

# Prijevoz ukapljenog plina morem

---

**Gleđ, Lukša**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2024**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:155:660698>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-30**



**SVEUČILIŠTE U DUBROVNIKU**  
UNIVERSITY OF DUBROVNIK

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the University of Dubrovnik](#)



zir.nsk.hr



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

**SVEUČILIŠTE U DUBROVNIKU**

**POMORSKI ODJEL**

**LUKŠA GLEĐ**

**PRIJEVOZ UKAPLJENOG PLINA MOREM**

**ZAVRŠNI RAD**

**DUBROVNIK, 2024.**

**SVEUČILIŠTE U DUBROVNIKU**

**POMORSKI ODJEL**

**PRIJEDIPLOMSKI STUDIJ NAUTIKA**

# **PRIJEVOZ UKAPLJENOG PLINA MOREM**

**ZAVRŠNI RAD**

**Mentor:**

doc. dr. sc. Nermin Hasanspahić

**Komentor:**

Miho Kristić, dipl. ing. pp.

**Student:**

Lukša Gleđ

**DUBROVNIK, 2024.**

## **IZJAVA**

S punom odgovornošću izjavljujem da sam završni rad izradio samostalno, služeći se navedenim izvorima podataka i uz stručno vodstvo mentora doc. dr. sc. Nermina Hasanspahića i komentora Miha Kristića dipl. ing. pp.

Lukša Gleđ

---

Potpis

## SAŽETAK

U ovom završnom radu obuhvaćena je tema prijevoza ukapljenih plinova sa naglaskom na njihovu prisutnost u pomorskoj industriji. Na samom početku definirani su osnovni pojmovi i značajke koje su usko povezane za ukapljene plinove. Potom su, kao dva ključna plina, izdvojeni i opisani ukapljeni prirodni plin (UPP) (engl. *liquefied natural gas* – LNG) i ukapljeni naftni plin (engl. *liquefied petroleum gas* – LPG). Budući da se morem prevoze u ukapljenom stanju, opisan je način transporta i oprema koja je potrebna za rukovanje kao što su cjevovodi, ventili, pumpe, kompresori te ostala oprema. Također su opisani lučki terminali na kojima se odvijaju operacije ukrcaja i iskrcaja ukapljenih plinova. Za kraj su nabrojani pozitivni i negativni ekološki aspekti ukapljenih plinova.

Ključne riječi: ukapljeni plin, LPG, LNG, ukapljivanje, lučki terminali

## ABSTRACT

This final paper covers the topic of liquefied gas transportation with an emphasis on their presence in the maritime industry. At the very beginning, the basic terms and features that are closely related to liquefied gases are defined. Then, as two key gases, liquefied natural gas (LNG) and liquefied petroleum gas (LPG) were singled out and described. Since they are transported by sea in a liquefied state, the method of transport and related shipboard handling equipment such as pipelines, valves, pumps, compressors and other equipment are described. Port terminals where loading and unloading of liquefied gases take place are also described. Finally, positive and negative environmental aspects of liquefied gases are listed.

Keywords: liquefied gases, LPG, LNG, liquefaction, port terminals

# SADRŽAJ

SAŽETAK.....	ii
ABSTRACT.....	ii
SADRŽAJ.....	iii
1. UVOD.....	1
2. VRSTE UKAPLJENIH PLINOVA.....	1
2.1. UKAPLJENI PRIRODNI PLIN (LNG).....	1
2.2. UKAPLJENI NAFTNI PLIN (LPG).....	2
3. PROCES UKAPLJIVANJA PLINOVA.....	3
4. BRODOVI ZA PRIJEVOZ UKAPLJENOG PLINA.....	4
4.1. KONSTRUKCIJA BRODOVA ZA PRIJEVOZ UKAPLJENOG PLINA.....	5
4.2. SPREMNICI TERETA.....	6
4.2.1. NEOVISNI (SAMONOSIVI) SPREMNICI.....	6
4.2.2. MEMBRANSKI SPREMNICI.....	8
5. OPREMA ZA RUKOVANJE UKAPLJENIM PLINOM.....	10
5.1. SUSTAV CJEVOVODA.....	10
5.2. VENTILI.....	10
5.3. BRODSKE PUMPE.....	11
5.4. KOMPRESORI.....	11
5.5. MJERNI UREĐAJI.....	12
6. SUSTAV ZA OBUSTAVU OPERACIJA UKRCAJA I ISKRCAJA U SLUČAJU NUŽDE ( <i>EMERGENCY SHUT DOWN – ESD</i> ).....	13
7. LUČKI TERMINALI.....	14
7.1. ULOGA LUČKIH TERMINALA.....	14
7.2. TEHNIČKA INFRASTRUKTURA TERMINALA.....	15
7.3. SIGURNOSNI STANDARDI TERMINALA.....	15

7.4. NEKI OD ZNAČAJNIJIH SVJETSKIH TERMINALA.....	16
7.5. LNG TERMINAL OMIŠALJ.....	16
7.6. BUDUĆNOST TERMINALA ZA UKAPLJENI PLIN.....	17
8. EKOLOŠKI ASPEKTI UKAPLJENIH PLINOVA.....	18
8.1. PREDNOSTI.....	18
8.2. NEDOSTATCI.....	18
9. ZAKLJUČAK.....	19
LITERATURA.....	20
POPIS SLIKA.....	21

## 1. UVOD

Ukapljeni plinovi, poput ukapljenog prirodnog plina (engl. *liquefied natural gas* – LNG) i ukapljenog naftnog plina (engl. *liquefied petroleum gas* – LPG) predstavljaju ključne energente u suvremenoj pomorskoj industriji. Zbog svojih specifičnih svojstava i prednosti u odnosu na konvencionalna goriva, ukapljeni plinovi se koriste u pomorskom prometu, prvenstveno kao teret, ali i kao gorivo za pogon brodova. Ukapljivanje plinova omogućuje njihov transport i skladištenje u tekućem stanju, što značajno smanjuje njihov volumen, te olakšava manipulaciju i korištenje u pomorstvu.

Razvoj tehnologije ukapljivanja plinova i primjena ove tehnologije u pomorskoj industriji doprinose smanjenju emisije štetnih plinova, čime se doprinosi očuvanju okoliša. Ovaj rad istražuje različite aspekte ukapljenih plinova u kontekstu pomorske industrije, uključujući procese ukapljivanja, transport i skladištenje, sigurnosne i ekološke aspekte, te ulogu ukapljenih plinova u budućnosti pomorstva. Cilj rada je pružiti sveobuhvatan pregled teme i ukazati na važnost ukapljenih plinova u održivom razvoju pomorske industrije.

