

Sustav pripreme i dobave goriva na brodu za kružna putovanja

Šarčević, Luka

Master's thesis / Diplomski rad

2022

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:822495>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-16**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Engineering](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI
TEHNIČKI FAKULTET

Diplomski sveučilišni studij strojarstva

Diplomski rad

**SUSTAV PRIPREME I DOBAVE GORIVA NA BRODU ZA
KRUŽNA PUTOVANJA**

Rijeka, srpanj 2022.

Luka Šarčević

0069075909

SVEUČILIŠTE U RIJECI
TEHNIČKI FAKULTET

Diplomski sveučilišni studij strojarstva

Diplomski rad

**SUSTAV PRIPREME I DOBAVE GORIVA NA BRODU ZA
KRUŽNA PUTOVANJA**

Mentor: prof. dr. sc. Tomislav Mrakovčić

Rijeka, srpanj 2022.

Luka Šarčević

0069075909

SVEUČILIŠTE U RIJECI
TEHNIČKI FAKULTET
POVJERENSTVO ZA DIPLOMSKE ISPITE

Rijeka, 16. ožujka 2022.

Zavod: **Zavod za termodinamiku i energetiku**
Predmet: **Motori**
Grana: **2.11.04 brodsko strojarstvo**

ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Pristupnik: **Luka Šarčević (0069075909)**
Studij: **Diplomski sveučilišni studij strojarstva**
Modul: **Procesno i energetska strojarstvo**

Zadatak: **Sustav pripreme i dobave goriva na brodu za kružna putovanja / Cruise ship fuel oil system**

Opis zadatka:

U radu je potrebno izraditi projekt sustava pripreme i dobave goriva na brodu za kružna putovanja. Pogonsko postrojenje broda sastoji se od pet dizelskih srednjehodnih motora MAN 12V 51/60DF nazivne snage 12600 kW svaki. Rad treba sadržavati tehnički opis te proračun i shemu sustava pripreme i dobave goriva.


Rad mora biti napisan prema Uputama za pisanje diplomskih / završnih radova koje su objavljene na mrežnim stranicama studija.


Zadatak uručen pristupniku: 21. ožujka 2022.

Mentor:


Prof. dr. sc. Tomislav Mrakovčić

Predsjednik povjerenstva za
diplomski ispit:


Prof. dr. sc. Kristian Lenić

IZJAVA O SAMOSTALNOJ IZRADBI RADA

Ovom izjavom potvrđujem da sam diplomski rad izradio samostalno koristeći se znanjima stečenim tokom studija uz pomoć mentora i služeći se navedenom literaturom.

Luka Šarčević

ZAHVALA

Zahvaljujem se svom mentoru prof. dr. sc. Tomislavu Mrakovčiću na strpljenju i vodstvu tokom izrade završnog rada.

Veliko hvala cijelom TMC odjelu tvrtke TSI d.o.o na ustupljenom vremenu i literaturi.

Posebno se zahvaljujem svojoj obitelji i djevojci koji su mi bili velika podrška tijekom studiranja.

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. BRODSKA GORIVA	2
2.1. Fizikalna svojstva goriva	3
2.2. Brodska teška goriva	6
2.3. Brodska dizelska goriva.....	6
2.4. Plinovita brodska goriva.....	6
2.5. Primjena LNG-a na brodovima	8
3. KONTROLA EMISIJE ISPUŠNIH PLINOVA	9
3.1. Standardi za emisiju NO _x	10
3.2. Sadržaj sumpora u gorivu.....	12
4. SUSTAV PRIPREME I DOBAVE GORIVA.....	13
4.1. Transfer goriva iz skladišnih tankova.....	13
4.2. Pročišćavanje goriva.....	14
4.3. Dobava goriva do motora	16
4.4. Sustav za kontrolu viskoznosti	17
5. BRODOVI ZA KRSTARENJE.....	19
5.1. Tehnički opis broda	20
6. ULOGA DIZELSKOG GORIVA U DVOGORIVNOM SUSTAVU.....	22
6.1. Pilot gorivo	23
6.2. Teško dizelsko gorivo.....	24
6.3. Lako dizelsko gorivo	25
7. SUSTAV PRIPREME I DOBAVE LAKOG DIZELSKOG GORIVA	26
7.1. Položaj dnevnih tankova.....	30
8. PRORAČUN GUBITAKA TOPLINE DNEVNIH TANKOVA	34
8.1. Termodinamičke karakteristike dizelskog goriva.....	34
8.2. Prikaz toplinskih gubitaka iz dnevnih tankova dizelskog goriva	37
8.3. Površine svih stranica tankova	38
9. TOPLINSKI GUBICI DNEVNOG TANKA T46.....	41
9.1. Toplinski gubici horizontalnog poklopca dnevnog tanka T46	41
9.2. Toplinski gubici horizontalnog dna dnevnog tanka T46.....	45

