Toplinska vrijednost (prosjek)	
Visoka toplinska vrijednost	53,8 MJ/kg
Niska toplinska vrijednost	49,2 MJ/kg

Tablica 4. Sastav brodskog tereta [9].

Sastav	Raspon (mol-%)	Standardno (mol-%)
Dušik	0,04 – 1,00	0,35
Metan	86,70 – 90,40	88,0
Etan	7,00 – 8,50	7,8
Propan	1,10 – 3,10	2,8
Butan	0,10 – 1,15	1,0
Pentani i teži plinovi	0,007 – 0,10	0,05

(3) Brzina, tj. intenzitet isparavanja

Najveća brzina isparivanja tereta tijekom plovidbe s ukrcanim teretom (tankovi moraju biti puni, ali cjevovod za teret mora biti prazan) bi trebala biti manja od 0,15 % teretnog volumena po danu u stanju potpunog opterećenja, tj. za 98,5 % njihovog ukupnog kapaciteta. Ostali uvjeti su istaknuti u Tablici 5., dok su u Tablici 6. istaknuta svojstva čistog metana na  $-161,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  (ove vrijednosti izračunate su tijekom plovidbe broda pod normalnim uvjetima) [9].

Tablica 5. Temperaturni uvjeti. [9]

Temperatura	+45 °C
Temperatura morske vode	+32 °C
Temperatura koferdama	+5 °C
Ostali odjeljci	Nema grijanja
Vrsta tereta	Čisti metan
Temperatura tereta	-161,5 °C
Tlak tanka tereta	106 kPa
Stanje mora	Mirno
Stanje površine tanka tereta	100 % namočena

Tablica 6. Svojstva metana na  $-161,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . [9]

Specifična gravitacija	425 kg/m <sup>3</sup>
Latentna toplina	511 kJ/kg



#### (4) Projektiranje i proračun

Kod tlaka u spremniku tereta razlikujemo projektirani normalni radni tlak u tankovima koji iznosi između 7 i 19 kPa, dok je maksimalni tlak plina u spremniku 25 kPa iznad atmosferskog tlaka [9].

##### (a) Izolirani prostor

Postoje dva različita prostora smještena između primarne barijere i unutarnje strane trupa: među-barijerni prostor između primarne i sekundarne barijere te izolacijski prostor između sekundarne barijere i unutarnje strane trupa. Ova dva prostora se održavaju u suhom i inertnom stanju pomoću dušika. Tlak u tim prostorima reguliran je na vrijednost koja je malo iznad atmosferskog tlaka kako bi se spriječio prodor zraka. Za prostor između barijeratlak se održava između 0,5 i 1,0 kPa iznad atmosferskog tlaka. Diferencijalni pritisak između među-barijernog prostora i izoliranog prostora je od 0,2 do 0,7 kPa [9].

##### (b) Ograničenje ukrcaja tereta (LNG-a)

Za tankove tereta se smatra da su puni kada su napunjeni unutar 98,5 % svojeg ukupnog kapaciteta. Plovidba na moru s omjerima punjenja između 10 i 70 % visine tanka je zabranjena, ponajviše iz razloga zapljuskivanja tekućeg prirodnog plina, ali i zbog izrazito nepovoljnog i opasnog efekta slobodnih površina [9].

##### (c) Izrada izolacije i barijera

Ploče su od nehrđajućeg čelika. Navedeni materijal za izradu membranske primarne barijere isporučuju proizvođači i odobrava GTT. Vrste legura čelika su nikal-krom, nehrđajući čelik s vrlo niskim udjelom ugljika. Nominalna debljina je do 1,2 mm. Kemijski sastav (za referencu) [9]:

$C \leq 0,030 \%$ ,  $S \leq 0,020 \%$ ,  $P \leq 0,040 \%$ ,  $Cr = 17$  do  $20 \%$ ,

$Ni = 9$  do  $12 \%$  (do  $36 \%$  za *invar*),  $Si \leq 1 \%$ ,  $Mn \leq 2 \%$ ,  $Cu \leq 1 \%$ .

##### (d) Čvrsta poliuretanska pjena

Navedeni materijal za toplinsku izolaciju spremnika isporučuje se od strane proizvođača uz odobrenje GTT-a, karakteristike poliuretanske pjene su njena gustoća od  $120 \text{ kg/m}^3$ ,

zatvorene ćelije do 94 %, sadržaj stakloplastike do 10 %. Toplinska vodljivost na +24 °C je manja od 0,025 kcal/mh°C, količina upijanja vode je do 1,3 % volumena [9].

(e) Aluminijska folija

Kemijski sastav (za referencu) je [9]:

Al  $\geq$  99,2 %, Fe  $\leq$  0,6 %, Si  $\leq$  0,25 %, Cu  $\leq$  0,05 %, Zn  $\leq$  0,03 %, Mn  $\leq$  0,03.

Fizikalne karakteristike aluminijske folije su debljina od 0,7 mm, specifična težina od 190 g/m<sup>2</sup>, krajnja vlačna čvrstoća  $\geq$  60 kg/mm, istežanje pri pucanju je  $\geq$  10 % [9].

(f) Staklena tkanina

Deformacija teksture je  $\geq$  10 na 25 mm, struktura potke  $\geq$  10 na 25 mm i specifična težina je 330 g/m<sup>2</sup> [9].

Sekundarna barijera treba biti projektirana tako da je u mogućnosti zadržati svako predviđeno curenje tereta u trajanju od 15 dana, osim u slučaju drugačijih zahtjeva. Nužno je spriječiti pad temperature konstrukcije broda na nesigurnu razinu u slučaju propuštanja primarne barijere. Mehanizam oštećenja primarne barijere također ne smije uzrokovati oštećenja sekundarne barijere i obrnuto.

(g) Šperploča

Navedene karakteristike materijala za izradu izolacijskih ploča isporučuju proizvođači i odobrava GTT, kako slijedi [9]:

- Šperploča od 12 mm

Vrsta drveta je breza, nazivna debljina je 12 mm, broj slojeva je 9, koji se naizmjenično križaju pod 90°. Čvrstoća na pritisak je 50 kg/cm<sup>2</sup> na proporcionalnoj granici i okomito na vlakna, krajnja čvrstoća na savijanje za smjerove paralelne i okomito na čeono zrno je 30 MPa.