## 2. VRSTE UKAPLJENIH PLINOVA

U pomorskoj industriji, ukapljeni plinovi zauzimaju posebno mjesto zbog svojih fizikalnih i kemijskih svojstava koja omogućuju njihovu efikasnu upotrebu u transportu i pogonu brodova. Najznačajnije vrste ukapljenih plinova koje se koriste u pomorstvu su ukapljeni prirodni plin i ukapljeni naftni plin. Ukapljeni plin je tekući oblik tvari koja bi, pri sobnoj temperaturi i atmosferskom tlaku, bila plin. Međunarodna pomorska organizacija (engl. *International Maritime Organization* – IMO), za potrebe Međunarodnog kodeksa za konstrukciju i opremanje brodova za prijevoz ukapljenih plinova u razlivenom stanju (engl. *International Code for the Construction and Equipment of Ships Carrying Liquefied Gases in Bulk* – IGC Code), povezuje zasićeni tlak pare s temperaturom. Stoga je usvojila sljedeću definiciju za ukapljene plinove koji se prevoze morem: Tekućine s apsolutnim tlakom para većim od 2,8 bara pri temperaturi od 37,8°C.

### 2.1. UKAPLJENI PRIRODNI PLIN (LNG)

Ukapljeni prirodni plin je prirodni plin koji se ukapljuje hlađenjem na temperaturu od približno - 162°C, čime se njegov volumen smanjuje oko 600 puta. LNG se uglavnom sastoji



od metana, uz manje količine etana, propana i drugih ugljikovodika. Zbog svoje visokih ekoloških prednosti, postaje sve popularniji kao gorivo za brodске motore.

Primjena LNG-a u pomorskoj industriji ima brojne prednosti. Prvo, LNG je znatno čišće gorivo u usporedbi s konvencionalnim brodskim gorivima kao što su teška goriva. Pri sagorijevanju LNG-a dolazi do smanjenih emisija štetnih plinova. Time se smanjuje negativan utjecaj na okoliš i doprinosi ispunjavanju sve strožih međunarodnih propisa o emisijama u pomorstvu, poput onih koje propisuje Međunarodna pomorska organizacija (IMO).

Drugo, zbog svoje tekuće prirode pri izuzetno niskim temperaturama, LNG zahtijeva posebne uvjete skladištenja i transporta. LNG tankeri, dizajnirani za prijevoz LNG-a, opremljeni su specijaliziranim izoliranim spremnicima koji omogućuju dugotrajno skladištenje i transport ukapljenog plina bez značajnog gubitka energije [1].

## **2.2. UKAPLJENI NAFTNI PLIN (LPG)**

Ukapljeni naftni plin (LPG) je smjesa ugljikovodika, pretežito propana i butana, koja se ukapljuje pod niskim tlakom ili hlađenjem na temperature od oko - 42°C. LPG se koristi za različite svrhe u pomorskoj industriji, uključujući gorivo za brodске motore, ali je u svakodnevnoj uporabi u kućanstvima te se koristi i za kuhanje, grijanje te kao industrijska sirovina.

LPG ima nekoliko prednosti koje ga čine privlačnim izborom za korištenje. Kao prvo, njegova veća energetska gustoća u usporedbi s LNG-om znači da može pohraniti više energije po jedinici volumena, što je važan faktor za dugotrajan transport. Također, LPG se može skladištiti pri višim temperaturama i nižem tlaku u usporedbi s LNG-om, što olakšava njegovu manipulaciju i transport.

Osim toga, LPG se široko koristi kao gorivo u mnogim zemljama zbog svoje relativne dostupnosti i nižih troškova u usporedbi s drugim gorivima. LPG tankeri opremljeni su posebnim spremnicima za skladištenje ovog plina, a zbog nižih temperaturnih zahtjeva, ovi brodovi često imaju niže troškove održavanja u usporedbi s LNG tankerima.

LPG također nudi ekološke prednosti jer sagorijeva čišće od mnogih konvencionalnih goriva, smanjujući emisije štetnih plinova, iako su te prednosti nešto manje izražene u usporedbi s LNG-om.

Osim LNG-a i LPG-a, u pomorskoj industriji se koriste i drugi ukapljeni plinovi, poput etilena i amonijaka. Ovi plinovi zahtijevaju posebne uvjete skladištenja i transporta a koriste se uglavnom kao industrijske sirovine ili specijalizirani teret.

Ove vrste ukapljenih plinova omogućuju fleksibilnost u korištenju i transportu u pomorskoj industriji, te igraju ključnu ulogu u prelasku na održivije izvore energije [2].

### **3. PROCES UKAPLJIVANJA PLINOVA**

Proces ukapljivanja plinova ključan je za omogućavanje skladištenja i transporta prirodnog plina i drugih plinovitih goriva u pomorskoj industriji. Ukapljivanje podrazumijeva pretvaranje plinovitog stanja tvari u tekuće, pri čemu dolazi do značajnog smanjenja volumena, što omogućuje efikasniju manipulaciju, skladištenje i transport. Ukapljivanje se postiže hlađenjem plina do ekstremno niskih temperatura ili primjenom visokog tlaka, ovisno o vrsti plina.

Ukapljivanje prirodnog plina (LNG) provodi se postupkom hlađenja, gdje se prirodni plin, sastavljen pretežito od metana, hladi do temperature od približno - 162°C. Na ovoj temperaturi metan prelazi iz plinovitog u tekuće stanje. Proces započinje čišćenjem prirodnog plina od nečistoća kao što su voda, ugljični dioksid, sumporovodici i teži ugljikovodici, koji bi inače mogli zamrznuti i oštetiti opremu tijekom hlađenja. Nakon toga, plin se postupno hladi pomoću izmjenjivača topline kroz nekoliko faza, dok ne dosegne potrebnu temperaturu. Tekući plin se zatim pohranjuje u kriogenske spremnike koji su specijalno dizajnirani za održavanje niske temperature i minimalizaciju gubitaka zbog isparavanja.

Ukapljivanje naftnog plina (LPG) provodi se primjenom relativno niskih tlakova ili hlađenjem na temperature do oko - 42°C za propan, dok butan postaje tekuć na temperaturama oko 0°C. LPG, koji se sastoji pretežito od propana i butana, ukapljuje se mnogo lakše od prirodnog plina, pa su za taj proces potrebni niži troškovi energije. Proces započinje kompresijom plina pod visokim tlakom, a zatim slijedi hlađenje kroz izmjenjivače topline. Kada se postignu potrebni uvjeti, plin prelazi u tekuće stanje i pohranjuje se u spremnicima pod tlakom koji su izolirani kako bi se smanjili gubici uslijed isparavanja.

Ukapljivanje plinova omogućuje njihovo efikasnije skladištenje i transport, a također doprinosi očuvanju okoliša smanjenjem emisije štetnih plinova. LNG, zbog svoje niske

temperature ukapljivanja, zahtijeva sofisticiranije tehnološke sustave, dok je proces ukapljivanja LPG-a jednostavniji i energetski manje zahtjevan.