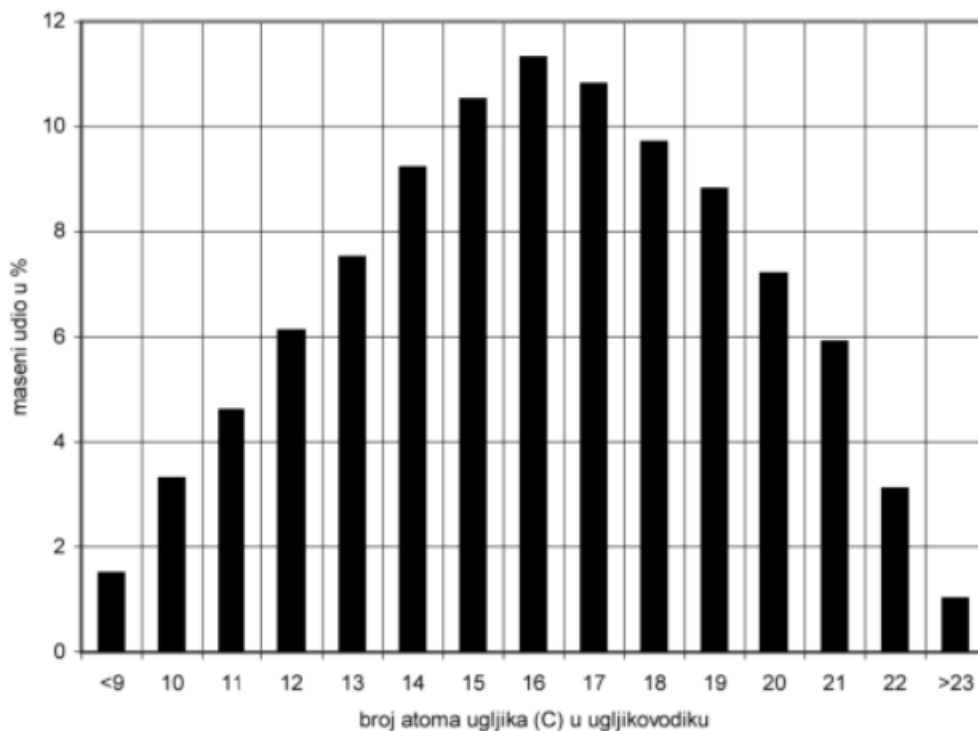
9.3.	Toplinski gubici vertikalne stijenke dnevnog tanka T46 s desne (starboard - SB) strane gledano od krme prema pramcu	50
9.4.	Toplinski gubici vertikalne stijenke dnevnog tanka T46 s lijeve (portside - PS) strane gledano od krme prema pramcu	55
9.5.	Toplinski gubici vertikalne stijenke dnevnog tanka T46 s prednje strane (pramca)	60
9.6.	Toplinski gubici vertikalne stijenke dnevnog tanka T46 sa stražnje strane (krme)	64
10.	TOPLINSKI GUBICI DNEVNOG TANKA T57	70
10.1.	Toplinski gubici horizontalnog poklopca dnevnog tanka T57	70
10.2.	Toplinski gubici horizontalnog dna dnevnog tanka T57	74
10.3.	Toplinski gubici vertikalne stijenke dnevnog tanka T46 s desne (starboard- SB) strane gledano od krme prema pramcu	79
10.4.	Toplinski gubici vertikalne stijenke dnevnog tanka T57 s lijeve (portside - PS) strane gledano od krme prema pramcu	83
10.5.	Toplinski gubici vertikalne stijenke dnevnog tanka T57 s prednje strane (pramca)	88
10.6.	Toplinski gubici vertikalne stijenke dnevnog tanka T57 sa stražnje strane (krma).....	93
11.	PRORAČUN TOPLINSKOG TOKA IZMEĐU PARE I GORIVA U DNEVNOM TANKU 98	
12.	PRORAČUN POTREBNE DULJINE GRIJAĆIH CIJEVI.....	102
13.	ZAKLJUČAK	106
14.	LITERATURA.....	107
15.	POPIS SLIKA	108
16.	POPIS TABLICA.....	109
17.	POPIS OZNAKA	110

1. UVOD

Cilj ovog diplomskog rada je izraditi projekt sustava pripreme i dobave goriva na brodu za kružna putovanja. Pogonsko postrojenje broda sastoji se od 5 dizelskih srednjehodnih motora MAN 12V 51/60DF nazivne snage 12600 kW svaki. Priprema brodskog goriva može se podijeliti u tri faze: transfer goriva iz skladišnih tankova, pročišćavanje goriva, dobava goriva do motora. Potrebno je izabrati najbolji pristup pripreme brodskog dizelskog goriva kako bi osigurali dovoljnu količinu goriva odgovarajućih svojstava te kako bi gubici topline i transporta brodskog dizelskog goriva bili što manji. U sljedećem poglavlju opisana su brodska goriva, faze pripreme brodskih goriva i potrebna oprema. U radu je prikazan proračun gubitaka topline tankova i grijanja dizelskog goriva te će se na temelju dobivenih rezultata izraditi model cjevovoda potreban za grijanje tankova. Na kraju slijedi zaključak na temelju dobivenih rezultata i sažetak u kojemu su dane osnovne informacije o sadržaju rada.

2. BRODSKA GORIVA

U današnje vrijeme se za pogon brodskih dizelskih motora u većini slučajeva koriste tekuća brodska dizelska goriva koja su smjesa različitih ugljikovodika, te plinska goriva koja se kombiniraju s dizel gorivom (Dual Fuel DF).



Slika 2.1 Maseni udio pojedinih ugljikovodika u uobičajenom dizelskom gorivu [1]

Osnovni cilj svih goriva je pretvoriti energiju u korisni mehanički rad putem izgaranja, i pritom dobiti što veću iskoristivost. Stupanj iskoristivosti današnjih brodskih dizelskih motora je visok - $\eta = 0,55$.

Dizelska goriva koja se koriste za pogon brodskih dizelskih motora:

- Plinsko ulje ili vrlo lako gorivo (Marine Gas Oil – MGO) - koristi se za brzookretne četverotakne dizelske motore
- Lako dizelsko gorivo (Marine Diesel Oil – MDO) – koristi se za srednjookretne četverotakne dizelske motore
- Teško gorivo (Heavy Fuel Oil – HFO) – koristi se za sporookretne dvotakne i srednjookretne dizelske motore

- Srednje teško dizel gorivo (Intermediate Heavy Fuel Oil – IF) – proizvodi se u strojarnici miješanjem lakog dizel goriva (MDO) s teškim dizelskim gorivom (HFO) u određenim omjerima.
- Teško gorivo niske kakvoće (Low Grade Heavy Fuel Oil – LGFHO) – koristi se za sporookretne dvotakne i srednjookretne četverotakne motore koji su namijenjeni za proizvodnju električne energiju i za poriv.