- Šperploča od 9 mm:

Vrsta drveta je breza, nazivna debljina je 9 mm, broj slojeva je 7, koji se naizmjenično križaju pod 90°. Krajnja vlačna čvrstoća je 600 kg/cm<sup>2</sup> paralelno s



strukturu. Ovakvo pričvršćenje ima tri svrhe: neuravnotežene sile koje stvaraju nejednolični ili prolazni temperaturni uvjeti, podupire težinu limova na okomitim stjenkama i krovu spremnika i omogućuje mali vakuum u spremniku. Pola perimetra se preklapa, i preklopno je zavaren na susjedni lim, s preklapanjem od 30 mm. Po rubovima i kutovima spremnika, limovi su pričvršćeni na kruti kutni element od nehrđajućeg čelika, a kutovi su pričvršćeni na izolaciju pomoću tvrdog drveta. Postupak zavarivanja je inertni plin volfram (engl. Tungsten Inert Gas, TIG) bez dodatnog metala [9].

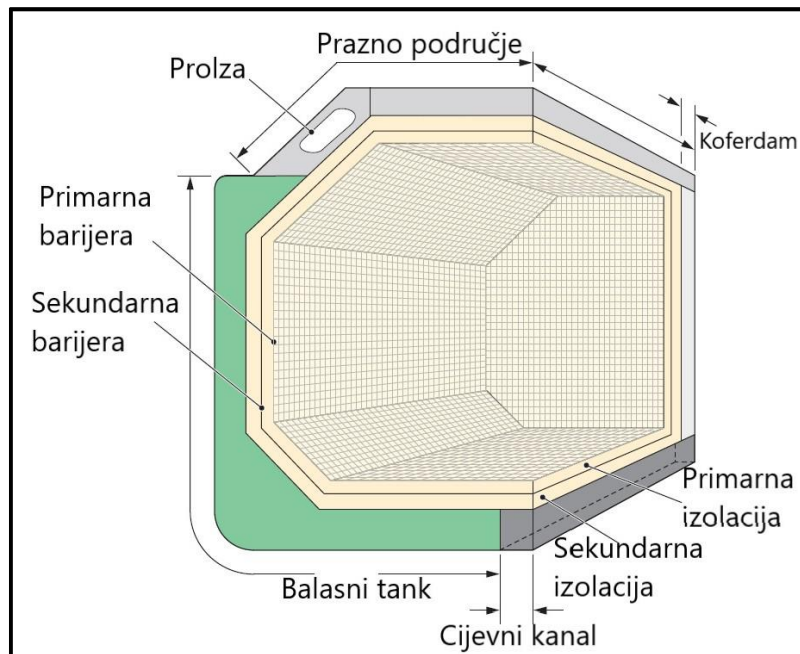
#### (6) Sekundarna barijera

Sklop izolacije i sekundarne barijere sastoji se od sljedećih elemenata. Sekundarna barijera je „Tripleks“ troslojni sklop (staklena tkanina, aluminijska folija, staklena tkanina), debljine 0,7 mm, nepropusna za tekućinu i paru. Međutim, ljepilo za pričvršćivanje Tripleksa između među-barijernog prostora i izolacijskog prostora ploče nije 100 % paronepropusno, pa je moguće da će dio plinske pare proći u među-barijernom prostoru kroz lijepljene spojeve u izolacijski prostor.

Ravni klinovi, pričvršćeni su za unutarnju oplatu i tvoreći pravokutni uzorak, služe kao potpora za izolacijske ploče koje su na njih zalijepljene. Ploče od šperploče izolacijske barijere pričvršćeni su na unutarnju stranu trupa pomoću klinova. Nivo debljina klina se pojedinačno izračunava kako bi se uzele u obzir sve nepravilnosti na unutarnjoj površini trupa. Izolacijski sendvič paneli, sastavljeni su od vanjske strane šperploče, na koju se spajaju listovi membrane i dva sloja izolacijske pjene, čime se tvori međupregrada i izolacijska prostorna barijera. Izolacijski sendvič paneli se sklapaju lijepljenjem poliuretanom ili epoksi ljepilom.

Izolacijski kontinuitet između panela osiguran je staklenom vunom (plosnati spoj) koji je umetnut između PVC folija. Čvrstoća i kontinuitet sekundarne barijere postiže se pomoću spojenog *scab* spoja izrađenog od prefabricirane rebraste poliuretanske pjene s ojačavajućim staklenim vlaknima. Za kutove spremnika, sendvič paneli su izrezani i sastavljeni u obliku *diedral* i *triedral* kutova, spojevi između ploča ovih kutova izrađeni su od prethodno komprimiranog ekspaniranog PVC-a.

Konstrukcija membranskog spremnika s istaknutim primarnim i sekundarnim barijerama te primarnom i sekundarnom izolacijom prikazana je na Slici 13.



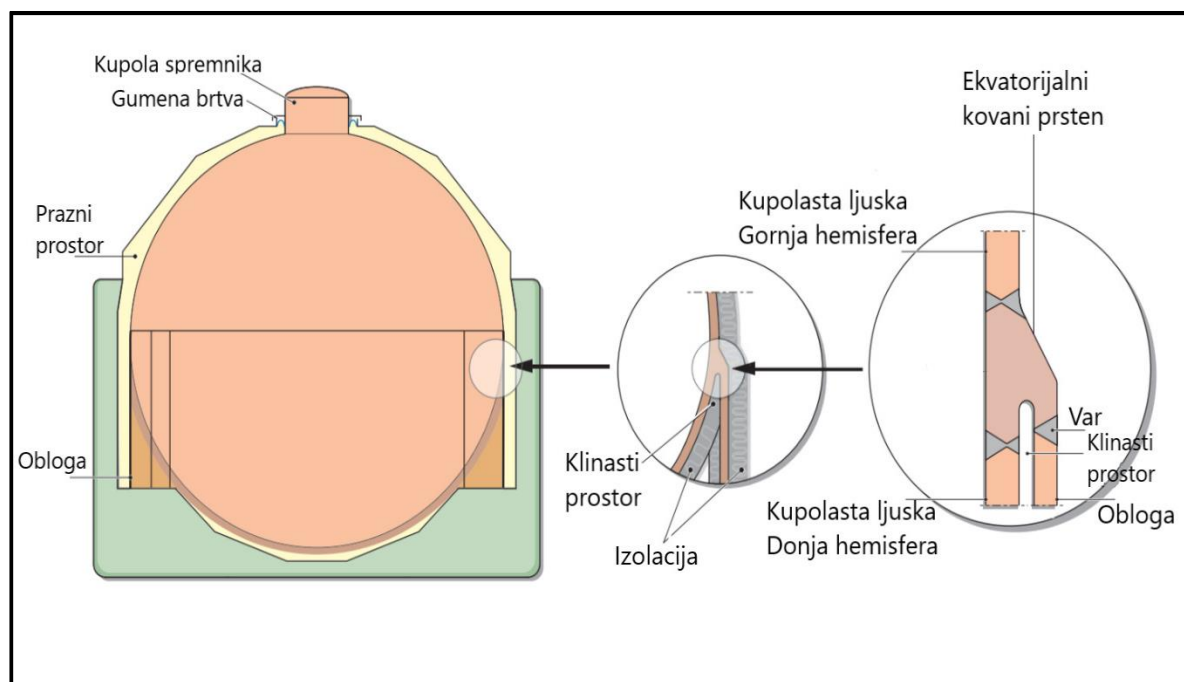
Slika 13. Konstrukcija membranskog spremnika. [9]