Oprema korištena u procesu ukapljivanja, poput izmjenjivača topline, kompresora i spremnika, mora biti izuzetno pouzdana i otporna na ekstremne uvjete kako bi se osigurao kontinuitet u procesu i sigurnost rada. Efikasno upravljanje procesom ukapljivanja također je ključno za smanjenje troškova i gubitaka energije, što doprinosi ekonomskoj isplativosti sustava [3].

#### **4. BRODOVI ZA PRIJEVOZ UKAPLJENOG PLINA**

Transport ukapljenih plinova, ključan je element, značajan globalnoj ekonomiji i pomorskoj industriji. Ukapljeni plinovi se prevoze na velike udaljenosti, najčešće morskim putem, što zahtijeva specijalizirane brodove dizajnirane za siguran i učinkovit transport tih energenata.

Transport ukapljenog plina morem, koji se smatra kao opasan te vrlo lako zapaljiv teret, kompleksan je proces. Ukapljeni plin prvo se prevezio u bocama pod tlakom, koje su bile pričvršćene na palubi. Prvi namjenski registriran brod u prvoj polovici 20. stoljeća bio je M/V "Agnita" izgrađen u brodogradilištu u Engleskoj. Prvi veliki brod za prijevoz propana nakon Drugog svjetskog rata bio je „Nathalie O. Warren" s kapacitetom od 6050 kubičnih metara, izgrađen u brodogradilištu Beaumontu Texas. Početkom 1960.-ih japanska brodogradnja počela je sve više ulagati u izgradnju LNG tankera te je do 1970. isporučila 132 tankera za prijevoz ukapljenog naftnog plina raznim vlasnicima brodova. Godine 1982. izgrađena su 162 broda za prijevoz ukapljenog plina preko 20.000 kubičnih metara [4].

Izgradnja broda za transport ukapljenog plina složen je i financijski zahtjevan proces. Cijena takvog broda može biti tri do četiri puta veća od troškova gradnje standardnog tankera. Međutim, svi brodovi koji prevoze ukapljene plinove dijele određene zajedničke karakteristike koje značajno utječu na troškove gradnje: dvostruku oplatu, višestruke zasebne tankove za teret te specijaliziranu izolaciju tankova. Na Slici 1. prikazan je LNG tanker dok je na Slici 2. prikazan LPG tanker.

Budući da se ukapljeni plin transportira pri vrlo niskim temperaturama, teretni tank može apsorbirati toplinu iz okoline, što uzrokuje zagrijavanje i isparavanje određenih dijelova tereta. Količina isparenog plina ovisi o različitim faktorima i prosječno iznosi oko 0,15 % ukupnog volumena tanka dnevno. Jedno od rješenja za taj problem je ugradnja jedinice za

ukapljivanje koja ponovno ukapljuje ispareni plin i vraća ga u teretni prostor. Druga opcija je sustav koji prikuplja pare tereta putem kompresora i šalje ga u kotao, gdje se koristi kao gorivo za proizvodnju pare koja pokreće plinsku turbinu.



Slika 1. LNG tanker.

Izvor: [Liquefied natural gas – LNG – Our energy \(our-energy.com\)](https://www.our-energy.com)



Slika 2. LPG tanker.

Izvor: [VLGC spot rates jump on rising volumes | TradeWinds \(tradewindsnews.com\)](https://www.tradewindsnews.com)

#### **4.1. KONSTRUKCIJA BRODOVA ZA PRIJEVOZ UKAPLJENOG PLINA**

Ovi brodovi dizajnirani su s posebnom pažnjom na sigurnost, stabilnost i kapacitet. Predstavljaju vrhunac inženjerskog znanja i tehnologije zbog specifičnih zahtjeva i svojstva ukapljenih plinova. Trup broda mora biti izuzetno čvrst kako bi izdržao sile valova i tereta. Zbog toga se koristi čelik koji je sposoban podnijeti ekstremne uvjete. Dizajn trupa mora omogućiti optimalan raspored težine kako bi se osigurala stabilnost broda, posebno tijekom utovara i istovara ukapljenih plinova. Poseban naglasak stavlja se na ojačanja u području oko

tankova, gdje su potrebne dodatne strukturne komponente koje mogu podnijeti opterećenja uzrokovana vrlo niskim temperaturama u slučaju LNG-a ili visokim tlakovima kod LPG-a.

## **4.2. SPREMNICI TERETA**

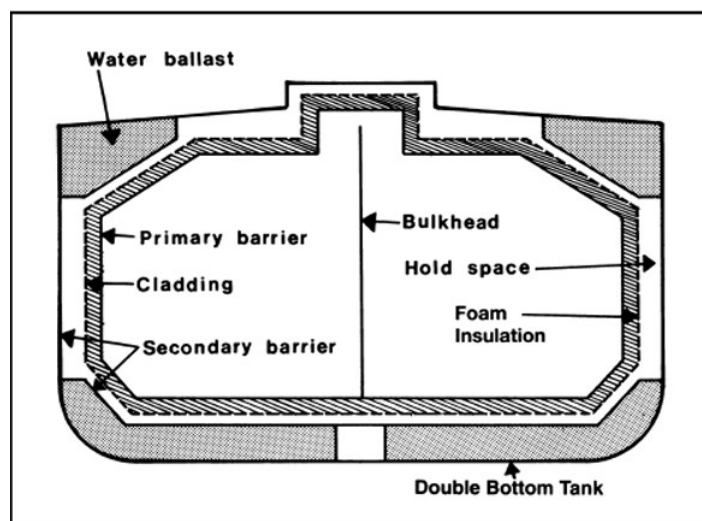
Spremnici tereta na brodovima za transport ukapljenih plinova, kao što su LNG i LPG tankeri, predstavljaju ključni element u osiguravanju sigurnog i učinkovitog prijenosa tih plinova preko velikih udaljenosti. Zbog specifičnih svojstava ukapljenih plinova, kao što su vrlo niske temperature i visoki tlakovi, spremnici moraju biti dizajnirani da izdrže ekstremne uvjete i spriječe bilo kakvo isparavanje ili curenje plina. Spremnici tereta, sukladno SIGTTO preporukama (engl. *Society of International Gas Tanker and Terminal Operators – SIGTTO*), podijeljeni su na neovisne (samonosive) i membranske [3].

### **4.2.1. NEOVISNI (SAMONOSIVI) SPREMNICI**

Ovi spremnici ne ovise o strukturi broda, što znači da ne doprinose čvrstoći broda i potpuno su neovisni u smislu konstrukcije. Podijeljeni u nekoliko podtipova ovisno o tlaku, obliku i materijalima od kojih su izrađeni. Podijeljeni su na tip A, tip B i tip C [3].