2.1. Fizikalna svojstva goriva

Osnovna razlika u karakteristikama brodskih dizelskih goriva je u sljedećim fizikalnim svojstvima:

- VISKOZNOST – odnosi se na veličinu unutarnjeg trenja među molekulama goriva (povećavanje sile trenja među molekulama uzrokuje povećanje viskoznosti). Također je ovisna o temperaturi (što je temperatura niža viskoznost je veća i suprotno). Preniska viskoznost uzrokuje veću potrošnju goriva te neispravnost elemenata motora (prebogata smjesa i slab prodor goriva u cilindar), dok previsoka viskoznost uzrokuje slabljenje protoka goriva i loše raspršivanje u cilindru..
- OGRJEVNA VRIJEDNOST GORIVA (H_d) – predstavlja količinu topline oslobođenu iz jedinice mase goriva, sadržanu u plinovima izgaranja. Razlikujemo gornju i donju ogrjevnu vrijednost goriva. Toplinu koja se oslobađa izgaranjem i sadržana je u plinovima izgaranja nazivamo gornjom ogrjevnom vrijednosti goriva, H_g . Razlika između gornje i donje ogrjevne vrijednosti je u toplini koju je vodena para kondenzacijom predala okolini iz plinova izgaranja. Kako ta toplina nije korisna za sami toplinski proces, za sve vrste toplinskih proračuna se upotrebljava donja ogrjevna vrijednost H_d .
- UDIO SUMPORA – u brodskom gorivu, prema propisu koji je stupio na snagu 1. siječnja 2020. godine, dopušten je udio sumpora do 0,5%. Povećani udio sumpora u gorivu nije poželjan jer izgaranjem dolazi do vezanja u okside SO_2 i SO_3 . Zbog navedenih oksida dolazi do niskotemperaturne korozije koja je posljedica stvaranja sumporaste i sumporne kiseline do čega dolazi uslijed spajanja kapljica kondenzirane vodene pare s oksidima.
- GUSTOĆA – proporcionalna je viskoznosti, s povećanjem gustoće povećava se i viskoznost goriva. Za brodska dizelska goriva iznosi od 800 kg/m^3 do 880 kg/m^3 , a za brodska teška goriva od 920 kg/m^3 do 1020 kg/m^3 .

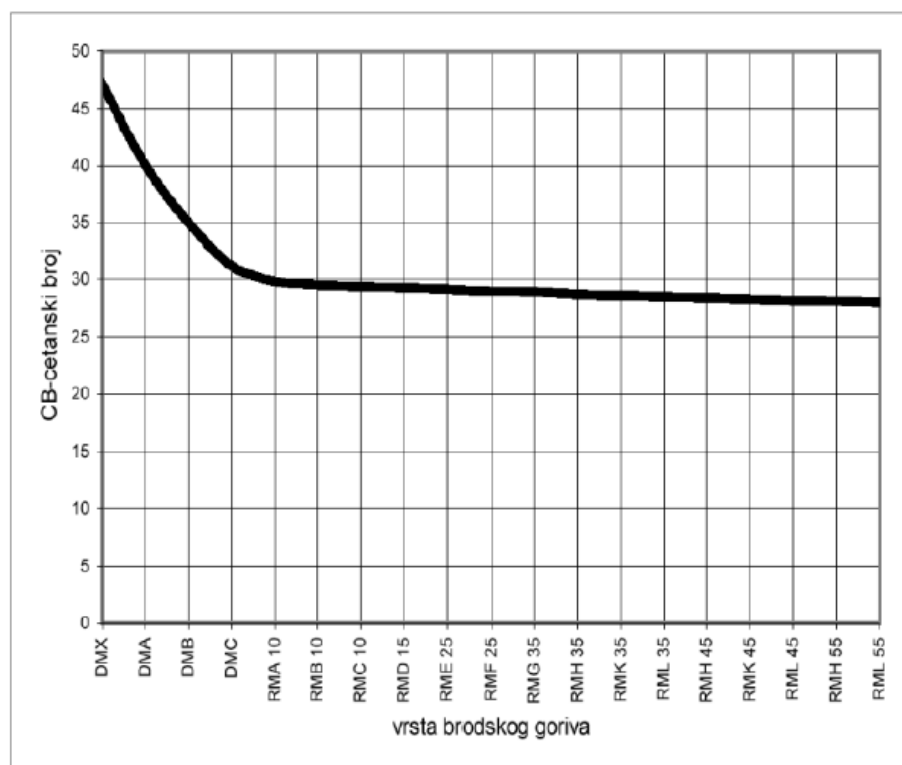
- TEMPERATURA SKRUĆIVANJA – Temperatura skrućivanja brodskih dizelskih goriva je od -6 °C do 6 °C stupnjeva, a brodskih teških goriva od 24 °C do 40 °C.
- OSTATAK UGLJIKA PRI IZGARANJU (CONRADSONOV BROJ) – izražen je u % i predstavlja koksirani ostatak goriva koji ostaje nakon što gorivo ispari. Ukoliko je CCR vrijednost previsoka može doći do problema u izgaranju, jačeg stvaranja naslaga na dijelovima motora ili do prevelikog stvaranja taloga u separatorima. CCR brodskih dizelskih goriva je od 0,14 % do 3 %, a brodskih teških goriva od 10 do 22 % masenog udjela.
- UDIO PEPELA I VANADIJA – poželjan je niski udio pepela i vanadija u gorivima budući da je pepeo uzročnik pojačanog habanja, a tijekom izgaranja goriva dolazi do vezanja vanadija u V_2O_5 odnosno vanadij pentoksid koji djeluje korozivno na površine. Do najvećih oštećenja dolazi na dosjednim površinama ispušnih ventila dizelskih motora. Maseni udio pepela koji je dopušten u brodskom dizelskom gorivu je od 0,01% do 0,05%, a u brodskom teškom gorivu dopušteni maseni udio pepela je od 0,1% do 0,2%. Udio vanadija koji je prihvatljiv u brodskom teškom gorivu je od 150 do 600 ppm, a u brodskom dizelskom gorivu do 100 ppm.

Na slici 2.2 prikazan je primjer oštećenja do kojeg može doći zbog visokotemperaturne korozije.