Dimenzije izolacije su određene kako bi se osiguralo da [9]:

- Prijelaz topline u spremniku ograničen je do te mjere da isparavanje ili brzina isparavanja iznosi oko 0,15 % tereta po danu.
- Unutarnja čelična stjenka trupa ne postiže temperaturu ispod svoje minimalne proračunate vrijednosti, čak i u slučaju nekakvog oštećenja.
- Rezultat bilo kakvog otklona koji proizlazi iz primijenjenih deformacija i naprezanja su prihvatljivi od primarne barijere. Osim ovih zahtjeva, izolacija djeluje kao pomoćna barijera, sprječava svaki kontakt između balastne vode i primarne barijere, u slučaju propuštanja morske vode kroz unutarnji trup. Izolacijski sustav projektiran je za održavanje gubitaka isparavanja tereta na prihvatljivoj razini i za zaštitu unutarnje čelične stjenke trupa od utjecaja preniskih temperatura. Ako se učinkovitost izolacije pogorša iz bilo kojeg razloga, učinak može biti smanjenje unutarnje temperature čelika trupa, tj. pojava tzv. hladnih regija uz povećanje isparavanja iz zahvaćenog spremnika. Povećano isparavanje nema izravnih posljedica za sigurnost plovila, s tim da temperatura unutarnje čelične stjenke trupa mora biti održavana unutar prihvatljivih granica kako bi se spriječio mogući krti lom.

#### 4.2. Sferični tankovi

Sferični tankovi (Slika 14.) imaju visoku sigurnost od loma. Spremnici su dobro izolirani s 215 mm polistirenske pjene kako bi se prirodno isparavanje dovelo na minimum. Spremnici su konstruirani od čelika s 9 % nikla. Svaki spremnik zasebno je pokriven s čeličnim sfernim poklopcem koji uglavnom služi za izolaciju i zaštitu spremnika. Poklopac također ima mogućnost za kontrolu atmosfere skladišnog prostora. Donji rub svakog poklopca zavaren je za palubu broda čineći tako vodonepropusnu brtvu. Fleksibilna guma koristi se kao brtva na mjestu gdje kupola spremnika izvire iz poklopca. Tankovi su poduprti s metalnom oblogom iz ekvatorijalnog prstena, koji prenosi težinu tanka i tereta na donji dio trupa broda [8].

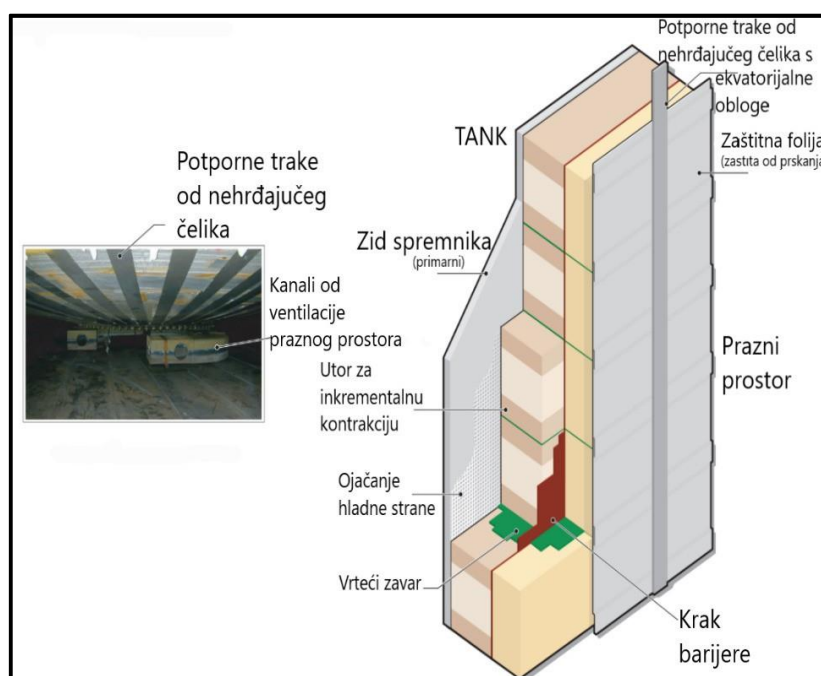


Slika 14. Konstrukcija sferičnog spremnika. [8]

Metalna obloga iz ekvatorijalnog prstena u gornjem djelu ukrućena je vodoravnim prstenima, a u donjem djelu okomitim valovitim ukrutnicima. Spremnici sadrže središnji cijevni toranj, ugrađen u kupole u svrhu pristupa u spremnik i za podupiranje cijevi i kabela koji vode do i od pumpe za teret, pumpe za raspršivanje (ako je ugrađena), vodove za pražnjenje i punjenje, mjerače razine kapaciteta, Whessoe mjerače s plovkom, vodove za prskanje i cijevi za uzorkovanje plina. Toranj

je opremljen vodilicama na donjem kraju koje ograničavaju pomicanje, ali dopuštaju proširenja, tj. dilataciju. Debljina izolacije od 215 mm znači da je stopa isparavanja približno 0,22 % težine tereta dnevno. Ovo odgovara prijelazu topline iz pet spremnika od 460 kcal/h na 0,22 % [8].