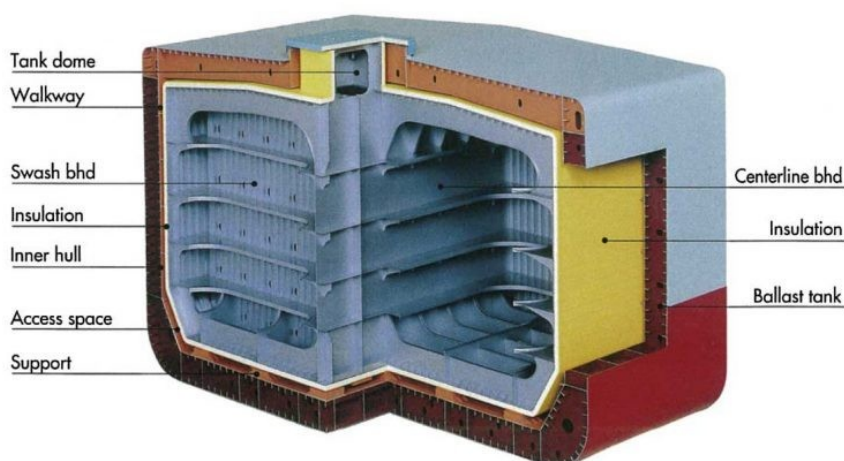
Tip A spremnici (Slika 3.) su prizmatičnog oblika i obično se koriste za prijevoz ukapljenih plinova na gotovo atmosferskom tlaku. Ovi spremnici moraju biti opremljeni s odgovarajućom sekundarnom barijerom, odnosno sustavom za zadržavanje tereta u slučaju curenja, zbog niskog tlaka koji nose. Izrađeni su od materijala poput čelika s posebnim izolacijskim slojevima. Uglavnom se koriste na LNG brodovima [3]. Slika 3. prikazuje izgled i presjek spremnika tipa A.

Tip B spremnici (Slika 4.), prizmatičnog ili sferičnog oblika, izrađeni su od aluminija ili čelika s visokim postotkom nikla (najčešće oko 9 %), što ih čini izuzetno otpornim na ekstremno niske temperature. Spremnici tipa B imaju dodatne sigurnosne mehanizme poput složenijih sustava za procjenu naprezanja. Za razliku od tipa A, spremnici tipa B zahtijevaju manje prostora za sekundarnu barijeru zbog njihovih specifičnih konstrukcijskih karakteristika. Oni također mogu podnijeti više termičko širenje i stezanje bez opasnosti od oštećenja. Najčešće se koriste na LNG brodovima i brodovima za prijevoz ukapljenog etilenskog plina [3]. Slika 4. prikazuje presjek i izgled spremnika tipa B.



Slika 3. Presjek prizmatskog spremnika tipa A.

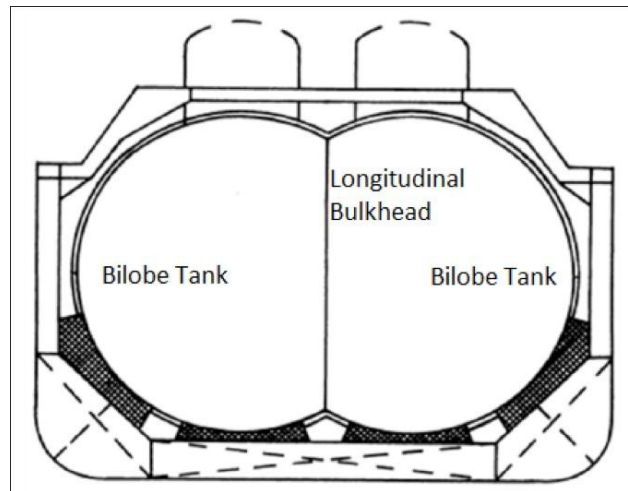
Izvor: [Tank types found on Gas Carriers \(updated June 2020\) \(marineteacher.com\)](http://marineteacher.com)



Slika 4. Presjek prizmatskog spremnika tipa B.

Izvor: [LNG Fundamentals and Information about Natural Gas \(sea-man.org\)](http://sea-man.org)

Tip C spremnici su tlačne posude, najčešće cilindričnog ili sferičnog oblika, dizajnirane za veći unutarnji tlak, obično iznad 2 bara. Spremnici tipa C ne zahtijevaju sekundarnu barijeru jer su pod višim tlakom i koriste se za plinove koji su manje sklони isparavanju pri niskim temperaturama. Ovi spremnici se najčešće koriste na LPG brodovima [5]. Presjek spremnika ovog tipa prikazan je na Slici 5.



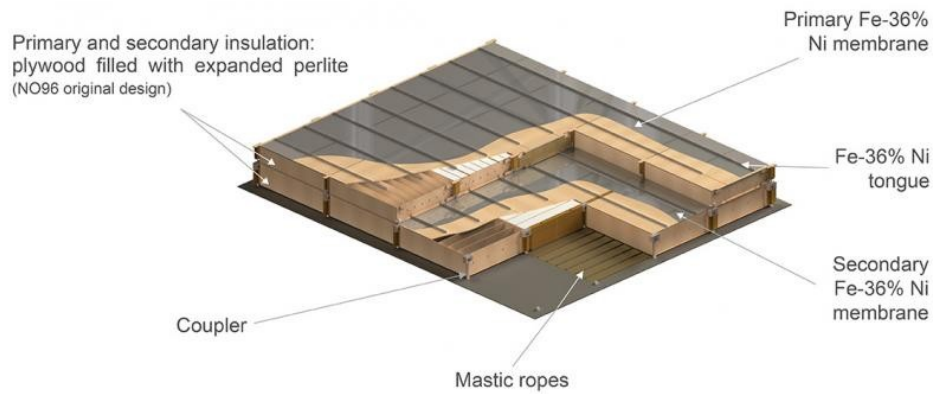
Slika 5. Presjek spremnika tipa C.

Izvor: [Tank types found on Gas Carriers \(updated June 2020\) \(marineteacher.com\)](https://www.marineteacher.com/)

#### 4.2.2. MEMBRANSKI SPREMNICI

Membranski spremnici uvelike se razlikuju od neovisnih spremnika. Oni su integrirani unutar strukture broda i ovise o njegovoj oplati. Membranski sustavi su razvijeni kako bi omogućili efikasniji transport ukapljenog plina, uz optimalnu upotrebu prostora i maksimalnu zaštitu tereta. Dva najčešće korištena sustava membranskih spremnika su GT No. 96 i Technigaz Mark III [3].