Slika 2.2 Primjer oštećenja dosjednih površina ispušnih ventila dizelskih motora zbog visokotemperaturne korozije [1]

- UDIO VODE – prisustvo vode dovodi do snižene ogrjevne vrijednosti goriva i otežanog filtriranja. Volumni udio vode koji se prihvaća kod brodskog teškog goriva je od 0,5 % do 1 %, a brodskog dizelskog goriva najviše do 0,2 %.
- CETANSKI BROJ – broj koji označava kvalitetu izgaranja dizelskih goriva, odnosno cetanski broj je veći što je gorivo samozapaljivije. Minimalna vrijednost za cetanski broj kod srednjekretnih motora je 40, a spotokretnih 30. Zajamčena vrijednost cetanskog broja u brodskom teškom gorivu je od 28 do 30, a kod brodskih dizelskih goriva ta vrijednost iznosi od 32 do 48.



Slika 2.3 Cetanski broj za različite vrste goriva [1]

- TAN (Total Acid Number) – količina svih kiselina u jednom gramu goriva koja se izražava u miligramima.
- TBN (Total Base Number) – količina svih lužina prisutnih u jednom gramu goriva i izražava se u miligramima.

2.2. Brodska teška goriva

Najčešće se za pogon brodskih dizelskih motora koriste teška goriva budući da su ona ekonomski isplativija u odnosu na laka dizelska goriva.

Brodska teška goriva su:

- Miješana brodska goriva (Intermediate Fuel Oil) – za srednjookretne brodske dizelske motore.
- Ostatna brodska goriva (Residual Marine Fuel Oil)
- Bunker teška goriva (Bunker Fuel Oil) – imaju maksimalnu viskoznost od 700 cSt pri 50°C i maksimalnu gustoću do 1010 kg/m³.

Sva brodska teška goriva potrebno je prije upotrebe separirati i zagrijati na određenu temperaturu kako bi bila upotrebljiva, tj. kako bi se viskoznost smanjila i kako bi se mogla koristiti za pogon brodskih motora.

2.3. Brodska dizelska goriva

Brodska dizelska goriva koriste se za pogon brzohodnih četverotaknih dizelskih motora, a dijele se na:

- Plinska ulja (Marine Gas Oil – MGO) – kategorija goriva DMA, MB, DMC kojima je viskoznost pri 40°C:
 - DMA – maksimalno 6 cSt s udjelom sumpora od 1,5%
 - DMB – maksimalno 11 cSt s udjelom sumpora od 2%
 - DMC – maksimalno 14 cSt s udjelom sumpora od 2%

2.4. Plinovita brodska goriva

Danas se kao najčišće fosilno gorivo smatra zemni odnosno prirodni plin. U njemu u najvećem postotku nalazimo metan (od 95 do 98 %), ali možemo naći i spojeve poput propana, etana te ostalih teških ugljikovodika. U manjim količinama mogu se pronaći dušik, kisik, ugljični dioksid te spojevi sumpora i vode.

Radi smanjenja emisije štetnih ispušnih plinova, kao zamjena za klasična dizelska goriva mogu se koristiti plinovita goriva za pogon brodskih motora. Oblici u kojima se može naći prirodni plin su ukapljeni LNG i komprimirani CNG.

Tablica 2.1 Sastav prirodnog plina [3]

KOMPONENTA	OZNAKA	UDIO (%)
Metan	CH ₄	70-90
Etan	C ₂ H ₆	0-20
Propan	C ₃ H ₈	0-20
Butan	C ₄ H ₁₀	0-20
Ugljični dioksid	CO ₂	0-8
Kisik	O ₂	0-0,2
Dušik	N ₂	0-5
Vodikov sulfid	H ₂ S	0-5
Plemeniti plinovi	A, He, Ne, Xe	U tragovima

LNG je bistra tekućina koja je bez boje, okusa i mirisa. Ovaj ukapljeni prirodni plin (UPP) ukapljuje se jer se na ovaj način smanjuje volumen plinovitog stanja (1/600 volumena plinovitog agregatnog stanja). Na ovaj način može se skladištiti i transportirati veća količina prirodnog plina. Pri atmosferskom tlaku, točka vrelišta prirodnog plina je -161,5. To je temperatura koju plin mora imati kako bi ga zadržali u tekućem agregatnom stanju. [4]

2.5. Primjena LNG-a na brodovima

U današnje vrijeme sve se više počinju koristiti dvogorivni sustavi (DF - dual fuel). Električna se energija u dvogorivnim sustavima dobiva pomoću agregata s unutarnjim izgaranjem koji koriste kombinaciju ukapljenog prirodnog plina i dizelskog goriva. Radi novih međunarodnih graničnih vrijednosti emisija štetnih ispušnih plinova, od iznimne je važnosti korištenje dvogorivnih motora. Naime, ispušni dimni plinovi sadrže štetne tvari čija se emisija značajno smanjuje korištenjem dvogorivnih motora uz visok stupanj iskoristivosti motora.

3. KONTROLA EMISIJE ISPUŠNIH PLINOVA

U današnje vrijeme je sve važnije zaštititi atmosferu od plinova koje joj nanose štetu, poput ugljikovog dioksida, sumpornih oksida te dušikovih oksida. Obzirom na pomorski promet današnjice, u kojem brodovi većinom koriste dizelsko gorivo za pogon, značajno je onečišćenje zraka emisijom ispušnih plinova. Globalno zagrijavanje potpomognuto je u najvećoj mjeri ugljikovim dioksidom, dok su onečišćenja kopnenih i vodenih ekosutava većinom uzrokovani sumpornim i dušikovim oksidima. Međunarodna pomorska organizacija (IMO) je u područjima kontrole emisija ispušnih plinova (Emission Control Area – ECA) postavila gornju granicu za količinu sumpora u brodskom gorivu na 0,1%.