Materijali korišteni za strukturu trupa projektirani su da izdrže različite temperaturne promjene. Na temperaturama ispod navedenih granica, ovi čelici će se kristalizirati i postati će krhki. Materijali korišteni za sustav zadržavanja (Slika 15.) imaju svojstvo da smanjuju prijenos topline iz strukture trupa kako bi se minimaliziralo isparavanje tereta, kao i za zaštitu strukture trupa od utjecaja kriogenih temperatura.



Slika 15. Konstrukcija sustava zadržavanja. [8]

Pri utovaru u tankove tereta održava se uglavnom konstantan tlak parne faze, malo iznad atmosferskog tlaka. Vanjska toplina koja prolazi kroz izolaciju spremnika stvara konvekciju unutar tereta, uzrokujući da se zagrijani LNG podigne na površinu i zatim ispari. Sve dok se para kontinuirano uklanja održavanjem konstantnog tlaka, LNG ostaje na ustaljenoj temperaturi isparavanja. Ako se tlak pare smanji zbog uklanjanja veće količine pare nego što se iste stvara, temperatura LNG-a će se smanjiti. Da bi se nadomjestila ravnoteža tlaka koji odgovara njegovoj temperaturi, isparavanje LNG-a se ubrzava, što rezultira povećanim prijenosom topline sa strane

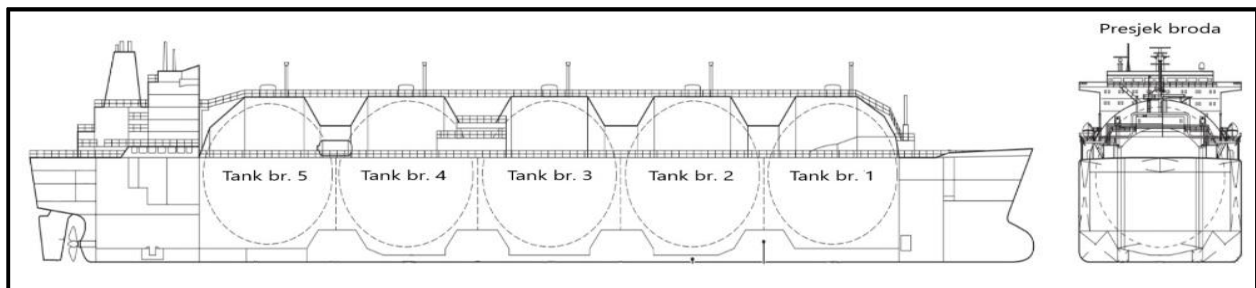
LNG-a na stranu pare. Ako se tlak pare poveća uklonjenjem manje količine pare nego što se iste stvara, temperatura LNG-a će se povećati. Kako bi se pritisak sveo na razinu koji odgovara ravnoteži s njegovom temperaturom, isparavanje LNG-a se usporava te se smanjuje prijenos topline s LNG-a na paru. Budući je LNG mješavina nekoliko komponenti s različitim fizikalnim svojstvima, hlapljiviji dio tereta isparava većom brzinom od manje hlapljivih frakcija. Stvorena para isparavanjem tereta sadrži veću koncentraciju hlapljivijeg komponenti u odnosu na neispareni LNG-a. Svojstva LNG-a, tj. vrelište, gustoća i ogrjevna vrijednost, imaju tendenciju povećanja tijekom plovidbe.



## 5. Tipične izvedbe brodova za transport ukapljenog prirodnog plina

### 5.1. Brod sa sferičnim tankovima

Sustav zadržavanja tereta kod brodova sa sferičnim tankovima sastoji se najčešće od 5 izoliranih neovisnih sfernih tankova smještenih u liniji od pramca prema krmu unutar trupa broda. Ovaj sustav zadržavanja tereta patentiran je od strane graditelja Moss-Rosenberg-Verft-a. Uzdužni (lijevo) i poprečni (desno) presjek takvog broda prikazan je na Slici 16.



Slika 16. Brod sa sferičnim tankovima. [8]

Karakteristične aktivnosti i operacije kod ovakvih brodova mogu se podijeliti kako slijedi:

#### (a) Detekcija curenja plina

Konstrukcija brodova za prijevoz plina trenutno je regulirana konvencijom III SOLAS Međunarodni kodeks za konstrukciju i opremu brodova. Prijevoz ukapljenih plinova na veliko obično se naziva "Plinski kodeks". Osnova filozofije tanka 'Tipa B' je koncept 'curenje prije oštećenja'. Pretpostavlja se da će nastala oštećenja na primarnoj barijeri biti postupna, a ne iznenadna i katastrofalna. Da bi se ispunili ovi zahtjevi moraju se ispuniti određeni uvjeti, što uključuje:

- Razine naprezanja, otpornost na zamor i karakteristike širenja pukotina spremnika moraju se odrediti pomoću metoda konačnih elemenata i rafinirane metode analize.
- Mora se postaviti djelomična 'sekundarna barijera' koja mora biti sposobna zadržavati bilo kakvo predviđeno istjecanje iz 'primarne barijere' (sama oplata spremnika) u trajanju od 15 dana i mora spriječiti pad temperature konstrukcije

broda na nesigurnu razinu. Oštećenje primarne barijere ne smije uzrokovati oštećenje sekundarne barijere i obrnuto.

- Mora se osigurati "zaštita od prskanja" tako da se svako curenje preusmjeri prema dolje u sekundarnu barijeru i dalje od strukture trupa.

U iznimnim slučajevima pojave pukotina na spremnicima izrađenima od nikal-čelik legura čak i minimalno curenje LNG-a unutar izolacije otkrit će se u ranoj fazi sustavom za detekciju plina postavljenim na području ekvatorijalnog prstena i na posudi za kapanje. Posuda za kapanje postavljena je neposredno ispod svakog teretnog tanka zajedno s temperaturnim senzorom za otkrivanje prisutnosti LNG-a uz redukcijski sustav za uklanjanje tekućine. Zaštita od prskanja sastoji se od aluminijske folije koja će štititi izolaciju spremnika, s tim da folija također i usmjerava svako curenje. Odvod na dnu izolacijskog prostora zatvoren je u normalnom radu rasprskavajućom pločom koja je dizajnirana za oštećenja na niskim temperaturama. Tekućina koja je istekla iz sjeverne hemisfere sakuplja se u drenažnom kanalu koji je formiran od gornjeg rubnog prstena te usmjerava sakupljenu tekućinu prema odvodnim cjevovodima koji su smješteni prema pramcu, prema krmi te s lijeve i desne strane tanka. Ove cijevi usmjeravaju tekućinu na prazni palubni prostor te zatim u posudu za kapanje.