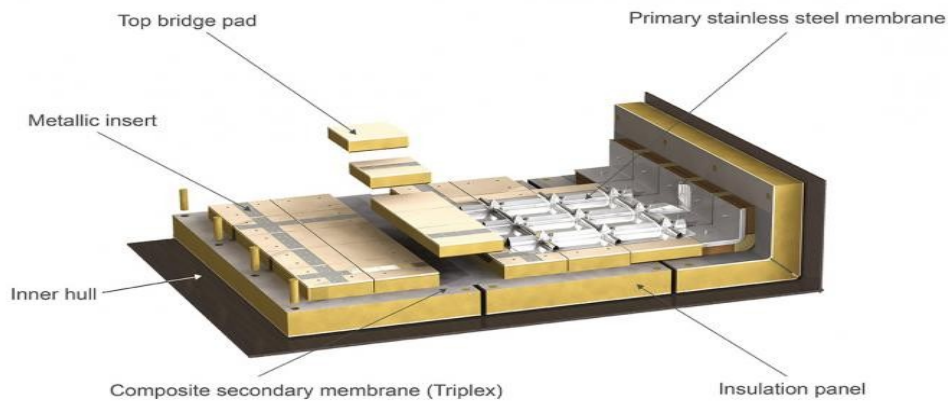
GT No. 96 je dobio ime po kompaniji koja ga je osmislila, Gaz transport, model 96. Ovaj sustav koristi membrane izrađene od legure čelika poznate kao invar, koja ima vrlo nisku stopu termičke ekspanzije. To omogućava da membrana izdrži ekstremne temperaturne promjene bez oštećenja. GT No. 96 koristi slojeve izolacije postavljene između membrane i strukture broda kako bi se zadržala hladnoća unutar spremnika i spriječilo prekomjerno isparavanje plina. Ovaj sustav omogućava izravno prenošenje teretnog opterećenja na strukturu broda. Koristi se uglavnom za LNG tankere gdje je potrebno održavati vrlo niske temperature unutar spremnika [3]. Presjek spremnika ovog tipa nalazi se na Slici 6.



Slika 6. Presjek spremnika GT No. 96.

Izvor: [NO96 system | GTT](#)

Technigaz Mark III sustav koristi nehrđajući čelik za izradu membrana, uz slojeve izolacije s učinkovitijim zadržavanjem temperature. Izolacija se sastoji od panela s poliuretansko pjenu i staklenim vlaknima, koji sprječavaju gubitak energije. Ovaj sustav omogućuje bolje korištenje unutarnjeg prostora broda jer zahtijeva tanje izolacijske slojeve u usporedbi s drugim sustavima. To doprinosi smanjenju gubitaka tijekom transporta ukapljenog plina. Najčešće se koristi za LNG tankere [3]. Na Slici 7. prikazan je presjek ovog tipa spremnika.



Slika 7. Presjek spremnika Technigaz Mark III.

Izvor: [Mark III systems | GTT](#)

U oba sustava, ključan aspekt je sposobnost spremnika da održavaju sigurnost tereta i umanje gubitke uslijed isparavanja (engl. *boil-off gas*), što je osobito važno zbog izuzetno niskih temperatura potrebnih za držanje metana u tekućem stanju.



## 5. OPREMA ZA RUKOVANJE UKAPLJENIM PLINOM

Na brodovima za prijevoz ukapljenog plina te na lučkim terminalima za prihvat takvih brodova, koristi se specifična oprema za rukovanje i manipulaciju teretom, prilagođena zahtjevima niskih temperatura i visokih tlakova. Oprema mora biti izrađena sukladno normama klasifikacijskih društava kako bi mogla izdržati ekstremne uvjete, kao što je niska temperatura (kod LNG-a do  $-162^{\circ}$ ). U opremu koja se koristi ubrajaju se cjevovodi, kompresori, ventili, mjerni sustavi, itd. [3].

### 5.1. SUSTAV CJEVOVODA

Cjevovodi se koriste za prijenos ukapljenog plina između broda i terminala i prijenos unutar samoga broda između spremnika (Slika 8.). Cijevi su izrađene od nehrđajućeg čelika te su otporne na niske temperature i visoke tlakove. Zbog naglog hlađenja čest je slučaj da se vanjski dio cijevi zaledi. Cijevi su ograđene sa izolacijskim slojevima kako bi se umanjio toplinski gubitak. Cijevi su opremljene fleksibilnim spojevima kako bi mogle podnijeti pomicanje broda termičko širenje materijala zbog različitih temperatura. Posebno je važno da su ti spojevi nepropusni zbog opasnosti od isparavanja i curenja plina [3].



Slika 8. Sustav cjevovoda na brodu za prijevoz ukapljenog plina.

Izvor: [By Pipeline or Ship - Transporting Today's Oil & Gas | Pipeline Post \(sawyermfg.com\)](https://www.pipelinepost.com/transporting-todays-oil-gas)

### 5.2. VENTILI

Ventili su sastavni dio sustava cjevovoda. Omogućuju preciznu kontrolu protoka plina, kao i odvajanje različitih sustava kako bi se izbjeglo miješanje plinova. Ovi ventili izrađeni su od materijala otpornih na niske temperature, poput nehrđajućeg čelika, te su izolirani kako bi se

spriječio gubitak energije. Na brodovima za prijevoz ukapljenih plinova najčešće se koriste kuglasti i leptirasti ventili.

Kuglasti ventili koriste se na mjestima gdje je potrebno kvalitetno brtvljenje. Kuglični ventili imaju velik raspon količine protoka, te se zbog toga ugrađuju kao regulacijski ventili. Njihova izrada skuplja je od leptirastih ventila.

Leptirasti ventili mogu biti pokretani ručno ili uz pomoć hidraulike. Hidraulično pokretanim leptirastim ventilima upravlja se iz kontrolne sobe tereta. Ovi ventili su precizni i jednostavni za upotrebu ukoliko se redovito održavaju.

Nepovratni ventili se ugrađuju se u cjevovode odmah iza pumpi i kompresora kako bi spriječili povrat nekog medija. Koriste se i u sustavu inertnog plina kako bi spriječili da pare tereta iz spremnika dođu u strojarnicu, gdje se nalazi generator inertnog plina. Najvažniji dio nepovratnog ventila je brtva. Kako bi ventil bio nepropustan brtva mora biti čista i potpuno čitava bez ikakvih oštećenja.

Uloga sigurnosnog ventila je da ta ukoliko dođe do naglog porasta tlaka u tanku ispusti pare tereta u atmosferu te na taj način smanji tlak u tanku. Najveća dopuštena vrijednost (engl. *Maximum Allowable Relief Valve Setting – MARVS*) pri kojoj će se sigurnosni ventil otvoriti je 25 Kpa. Također najveća dopuštena vrijednost može se povećati, izuzevši membranske brodove, tada sigurnosni ventil otvara kada tlak u spremniku tereta dosegne 40 Kpa [6].