Zbog toga je jako važno da se prilikom proizvodnje brodskih dizelskih motora pazi na ograničenje emisije štetnih plinova na sljedeće načine:

- Ugrađivanje uređaja za odstranjivanje SO₂ iz ispušnih plinova motora
- Korištenje kvalitetnijih dizelskih goriva s niskim udjelom sumpora
- Korištenje dvojnih goriva (dual fuel) s niskim udjelom sumpora

Njome je regulirana emisija ispušnih plinova za koju su odgovorni brodski motori (prilogom VI). Od 1. srpnja 2010. godine na snazi su novi zahtjevi za kakvoću goriva u kojima je u velikom dijelu došlo do promjene vezane na sadržaje sumpora u dizelskom gorivu, te emisije dušikovih i sumpornih oksida u ispušnim plinovima brodskih motora. [1]

Aneksom VI definirane su dvije skupinje zahtjeva o emisijama i kvaliteti brodskog goriva:

- Globalni zahtjevi
- Stroži zahtjevi koji se primjenjuju na brodove koji plovo u područjima kontroliranih emisija – Emission Control Areas (ECA)

Područje kontroliranih emisija može biti dodijeljeno za nadzor emisija SO_x i PM (krutih čestica), ili za nadzor emisija NO_x, ili pak sve tri vrste emisija iz brodova.

3.1. Standardi za emisiju NO_x

Dopuštene vrijednosti emisija NO_x postavljene su za dizelske motore u ovisnosti o najvećoj brzini vrtnje pogonskog motora.

Tier I i Tier II su globalni standardi, dok je Tier III standard primjenjiv samo u NO_x područjima kontrolirane emisije (NO_x Emission Control Areas – NECA).

IMO NO_x Tier III standard propisuje 80% niže emisije od NO_x Tier I standard kako je prikazano u tablici 3.1.

Za svaki brodski dizelski motor snage veće od 130 kW primjenjuju se zahtjevi za kontrolu emisije dušikovih oksida (NO_x).

Tablica 3.1 IMO Tier 1, IMO Tier 2, IMO Tier 3 emisijski standardi [5]

Tier	Datum izgradnje broda	Emisija (g/kWh)		
		N = broj okretaja motora (o/min)		
		n < 130	n = 130 - 1999	n ≥ 2000
I	1. siječnja 2000.	17,0	$45 \cdot n^{(-0.2)}$	9,8
II	1. siječnja 2011.	14,4	$44 \cdot n^{(-0.23)}$	7,7
III	1. siječnja 2016.	3,4	$9 \cdot n^{(-0.2)}$	2,0

U tablici 3.1 prikazano je da je globalnim standardom Tier I zabranjen rad brodskih dizelskih motora ugrađenih na brodove koji su građeni od 1.1.2000. do 31.12.2010. godine. Iznimke su motori čije su emisije dušikovih oksida koje ovise o maksimalnoj radnoj brzini motora (o/min) unutar dopuštenih granica:

- 17,0 g/kWh za $n < 130$ o/min
- $45 \cdot n^{(-0.2)}$ g/kWh za $130 \leq n \leq 2000$ o/min
- 9,8 g/kWh za $n > 2000$ o/min

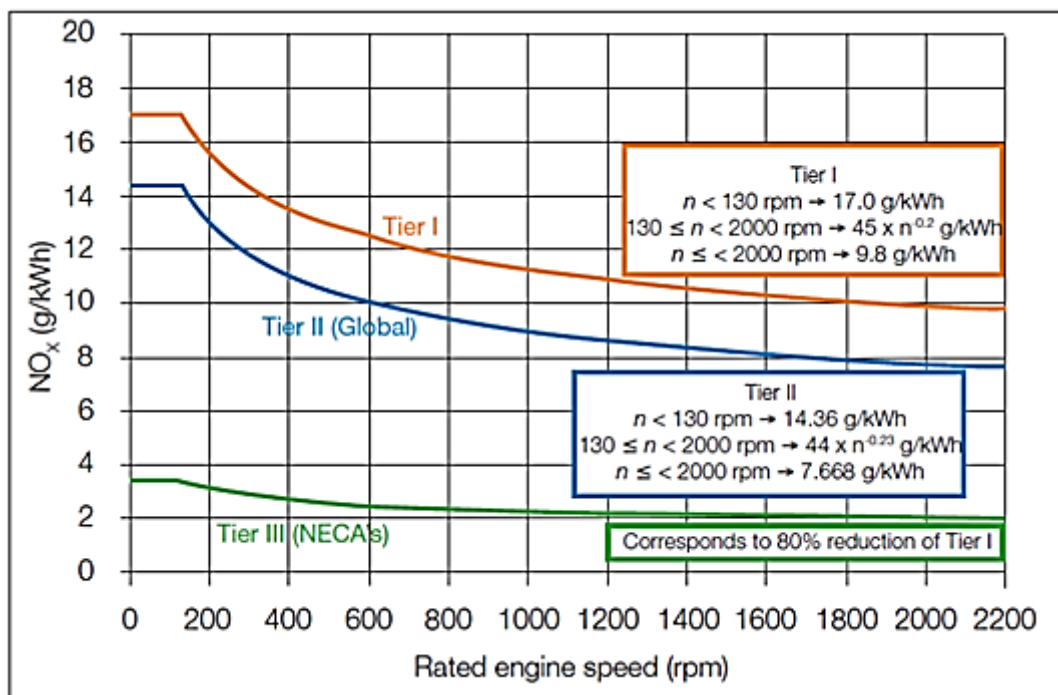
Globalnim standardom Tier II zabranjen je rad brodskih dizelskih motora koji su ugrađeni na brodove građene od 1.1.2011. do 31.12.2015. godine. I u ovom slučaju iznimke su motori čija je emisija dušikovih oksida unutar sljedećih granica:

- 14,4 g/kWh za $n < 130$ o/min
- $44 \cdot n^{(-0.23)}$ g/kWh za $130 \leq n \leq 2000$ o/min
- 7,7 g/kWh za $n > 2000$ o/min

Globalnim standardom Tier III zabranjen je rad brodskih dizelskih motora koji su ugrađeni na brodove građene od 1.1.2016. godine do danas, osim ako su emisije dušikovih oksida iz motora unutar sljedećih granica:

- 3,4 g/kWh za $n < 130$ o/min
- $9 \cdot n^{(-0.2)}$ g/kWh za $130 \leq n \leq 2000$ o/min
- 2,0 g/kWh za $n > 2000$ o/min

Smanjenje emisije dušikovih oksida NO_x ovisno o broju okretaja motora prikazano je na slici 3.1.