#### (b) Operacija rukovanja teretom

Prije početka bilo kakve operacije s teretom, cjevovodi i oprema moraju biti ohlađeni kako bi se izbjegla termo-mehanička naprezanja, deformacije i oštećenja te da bi se smanjila brzina isparavanja koja se stvara na početku operacije. Teret se ukrcava i iskrcava kroz isti razvodnik koji se nalazi između teretnih tankova. Pritisci su izjednačeni između svihtankova tereta međusobno povezanim prednjim i stražnjim kolektorom pare. Ovo zaglavlje je spojeno na obalne parne vodove preko parnih križnih vodova prilikom utovara ili istovara. Kada je brod na putovanjima s teretom i balastom, ispareni plin je normalna pojava te se koristiti kao pogonsko gorivo. Operacijama rukovanja teretom upravlja se iz kontrolne prostorije tereta (engl. Cargo Control Room, CCR), smještene iza navigacijskog mosta na palubi. Ovaj kontrolni centar sadrži i upravljačke stanice distribuiranog kontrolnog sustava (engl. Distributed Control System, DCS) koje pružaju nadzor i kontrolu

nad sustavom skladištenja i rukovanja teretom. Lokalna soba za kontrolu tereta nalazi se središnje na glavnoj palubi između trećeg i četvrtog tanka tereta. Ova kontrolna soba sadrži kontrolnu stanicu za DCS sustav koji se prvenstveno bavi utovarom tereta.

(c) Oprema za teret

Kompresorska stanica, smještena je na lijevoj strani glavne palube i teretnih tankova te sadrži sljedeće glavne stavke opreme:

1. Nisko radni plinski kompresor, koji se koristi za dobavu isparenog plina u brodske kotlove,
2. Plinski kompresori za visoke uvjete rada, koji se koriste za vraćanje LNG pare na obalu tijekom operacija utovara, vraćaju plin/paru na obalu tijekom rasplinjavanja i započinju operaciju hlađenja.
3. Cijevne plinske zagrijače grijane parom, koji se koriste za dovod toplog plina u kotlove za loženje i opskrbu tankova tereta plinom tijekom postupaka zagrijavanja prije inertiranja, prozračivanja i sl.

Dva horizontalna parna isparivača i cijevna isparivača grijana parom koriste se za prethodno proizvedeni plin, tj. za pročišćavanje inertnog plina iz tankova tereta te za proizvodnju plina za održavanje tlaka u spremniku tijekom iskrcaja, ako povratni plin s kopna nije dostupan. U svakom spremniku tereta nalaze se dvije vertikalno uronjene teretne pumpe pogonjene elektromotorom. Kada istovremeno radi svih deset teretnih pumpi, teret se može istovariti za otprilike 15 sati. Tekućina se raspršuje u tankove tijekom plovidbe broda u balastu, potrebno ih je održavati na dovoljno niskoj temperaturi da se spriječi prekomjerno opterećenje strukture svakog spremnika, posebno ekvatorijalni prsten tijekom utovara.

Postrojenje za inertni plin predviđeno je za inertiranje teretnih tankova prije i poslije prozračivanja te ako je potrebno, za inertiranje praznih prostora. Suhi zrak se također isporučuje iz postrojenja za sušenje tankova tereta i skladišnih prostora nakon bilo kojeg pregleda ili postupka održavanja. Dva generatora dušika nalaze se u krmenom spremištu na desnom boku i služe za osiguravanje dušika za sljedeće svrhe:

- Brtvljenje kompresora tereta
- Inertiranje izolacijskog prostora
- Čišćenje linije tereta
- Pročišćavanje plinovoda kotla.

Osiguran je sustav opskrbnog prijenosnog sustava koji omogućuje točno mjerenje količine tereta. Sustav uključuje opremu za mjerenje razine tekućine, temperature tekućine i pare, kao i tlak pare unutar svakog teretnog spremnika. Ovi se podaci, zajedno s tablicama podataka o kalibraciji spremnika, koriste za izvršavanje proračuna količine tereta. Sekundarni plovak koji pokreće mehanički Whesoe sustav također je osiguran. Postoji sustav za isključivanje u hitnim slučajevima (engl. Emergency Shutdown System, ESDS) koji služi za zaštitu teretnog sustava na brodu i na obali tijekom operacije ukrcaja i iskrcaja tereta. Sustav uključuje vezu brod/obala tako da se gašenje može pokrenuti ručno ili automatski s broda ili s obale.

#### (d) Plovidba s teretom

Tijekom normalnog rada, ispareni plin iz tankova komprimira se pomoću nisko-radnog kompresora i koristi se kao gorivo za kotlove. Sustav se kontrolira tako da se tlak u spremniku održava na unaprijed određenim parametrima. Dostupne su dvije metode za kontrolu tlaka pare u teretnom tanku:

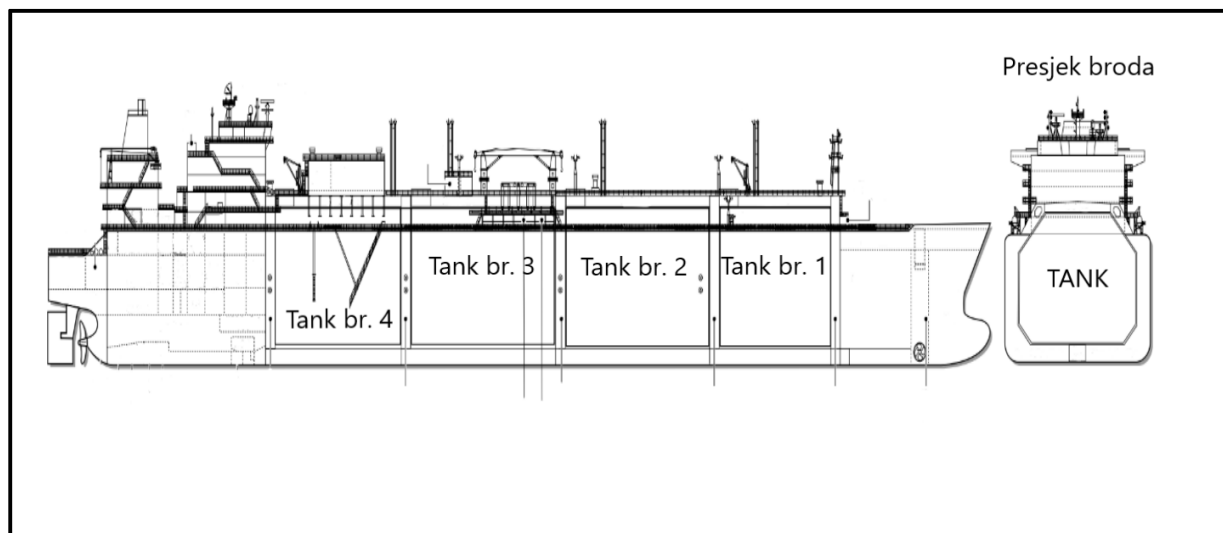
- Zbrinjavanje viška pare putem sustava za isparavanje plina i sustav za ispuštanje pare (po potrebi)
- Odzračivanje prekomjerne količine pare putem daljinski upravljano odzračnog ventila na odzračnom stupu preko grijača.

#### (e) Iskrcaj tereta

Obično, dok pumpe za teret u svakom tanku ispumpavaju teret, pare tereta se vraćaju s obale i prati se tlak kako bi se osiguralo da tlak u tankovima tereta ostaje unutar prihvatljivog raspona. U slučaju ako obalni terminal ne može vratiti paru, nadoknađuje se para iz brodskog zagrijača. Mala količina tereta ostaje u svim spremnicima. Tijekom putovanja u balastu, tankovi tereta se hlade raspršivanjem pomoću pumpi za raspršivanje je dodatni teret ostavljen i u tu svrhu.

## 5.2. Brod s membranskim tankovima

Sustavi za zadržavanje tereta, upravljanje i mjerenje projektirani su na način da su opremljeni za transport ukapljenog prirodnog plina u četiri membranska tanka tereta na temperaturama oko  $-163\text{ }^{\circ}\text{C}$  i pri apsolutnom tlaku od  $106,0\text{ kPa}$  [10]. Sustav za zadržavanje tereta je membranskog tipa u skladu s patentom i izvedbom GTT MARK-III te zahtjevima klase odgovarajućih regulatornih tijela. Debljina izolacije određena je tako da ograniči brzinu isparavanja na manje od  $0,15\%$  plina dnevno tijekom putovanja sa spremnicima na početku punima do  $98,5\%$  njihovog ukupnog kapaciteta. Gornji dio spremnika zakošen je u suprotnom smjeru za  $45^{\circ}$  kako bi se ograničio efekt slobodnih površina. Donji dio je na sličan način zakošen kako bi spremnici mogli pratiti linije broda. Izvedba konstrukcije broda je takva da omogućuje ostavljanje jednog ili više tankova tereta praznim s preostalim spremnicima tereta napunjenim unutar raspona prihvatljivog za GTT u plovnom stanju. Svaki spremnik opremljen je pravokutnom izoliranom kupolom dimenzija oko  $4,9 \times 4,5\text{ m}$ , koja se nalazi na njegovom kraju. Ova se kupola koristi kao zajednički pristup za opremu za rukovanje teretom spremnika, za razne instrumente i upravljačke vodove te kao modalitet za pristup posade u spremnik. Uzdužni (lijevo) i poprečni (desno) presjek broda s membranskim tankovima prikazan je na Slici 17 [10].



Slika 17. Brod s membranskim tankovima. [10]

Svaki spremnik je opremljen plinovodom na sredini vrha spremnika tereta. Kupole su pravilno izolirane iznutra kako bi se smanjio prijenos topline i osigurao prolaz za teretne cijevi, električnu energiju, instrumente i za ostale potrebne instalacije. Svaki tank tereta opremljen je jarbolom za odzračivanje. Sustav cjevovoda za rukovanje teretom uglavnom se sastoji od prednjeg i stražnjeg sabirnika tekućine i pare koje su spojene na odgovarajuće linije koje vode do svakog tanka tereta. Pumpe za teret i pumpe za raspršivanje imaju električni pogon, uronjenog su tipa i ugrađene su u svaki tank tereta.

Kompresori male i velike snage, grijači za isparavanje/zagrijavanje te isparivač za ukapljeni prirodni plin smješteni su u strojarnici u prostorijama teretnog postrojenja. Jedinica generatora inertnog plina na dizelsko gorivo instalirana je u zasebnom odjeljku unutar strojarnice za opskrbu inertnim plinom i suhim zrakom potrebnim za pripremu spremnika tereta za punjenje LNG-om ili za pregled i popravak. U strojarnici su instalirana dva generatora dušika za opskrbu plinom N<sub>2</sub>. Na krmenom dijelu broda su elektromotorna postrojenja i teretni strojevi i uređaji.

#### *5.2.1. Sustav kontrole tlaka u spremniku tereta*

Ovisno o stanju tlaka u tankovima, razlikujemo dva slučaja:

##### (a) Tankovi pod nadtlakom

Kako bi zaštitili teretne tankove od prekomjernog tlaka zbog prirodnog isparavanja tereta, plin mora biti spaljen u kotlu ili ispušten u atmosferu. Kompresori će isporučivati ispareni plin u kotlove kao plin za gorivo kako bi se osigurao stabilan tlak u sustavu. Ako kotlovi zahtijevaju manje loživog plina od onog koji se prirodno isparava, tlak kolektora pare će se povećati. Kako bi se spriječilo povećanje tlaka sustav kontrole kotla će morati koristiti više plina za gorivo i tako proizvoditi više pare nego što je potrebno za parni sustav. Višak pare potrebno je ispustiti u atmosferu spaljivanjem kako bi se izbjegli nepovoljni ekološki utjecaji metana kao stakleničkog plina.