### **5.3. BRODSKE PUMPE**

Koriste za prijenos ukapljenog plina iz spremnika broda u kopnene spremnike terminala. Ove pumpe mogu raditi na vrlo niskim temperaturama i visokim tlakovima, te su specijalizirane za rad s ukapljenim plinovima. Najčešće se koriste centrifugalne pumpe. Velika prednost ovakvih pumpi je ta što imaju veliki protok. Zbog specifičnih uvjeta rada, ove pumpe moraju biti napravljene od kvalitetnih i otpornih materijala. Njihov rad omogućava učinkovitu manipulaciju teretom, čime se sprječava stvaranje prevelikih količina isparenog plina [3].

### **5.4. KOMPRESORI**

Na brodovima za prijevoz ukapljenog plina kompresori se koriste za upravljanje isparenim plinom prilikom operacija ukrcaja i iskrcaja te tokom plovidbe. Mogu se podijeliti na HD (engl. *high duty*) i LD (engl. *low duty*) kompresore.

HD kompresori (Slika 9.) su dizajnirani za korištenje prilikom ukrcaja kada se u tanku stvaraju velike količine para tereta te ih je potrebno vratiti na terminal. Također se koriste i u specijalnim operacijama kao što je zagrijavanje tankova prije odlaska u redoviti remont.

LD kompresori koriste se na brodovima koji ukapljeni plin koriste kao gorivo za pokretanje parne turbine, stoga LD kompresori ispareni plin iz tanka, pod pritiskom koji je potreban, usmjeravaju prema strojarnici kako bi se koristio kao pogonsko gorivo.



Slika 9. HD kompresor.

Izvor: [LNG Vapor Return Compressors | Barber-Nichols](#)

## 5.5. MJERNI UREĐAJI

Za precizno rukovanje ukapljenim plinom i održavanje optimalnih uvjeta prilikom transporta, brodovi su opremljeni naprednim sustavima za mjerenje i nadzor. Postoje radarski mjerači (engl. *radar guages*) koji određuju razinu medija u spremniku. Ovi mjerači su izuzetno precizni i velika je prednost ta što nema kontakta s medijem jer uređaj odašilje radarske valove. Mjerači tlaka (engl. *pressure guages*) kontinuirano prate tlak unutar spremnika tereta te unutar cjevovoda. Povezani su sa sigurnosnim i alarmnim sustavima pa ukoliko tlak dostigne unaprijed postavljene vrijednosti oglasiti će se alarm. Također postoje uređaji koji kontinuirano prate temperaturu unutar spremnika te unutar cjevovoda [3].

## **6. SUSTAV ZA OBUSTAVU OPERACIJA UKRCAJA I ISKRCAJA U SLUČAJU NUŽDE (*EMERGENCY SHUT DOWN* – ESD)**

Ovaj sustav poznat još pod nazivom ESD sustav (engl. *Emergency Shut Down*) osmišljen je da umanjí posljedice, ukoliko dođe do incidenta prilikom manipuliranja teretom (Slika 10.). Kada je brod privezan na terminalu, brodski sustav spaja se sa sustavom terminala. Spoj broskog sustava sa terminalom se ostvaruje putem ESD veze tj. kabelom, te može biti električni, pneumatski i optički. Važno je razlikovati ESD 1 i ESD 2 sustav. Zadaća ESD 1 sustava je da, ukoliko dođe do bilo kakvog incidenta koji bi ugrozio živote posade i radnika na terminalu te eventualno doveo do oštećenja broda, automatski ugasi opremu koja se upotrebljava u tom trenutku, te se tako obustavi operacija ukrcaja ili iskrcaja. Do aktivacije sustava može doći automatski te ručno. Automatski će se aktivirati uz pomoć raznih senzora u tankovima i na palubi. Npr. u slučaju požara prekidač se otapa te aktivira sustav ili ako razina u tanku dosegne unaprijed zadani nivo u tanku također će se aktivirati. Ručno se može aktivirati uz pomoć prekidača koji se nalaze: duž palube, prekidača na zapovjedničkom mostu, prekidača u kontrolnoj sobi tereta, prekidača u blizini kompresora te prekidača na terminalu. Bilo koji od navedenih načina aktivacije ESD 1 sustava prouzročiti će zatvaranje ventila na spremniku tereta, zaustavljanje svih pumpi tereta, zaustavljanje kompresora, zatvaranje palubnih priključaka, zaustavljanje ventilacije nadgrađa.

ESD 2 sustav se isključivo aktivira sa terminala. Aktivacijom ESD 2 sustava zaustavljaju se sve operacije vezane za teret, isto kao i kod ESD 1 sustava. Razlika je u tome što će se, aktivacijom sustava ESD 2, ruke za manipuliranje teretom automatski odvojiti od palubnih priključaka na brodu [7].



Slika 10. Korisničko sučelje ESD sustava.

Izvor: [ESD Control Panel \(hcpetroleum.hk\)](http://hcpetroleum.hk)

## 7. LUČKI TERMINALI

Lučki terminali za brodove koji prevoze ukapljeni plin ključni su za međunarodni promet ukapljenih plinova. Ovi terminali služe kao središta za utovar, istovar i skladištenje plinova u ukapljenom obliku te omogućuju siguran i učinkovit prijenos s brodova na kopnenu mrežu za daljnju distribuciju ili korištenje. Kako globalna potražnja za ukapljenim plinovima raste, raste i značaj ovih terminala, posebno u pogledu sigurnosti, tehnoloških zahtjeva i ekoloških standarda.

### 7.1. ULOGA LUČKIH TERMINALA

LNG i LPG terminali omogućuju važne aktivnosti unutar lanaca opskrbe plinom, od prijema ukapljenih plinova do njihove prerade i distribucije na kopno. Oni su neophodni za povezivanje globalnih proizvođača plina s potrošačima u različitim regijama svijeta. S obzirom na to da ukapljeni plin zauzima znatno manji volumen od plina u plinovitom stanju, terminali moraju biti opremljeni naprednim tehnologijama za skladištenje, pretovar i ponovno uplinjavanje plinova.

Glavne funkcije terminala uključuju:

- Prijem i uplinjavanje: terminali primaju ukapljeni plin iz tankera, a zatim ga ponovno uplinjavaju za daljnju distribuciju putem plinovoda.
- Utovar i istovar: LNG i LPG tankeri dolaze na terminale gdje se plin istovaruje u obalne spremnike ili pretovara na druge brodove ili prijevozna sredstva.
- Skladištenje: terminali posjeduju velike skladišne kapacitete, opremljene spremnicima za LNG ili visokotlačnim spremnicima za LPG.
- Distribucija: s terminala ukapljeni plin distribuira se dalje plinovodima, kamionima-cisternama ili željeznicom.