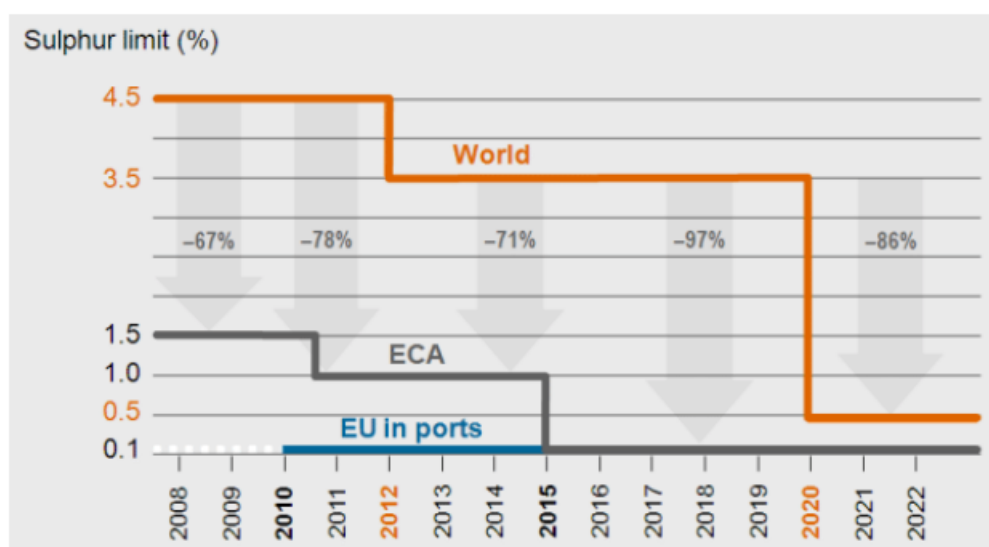
Slika 3.1 IMO NO_x standardi za emisije [5]

3.2. Sadržaj sumpora u gorivu

Aneks VI MARPOL konvencije propisuje i dopušteni sadržaj sumpora u gorivu kao mjeru za kontrolu emisija sumporovih oksida (SO_x) i indirektno, emisije krutih čestica (PM). Granične količine sumpora u gorivu i godina provedbe navedeni su u tablici 3.2 i prikazani na slici 3.2.

Tablica 3.2 Granične vrijednosti sumpora u brodskom dizelskom gorivu [5]

Godina	Udio sumpora u gorivu (% m/m)	
	SO _x ECA	Globalni
2000	1,5%	4,5%
2010	1,0%	3,5%
2012		
2015	0,1%	0,5%
2020		



Slika 3.2 Granične vrijednosti sumpora u gorivu prema regulativi 14 Priloga VI MARPOL konvencije [5]

4. SUSTAV PRIPREME I DOBAVE GORIVA

Osnovna namjena broskog sustava goriva pripremanje i osiguravanje dovoljne količine goriva na način da se omogući njegovo uspješno i potpuno izgaranje u cilindrima dizelskih motora.

Brodski sustav pripreme i dobave sastoji se od:

- Sustava ukrcaja i transfera goriva
- Sustava skladištenja goriva
- Sustava pročišćavanja goriva
- Sustava dobave i ubrizgavanja goriva

Sustavi goriva moraju osiguravati dostatnu količinu goriva za sve strojne uređaje poput glavnog i pomoćnog motora, EDG-a, kotlova, itd. u svim režimima rada broskog pogona.

Osnovna tri režima rada broskog pogona su:

- Plovidba
- Manevar
- Ukrcaj/iskrcaj tereta

Sustav dobave tekućeg goriva može se podijeliti u tri faze:

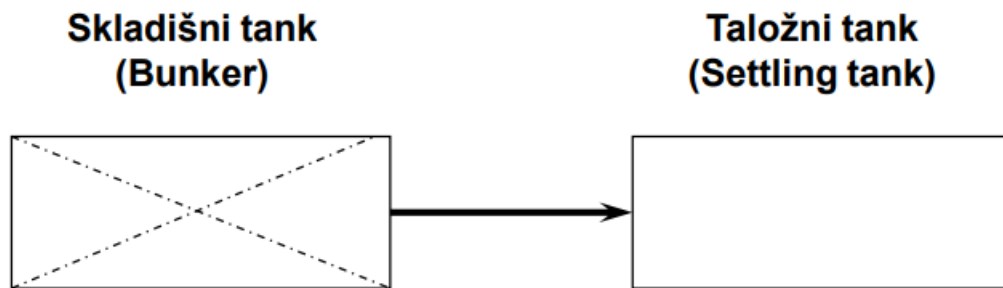
- 1. faza – transfer goriva iz skladišnih tankova
- 2. faza – pročišćavanje goriva
- 3. faza – dobava goriva do glavnog motora

4.1. Transfer goriva iz skladišnih tankova

Gorivo za pogon glavnog pogonskog motora čuva se u skladišnim tankovima. Prije prepumpavanja goriva iz skladišnog u taložni tank, potrebno ga je zagrijati.

Taložni tankovi koriste se za gravitacijsku separaciju goriva. U uporabi su občno dva tanka, koji se koriste naizmjenično – svaki dan jedan od tankova.

Tankovi su opremljeni cijevnim spiralama za zagrijavanje goriva kao što možemo vidjeti na slici 4.2 te imaju koso dno radni lakšeg odstranjivanja nakupljenih nečistoća iz teškog goriva. [1]



Slika 4.1 1. faza: Transfer goriva iz skladišnih tankova [1]



Slika 4.2 Unutrašnjost skladišnih tankova teškog goriva [1]

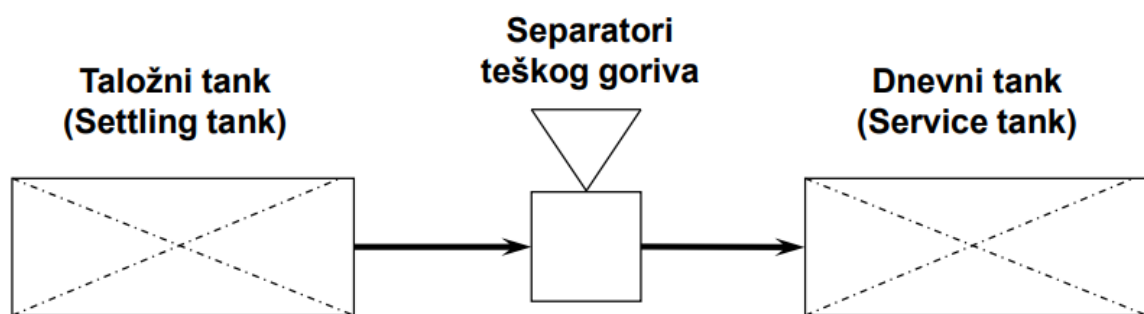
4.2. Pročišćavanje goriva

Uporabom dva taložna tanka znatno se unaprijeđuje pročišćavanje goriva. U ovim tankovima gorivo miruje 24 sata te se tankovi naizmjenično koriste.