##### (b) Tankovi pod podtlakom

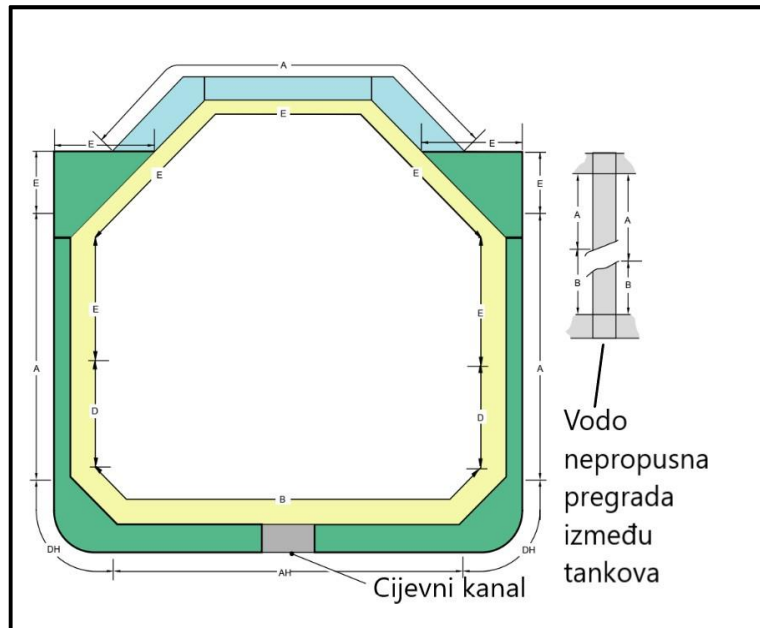
Funkcija kompresora male snage je da štiti tankove tereta od podtlaka, ima dva regulatora zaštite od tlaka u spremniku: jedan za način rada u balastu i jedan za opterećeni način rada s

teretom. Upravljačka logika kompresora ograničit će kapacitet kompresora kada tlak kolektora pare padne ispod postavljenog tlaka od 2 kPa. Kada tlak u kolektoru pare padne na 3 kPa, aktivirati će se automatski pomoćni signal goriva te će isti biti proslijeđen u sustav upravljanja gorionicima sa svrhom pokretanja gorionika. Pomoćni signal goriva će se resetirati kada se tlak poveća na 3,5 kPa. Pri vrlo niskom tlaku tereta od 2,0 kPa proslijedit će se signal „*FO Boost Up*“ prema sustavu upravljanja kotlom i pokrenuti će se postupno zaustavljanje kompresora. Regulatori načina rada "Balast" i "Natovareno" ograničit će raspoloživu količinu isparenog plina na kotlove kada tlak u kolektoru tereta padne ispod postavljenog tlaka [9][10].

### *5.2.2. Oštećenja i ostali oblici narušavanja strukturnog integriteta konstrukcije tanka*

Izolacijski sustav projektiran je za održavanje gubitaka uzrokovanih isparavanjem tereta na prihvatljivoj razini te za zaštitu čelične unutarnje stjenke trupa od utjecaja preniskih temperatura. Ako se učinkovitost izolacije pogorša iz bilo kojeg razloga, učinak može biti smanjenje temperature unutarnje stjenke čeličnog trupa što rezultira stvaranjem tzv. „hladnih točki“ i povećanjem isparavanja iz zahvaćenog spremnika. Višak isparenog plina može se ispustiti u atmosferu preko ventilacijskog jarbola. Temperatura unutarnje stjenke trupa mora se održavati unutar prihvatljive granice kako bi se spriječio mogući lom krhke strukture. Kvaliteta čelika potrebna za konstrukciju trupa broda određena je minimalnom temperaturom koju ovaj čelik može postići na minimalnoj temperaturi okoline, pod pretpostavkom da je primarna barijera oštećena te ako je LNG u kontaktu sa sekundarnom membranom. Osim oštećenja membrane, lokalne hladne točke mogu nastati zbog oštećenja izolacije.

Za ove uvjete, klasifikacijska društva zahtijevaju distribuciju klase čelika na način da su vrh spremnika i gornji uzdužni skošeni dio spremnika izrađeni od čelika razreda 'E', dok se za preostale uzdužne čelične strukture predviđa čelik razreda 'DH' koji ima minimalnu radnu temperaturu od -30 °C. Poprečne vodonepropusne pregrade (Slika 18.) između tankova tereta su od čelika razreda 'A' s glikolom sustava grijanja vode. Dok je kvaliteta čelika unutarnjeg dijela trupa odabrana da izdrži minimalnu temperaturu koja se može pojaviti tijekom rada, produljeni rad na temperaturama čelika ispod 0 °C uzrokovat će nakupljanje leda na ploči, što će opet uzrokovati daljnje snižavanje temperature čelika zbog izolacijskog učinka leda. Kako bi se to izbjeglo, spiralni grijači su ugrađeni u prostore koferdama, kako bi se unutarnja temperatura trupa držala na 0 °C [9][10].



Slika 18. Vizualni prikaz različitih klasa čelika u sustavu zadržavanja. [9]



## 6. Zaključak

Kompletna oprema, sustavi te postrojenja na brodovima za transport prirodnog plina su projektirani ponajprije iz sigurnosnog aspekta, tj. za sigurnost posade, broda, okruženja te tereta. Transport ukapljenog prirodnog plina evoluirao je tijekom godina. Usporedimo li transport plina cjevovodom i transport ukapljenog prirodnog plina LNG brodovima, zaključuje se da su LNG brodovi u mogućnosti povezati sve opskrbe lance diljem svijeta, dok su plinski cjevovodi u mogućnosti povezati manje odnosno bliže relacije. Također, vrlo bitno je da transport prirodnog plina bude što sigurniji i ekonomičniji za kompaniju.

U osnovi, brodove za transport prirodnog plina dijelimo na brodove s membranskim i sferičnim tankovima. Pod membranske tankove svrstavaju se Technigaz i Gaz Transport sustavi tankova tereta te kombinacija ovih dvaju teretnih sustava (GTT). Oba sustava zadržavanja tereta koriste membranu koja je fleksibilnih značajki i koja je u izravnom kontaktu s prirodnim ukapljenim plinom. Kod ovih sustava zadržavanja tereta omogućeno je isparavanje tereta od oko 0,15 % dnevno od ukupnog kapaciteta tereta (u praksi je ispod 0,15 %).