## **7.2. TEHNIČKA INFRASTRUKTURA TERMINALA**

Tehnička infrastruktura LNG i LPG terminala vrlo je složena, jer je nužno osigurati sigurno skladištenje i rukovanje plinovima pod niskim temperaturama ili visokim tlakom. Luka mora biti opremljena odgovarajućim dokovima za prijem brodova za ukapljeni plin. To uključuje posebne vezove koji mogu prihvatiti LNG i LPG tankere, ovisno o njihovoj veličini. LNG brodovi često su veći od LPG tankera, pa terminali moraju biti dizajnirani za brodove velikog gaza i širine. Terminal je opremljen cjevovodima kako bi se plin sigurno doveo do specijaliziranih spremnika. Na terminalima za LNG, sustavi za ponovno uplinjavanje igraju ključnu ulogu. Oni koriste proces zagrijavanja ukapljenog plina kako bi ga vratili u plinovito stanje. Ovaj proces može koristiti izmjenjivače topline ili sustave sa zračnim plamenicima, a plin se nakon toga distribuira putem plinovoda [6].

## **7.3. SIGURNOSNI STANDARDI TERMINALA**

Sigurnost i zaštita okoliša ključni su aspekti svakog LNG i LPG terminala. Ukapljeni plinovi mogu biti vrlo opasni zbog svojih fizikalnih svojstava tj. niske temperature u slučaju LNG-a i visokog tlaka u slučaju LPG-a. Curenje ili eksplozija plinova mogu izazvati ozbiljne incidente.

- Sigurnosne zone i regulacije: lučki terminali moraju biti usklađeni s međunarodnim sigurnosnim standardima, uključujući regulative Međunarodne pomorske organizacije i SIGTTO-a koji daje preporuke za sigurno upravljanje terminalima i tankerima.

- Sustavi za otkrivanje curenja: terminali koriste napredne sustave za otkrivanje curenja plina, poput plinskih senzora, infracrvenih kamera i sustava za detekciju tlaka, kako bi na vrijeme otkrili i spriječili bilo kakva curenja ili kvarove u sustavu.
- Vatrogasni sustavi: LNG i LPG terminali opremljeni su robusnim vatrogasnim sustavima, uključujući vodene zavjese, sustave za gašenje pjenom i sustave za gašenje pomoću inertnih plinova, kako bi se smanjila mogućnost požara ili eksplozije [6].

#### 7.4. NEKI OD ZNAČAJNIJIH SVJETSKIH TERMINALA

- Zeebrugge LNG terminal (Belgija): Jedan od glavnih LNG terminala u Europi, Zeebrugge ima ključnu ulogu u opskrbi zapadnoeuropskog tržišta prirodnim plinom. Terminal posjeduje visokotehnološke sustave za ponovno uplinjavanje i široku mrežu za distribuciju plina putem plinovoda.
- Ras Laffan LNG terminal (Katar): Ras Laffan je najveći LNG terminal na svijetu i jedan od najnaprednijih po pitanju tehnoloških inovacija. Terminal se prostire na nekoliko stotina hektara i opremljen je najnovijom tehnologijom za skladištenje i transport LNG-a. Slika 11. prikazuje ovaj terminal.
- Fujairah LPG terminal (Ujedinjeni Arapski Emirati): Ovaj terminal smješten na strateškoj lokaciji ima kapacitete za skladištenje i distribuciju LPG-a diljem Azije i Europe [8].



Slika 11. Ras Laffen LNG terminal u Katru.

Izvor: [LNG Port, Ras Laffan Industrial City, Qatar Wayne Eastep \(sqsqatar.org\)](http://sqsqatar.org)

## 7.5. LNG TERMINAL OMIŠALJ

LNG terminal u Omišlju na otoku Krku, otvoren 2021. godine, ključan je za energetska sigurnost Hrvatske i regije. Kao plutajući FSRU terminal (engl. *Floating Storage and Regasification Unit* – FSRU), ima kapacitet od 2,6 milijardi kubičnih metara plina godišnje te omogućuje skladištenje i ponovno uplinjavanje LNG-a. Ovaj terminal značajno smanjuje ovisnost Hrvatske o ruskom plinu, omogućujući uvoz iz različitih dijelova svijeta. Zahvaljujući svojoj geostrateškoj lokaciji, terminal omogućuje opskrbu plinom Hrvatske, Mađarske, Slovenije i šire regije [9].



Slika 12. LNG terminal u Omišlju na otoku Krk u pripremi iskrcajnih operacija sa tankerom.

Izvor: [U Omišalj stigao LNG tanker Methane Nile Eagle, pretovar će trajati do srijede – Bodulija.net](https://www.bodulija.net)

## 7.6. BUDUĆNOST TERMINALA ZA UKAPLJENI PLIN

Razvoj LNG i LPG terminala nastavit će se ubrzavati zbog rastuće globalne potražnje za ukapljenim plinom kao čistim gorivom u usporedbi s ugljenom i naftom. Terminali će morati pratiti tehnološki napredak, osobito u vezi s povećanjem kapaciteta, sigurnosnih sustava i smanjenjem ekološkog otiska.

Plutajući LNG terminali, poznati kao FSRU, su brodovi koji služe za skladištenje i uplinjavanje ukapljenog prirodnog plina. Ovi terminali omogućuju brzu izgradnju i fleksibilno rješenje za regije koje trebaju opskrbu plinom, ali nemaju kopnene terminale. FSRU jedinice mogu primiti LNG teret iz drugih brodova za prijevoz ukapljenog plina, skladištiti ga i uplinjavati, te zatim plin distribuirati putem cjevovoda na kopnu. Prednosti plutajućih



terminala uključuju niže troškove izgradnje, kraće vrijeme postavljanja i mogućnost premještanja terminala prema potrebama tržišta. Također, smanjuju ekološki utjecaj jer ne zahtijevaju gradnju velikih kopnenih postrojenja [10].

## **8. EKOLOŠKI ASPEKTI UKAPLJENIH PLINOVA**

Ukapljeni plinovi, osobito LPG i LNG, igraju važnu ulogu u energetskej tranziciji, budući da nude ekološki prihvatljivije opcije u odnosu na tradicionalna fosilna goriva poput ugljena i nafte. Međutim, iako pružaju određene ekološke prednosti, upotreba ukapljenih plinova nije bez izazova i potencijalnih negativnih utjecaja.

### **8.1. PREDNOSTI**

Ukapljeni plinovi, u usporedbi sa ostalim konvencionalnim gorivima kao što su ugljen i naftni derivati, uvelike doprinosi smanjenju emisije stakleničkih plinova. LNG emitira do 20 % manje CO<sub>2</sub> u odnosu na sagorijevanje nafte ili ugljena. Zbog manje količine ugljika u molekuli prirodnog plina, emisije CO<sub>2</sub> su značajno niže u usporedbi s tradicionalnim gorivima. LPG također ima niži sadržaj ugljika u usporedbi s ugljenom ili naftnim derivatima, što znači da pri izgaranju emitira manje ugljikovog dioksida.