Taložni tankovi također djeluju kao međuspremnik, osiguravaju odgovarajuću temperature goriva u rasponu od 50°C do 70°C i uklanjaju većinu onečišćenja vodom koja se mogu pojaviti.

Svi separatori (za gorivo i ulje za podmazivanje) smješteni su u prostor nazvan “soba separatora”. Prostor je opremljen odgovarajućim priključcima i u njemu su osigurani potrebni sigurnosni uvjeti za manipulaciju gorivom i uljem za podmazivanje.

Nakon što je dizelsko gorivo pročišćeno u separatorima, dovodi se u dnevni tank gdje je spremno za otpremu prema glavnom motoru. Temperatura goriva u dnevnom tanku je oko 60°C. [1]



Slika 4.3 2.faza: Pročišćavanje goriva [1]



Slika 4.4 Modul separatora goriva u prostoriji separatora

4.3. Dobava goriva do motora

Niskotlačne dobavne pumpe preuzimaju teško gorivo iz dnevnog tanka i tlače ga u zatvoreni visokotlačni cirkulacijski krug.

S namjerom da se spriječi isparavanje i najmanje količine vode (koja nakon pročišćavanja može zaostati u gorivu), najniži tlak u sustavu mora biti oko 1 bar iznad tlaka pri kojem bi voda mogla prijeći u paru

“Tank za miješanje” služi za miješanje viška goriva zagrijanog na oko 145°C koje se vraća iz motora i hladnijeg goriva iz dnevnog tanka.

Cirkulacijske (visokotlačne ili booster) pumpe dobavljaju gorivo do pumpi za ubrizgavanje na samome motoru preko grijača, viskozimetra i filtra. [1]

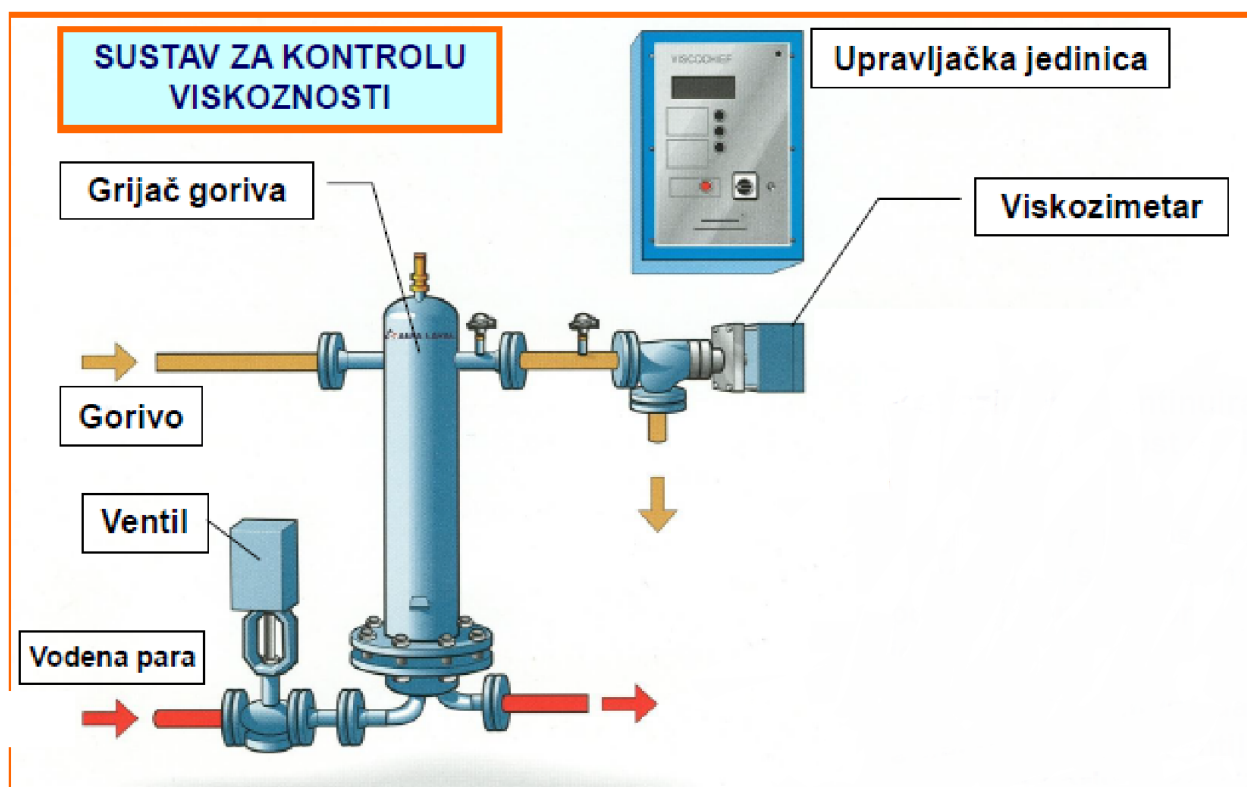
Dobavne i cirkulacijske pumpe goriva su zupčaste ili vijčane izvedbe.