Moss sustav zadržavanja tereta spada u sferične tankove. Sferični tankovi imaju ekvatorijalni prsten koji drži cijelu konstrukciju tanka. Upravo na tom ekvatorijalnom prstenu su usmjerena najveća mehanička i termička naprezanja. Aluminijski tankovi zamijenili su tankove koji su bili konstruirani od nikal-čelik legura. Testiranja su pokazala da aluminijski tankovi imaju veću sposobnost opiranja s obzirom na naprezanje i lom.

Vrlo je bitan odabir materijala za konstrukciju sustava zadržavanja. Materijali moraju imati sposobnost apsorbirati različite temperaturne promjene i ne dopustiti da temperatura unutarnjih stjenki trupa broda padne ispod dozvoljenih granica kako materijal ne bi izgubio svojstvo te postao krhak.

Konstrukcija tankova dodatno mora osigurati dobra svojstva tijekom plovidbe na težim stanjima mora, a kako bi se nepoželjni utjecaji zapljuskivanja tekućeg prirodnog plina u tankovima sveli na najmanju moguću mjeru. Time se prije svega čuva primarna barijera od bilo kakvih oštećenja i mikro pukotina. Jednako tako je važno voditi računa o razini ispunjenosti tankova u plovidbi u balastu, tj. u plovidbi s teretom, a kako bi se minimizirali utjecaji slobodnih površina na stabilnost i sigurnost broda.

## Popis literature

- [1] Mokhatab, S., Mak, J.Y., Valappil, J.V., Wood, D.A. (2014). *Handbook of Liquefied Natural Gas*. Gulf Professional, Elsevier, Oxford, UK.
- [2] <https://www.croftsystems.net/oil-gas-blog/natural-gas-composition/> (5. 3. 2023.)
- [3] <https://cultofsea.com/tanker/gas-tanker-types-tanks-cargo/> (5. 3. 2023.)
- [4] <https://markets.businessinsider.com/news/commodities/european-energy-crisis-liquefied-natural-gas-outlook-spark-commodities-2022-10> (8. 3. 2023.)
- [5] Lamb, T., Ed. (2003). *Ship Design and Construction*. Vol. 1 & 2. The Society of Naval Architects and Marine Engineers, Sheridan Books, US.
- [6] <https://www.offshore-energy.biz/flex-lng-to-take-delivery-of-first-2020-newbuild-vessel/> (10. 3. 2023.)
- [7] <https://www.offshore-energy.biz/wison-secures-rights-to-build-jmus-spb-lng-tanks/> (10. 3. 2023.)
- [8] LNGC - Norman Lady - Cargo System Manual.
- [9] LNGC - Methane Nile Eagle - Cargo Operating Manual.
- [10] LNGC - Grace Acacia - Cargo System Manual.

## **Popis slika**

Slika 1. Sastav prirodnog plina.

Slika 2. Shema postrojenja za proizvodnju LNG-a.

Slika 3. Podzemni LNG spremnik.

Slika 4. Nadzemni LNG spremnik.

Slika 5. Opskrbni lanac ukapljenog prirodnog plina.

Slika 6. Metode transporta prirodnog plina na tržište.

Slika 7. Brod za prijevoz .

Slika 8. Neovisni sferični samonosivi spremnik tipa 'B'.

Slika 9. Gas Transport Technigaz LNG spremnik.

Slika 10. Moss sustav zadržavanja tereta.

Slika 11. IHI SPB sustav zadržavanja tereta.

Slika 12. Konstrukcija membranskog spremnika.

Slika 13. Konstrukcija membranskog spremnika.

Slika 14. Konstrukcija sferičnog spremnika.

Slika 15. Konstrukcija sustava zadržavanja.

Slika 16. Brod sa sferičnim tankovima.

Slika 17. Brod s membranskim tankovima.

Slika 18. Vizualni prikaz različitih klasa čelika u sustavu zadržavanja.

## **Popis tablica**

Tablica 1. Radni uvjeti LNG spremnika.

Tablica 2. Projektirani tlak spremnika.

Tablica 3. Toplinska vrijednost tereta.

Tablica 4. Sastav brodskog tereta.

Tablica 5. Temperaturni uvjeti.

Tablica 6. Svojstva metana na  $-161,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

## **Sažetak**

### Konstruktivske karakteristike brodova za transport ukapljenog prirodnog plina

U ovom završnom radu prikazane su konstruktivske karakteristike brodova za transport ukapljenog prirodnog plina. Prikazana su svojstva prirodnog plina, njihov sastav, struktura i karakteristike. Prikazani su spremnici koji su namijenjeni za transport ukapljenog prirodnog plina, na kopnu i na LNG brodovima. Na LNG brodovima najčešće se koriste membranski ili sferični tankovi koji mogu biti Technigaz sustav, Gaz Transport sustav, kombinacija Technigaz i Gaz Transport sustava (GTT) te Moss sustav zadržavanja tereta. Prikazani su izbor materijala, odgovarajuća izolacija teretnog sustava, naprezanja te čvrstoća materijala, tlakovi, ponašanje tereta u tankovima broda. Također, u radu se uspoređuje transport plina cjevovodom i transport plina brodovima za prijevoz ukapljenog prirodnog plina.

Ključne riječi: prirodni plin, LNG brodovi, sustavi zadržavanja tereta, membranski tankovi, sferični tankovi

## **Summary**

### **Structural characteristics of ships for transportation of liquefied natural gas**

An overview of the structural characteristics of ships for the transport of liquefied natural gas is presented in this thesis. A description of liquefied natural gas is provided along with its composition, structure, and characteristics. Natural liquefied gas tanks, both on land and on LNG carriers, are presented. The majority of LNG carriers have membrane or spherical tanks, which can be the Technigaz system, the Gaz Transport system, a combination of these two systems (GTT), or the Moss containment system. The choice of materials, adequate insulation of the cargo system, stresses and material strength, pressures, and behaviour of the cargo in the ship's tanks are described. As part of the work, a comparison of the natural gas pipeline transportation with the transportation of natural liquefied gas by specialized ships is also provided.

Keywords: natural gas, LNG carriers, liquefied gas containment systems, membrane tanks, spherical tanks