Korištenje ukapljenih plinova značajno smanjuje emisije drugih zagađujućih tvari, kao što su sumporovi oksidi (SO<sub>x</sub>), dušikovi oksidi (NO<sub>x</sub>). LNG gotovo ne sadrži sumpor, pa se emisije SO<sub>x</sub>-a smanjuju na gotovo nulu, što pozitivno utječe na kvalitetu zraka, posebice u obalnim područjima i područjima s velikim pomorskim prometom. Emisije NO<sub>x</sub>-a smanjuju se za 85%, što pomaže u smanjenju kiselih kiša i onečišćenja zraka. LPG također smanjuje emisije SO<sub>x</sub>-a i NO<sub>x</sub>-a, premda ne u istoj mjeri kao LNG, ali i dalje doprinosi čistijem zraku.

Brodovi koji prevoze ukapljene plinove imaju napredne sigurnosne sustave za sprječavanje curenja, što smanjuje rizik od izlivanja i onečišćenja mora u usporedbi s tankerima koji prevoze naftu. U slučaju curenja, LNG isparava i disperzira se u atmosferu, ne ostavljajući dugotrajne štetne posljedice na morski ekosustav, za razliku od izlivanja nafte koja može prouzročiti dugotrajno zagađenje i štetu [11].

### **8.2. NEDOSTATCI**

Iako sagorijevanje prirodnog plina (LNG) proizvodi manje CO<sub>2</sub> od nafte ili ugljena, metan koji čini glavni sastojak prirodnog plina ima znatno veći potencijal globalnog zagrijavanja.

Ako dođe do curenja metana tijekom proizvodnje, transporta ili skladištenja, njegovi negativni utjecaji na klimatske promjene mogu biti ozbiljni.

Proces ukapljivanja prirodnog plina zahtijeva značajnu količinu energije. Pri hlađenju prirodnog plina na temperaturu od  $-162^{\circ}\text{C}$ , kako bi postao tekućina (LNG), troši se znatna količina energije, što povećava ukupne emisije  $\text{CO}_2$  u procesu proizvodnje.

Iako LNG i LPG predstavljaju čišću alternativu u odnosu na ugljen i naftu, oni su i dalje fosilna goriva. Njihovo sagorijevanje i dalje doprinosi emisijama stakleničkih plinova, te stoga ne mogu dugoročno biti rješenje za dekarbonizaciju.

Ukapljeni plinovi igraju ključnu ulogu kao tranzicijska rješenja u prijelazu prema čistim energijama. Zbog svoje dostupnosti i fleksibilnosti u globalnom transportu, mogu poslužiti kao most prema budućnosti s više obnovljivih izvora energije. Povećana uporaba LNG-a u brodskom prometu i industriji dovodi do smanjenja emisija dok se ne razviju dovoljno veliki kapaciteti za korištenje obnovljivih izvora [11].

## 9. ZAKLJUČAK

Ukapljeni plinovi imaju ključnu ulogu u suvremenom energetske sustavu i transportu. Kao sve važniji izvori energije, oni nude ekološki prihvatljiviju alternativu u usporedbi s konvencionalnim fosilnim gorivima. Transport ukapljenih plinova putem specijaliziranih brodova zahtijeva visoku razinu tehnološke sofisticiranosti, od sustava za rukovanje plinovima i održavanje sigurnosti do optimizacije utovara i istovara, kao i sustava za kontrolu tlakova i temperature. Razvoj brodova za prijevoz ukapljenih plinova donosi značajne prednosti, ne samo u smislu povećane energetske učinkovitosti već i u smanjenju štetnih emisija i negativnih utjecaja na okoliš. Tehnološka rješenja, kao što su korištenje *boil-off* plina za pogon brodova, napredni sustavi za kontrolu curenja i smanjenje ispuštanja zagađujućih tvari, doprinose očuvanju okoliša te omogućuju siguran i učinkovit transport ovih važnih energenata.

Sigurnosni aspekti transporta ukapljenih plinova i usklađenost s međunarodnim standardima dodatno naglašavaju važnost industrije ukapljenih plinova u smanjenju globalnog zagađenja i prijelazu na održivije izvore energije.

Zaključno, brodovi za prijevoz ukapljenih plinova predstavljaju tehnološki napredak koji omogućuje globalnu trgovinu ovim važnim resursima, uz minimalan utjecaj na okoliš, pridonoseći globalnim naporima u borbi protiv klimatskih promjena.

## LITERATURA

1. Fundamentals of LNG, dostupno na: [LNG Fundamentals and Information about Natural Gas \(sea-man.org\)](#)
2. Liquefied petroleum gas, dostupno na: [Liquefied petroleum gas - Wikipedia](#)
3. Interna sveučilišna skripta iz predmeta Tehnologija prijevoza tekućih tereta.
4. Komadina, P. Prijevoz ukapljenih plinova morem. Pomorski fakultet, Rijeka, 1992.
5. Tank types found on gas carriers, dostupno na: [Tank types found on Gas Carriers \(updated June 2020\) \(marineteacher.com\)](#)
6. Liquefied gas handling, dostupno na: [Liquefied\\_Gas\\_Handling\\_Principles \(wordpress.com\)](#)
7. IGC code, dostupno na: <https://imorules.com/IGC.html>
8. List of LNG terminals, dostupno na: [List of LNG terminals - Wikipedia](#)
9. LNG Hrvatska, dostupno na: [Terminal - LNG Hrvatska](#)
10. Plutajući terminali, dostupno na: [What is Floating Storage Regasification Unit \(FRSU\)? \(marineinsight.com\)](#)
11. Benefits of LNG, dostupno na: [Liquefied natural gas \(LNG\) | Description, Uses, & Benefits | Britannica](#)

## POPIS SLIKA

Slika 1. LNG tanker.....	5
Slika 2. LPG tanker.....	5
Slika 3. Presjek prizmatskog spremnika tipa A.....	7
Slika 4. Presjek prizmatskog spremnika tipa B.....	7
Slika 5. Presjek spremnika tipa C.....	8
Slika 6. Presjek spremnika GT No. 96.....	9
Slika 7. Presjek spremnika Technigaz Mark III.....	9
Slika 8. Sustav cjevovoda na brodu za prijevoz ukapljenog plina.....	10
Slika 9. HD kompresor.....	12
Slika 10. Korisničko sučelje ESD sustava.....	14
Slika 11. Ras Laffen LNG terminal u Katru.....	16
Slika 12. LNG terminal u Omišlju na otoku Krk u pripremi iskrcajnih operacija sa tankerom. .....	17