Slika 4.5 Modul dobave goriva glavnog pogonskog motora u prostoriji separatora

4.4. Sustav za kontrolu viskoznosti

Viskoznost goriva vrlo je važna za pravilan rad glavnog i pomoćnih motora. Viskozimetar kontinuirano očitava viskoznost goriva koje se dobavlja motoru. Izmjerene vrijednosti se uspoređuju s podacima pohranjenima u upravljačkoj jedinici. Povećavanje ili snižavanje temperature regulira upravljačka jedinica koja daje signal grijaču, odnosno ventilu, te na taj način održava potrebne viskoznosti goriva. Sustav za kontrolu viskoznosti prikazan je na slici 4.6.



Slika 4.6 Sustav za kontrolu viskoznosti [1]



Slika 4.7 Komponente sustava za kontrolu viskoznosti [1]

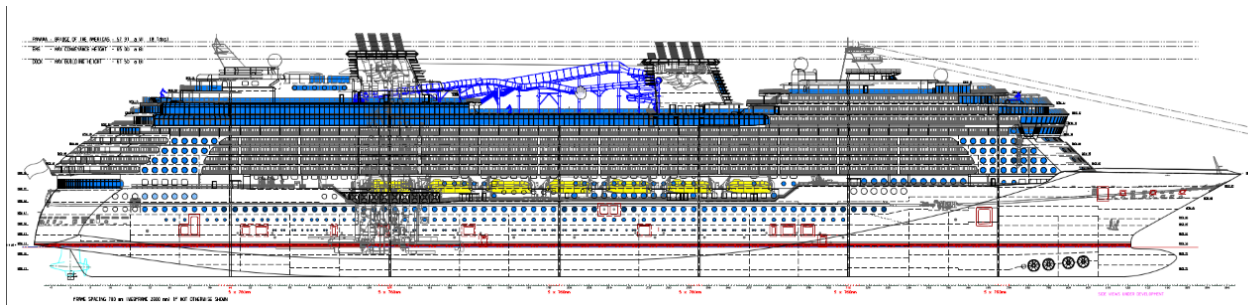
5. BRODOVI ZA KRSTARENJE

Brod za krstarenje (kruzer) putnički je brod namijenjen kružnim turističkim putovanjima, najčešće tropskim ili zatvorenim morima ili uz obalne krajeve kulturno-povijesno ili prirodno atraktivnih zemalja [7]. Ono što karakterizira brodove za krstarenje je vrlo veliko nadgrađe koje može biti pravokutnih oblika i često je šire od širine broda na vodenoj liniji. Osim toga uglavnom imaju veliki broj paluba, širok i krupan trup, zaobljen pramac, pravokutnu krmu s visokim nadgrađem. Brzina je uglavnom oko 20-22 čvora, a plovna sposobnost je nešto slabija u odnosu na transatlantike. Putnici su uvijek u istoj klasi te im se nudi veliki izbor različitih razonoda i atrakcija na brodu. [6]

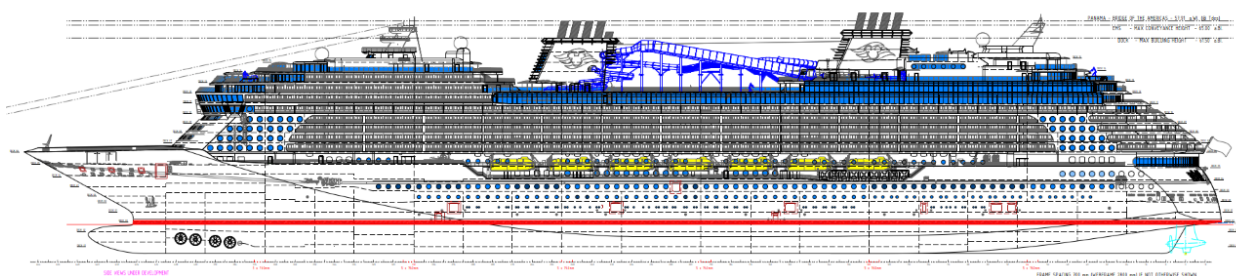
Brod za koji će se projektirati sustav pripreme i dobave goriva je kruzer "Disney Wish". On je peti brod za krstarenje u vlasništvu "Disney Cruise Line-a", podružnice "The Walt Disney Company", također je najveći brod u floti i prvi u klasi "Triton". Ostala četiri broda u floti su "Disney Magic", "Disney Wonder", "Disney Dream" i "Disney Fantasy". Izvršitelj gradnje je brodogradilište Meyer Werft iz Papenburga. Virtualni prikaz broda prikazan je na slici 5.1.



Slika 5.1 Virtualni prikaz kruzera "Disney Wish" [8]



Slika 5.2 Desni pogled na palube broda "Disney Wish" [7]



Slika 5.3 Lijevi pogled na palube broda "Disney Wish" [7]

5.1. Tehnički opis broda

Osnovne karakteristike odabranog broda prikazane su u tablici 5.1.

Tablica 5.1 Osnovne karakteristike odabranog broda [7]

GLAVNI PODACI PLOVILA	
Dužina	341 m
Širina	40 m
Bruto tonaža	144000 GT
Najveća brzina	20 čv
Broj putnika	Približno 4000
Broj posade	Približno 1555

Kao što je već rečeno, pogonsko postrojenje broda sastoji se od 5 dizelskih srednjehodnih motora MAN 12V 51/60DF koje možemo vidjeti na slici 5.2, a njegove osnovne karakteristike prikazane su u tablici 5.2.

Tablica 5.2 Glavni podaci motora MAN 12V51/60DF [9]

GLAVNI PODACI MOTORA	
Dimenzije	10254 x 4713 x 5517 m
Maksimalna brzina vrtnje	500 o/min
Snaga	12600 kW
Promjer cilindra	510 mm
Hod klipa	600 mm
Potrošnja goriva	180.2 g/kWh
Broj cilindara	12
Težina	187 t



Slika 5.4 MAN 12V 51/60DF [9]

MAN 12V 51/60DF je motor na dvojno gorivo koji pretvara tekuće gorivo (dizel) ili prirodni plin u električnu energiju s velikom efikasnošću i malim emisijama. U bilo kojem trenutku može prijeći s plinskog režima na dizelski režim rada i obrnuto unutar nekoliko sekundi.

6. ULOGA DIZELSKOG GORIVA U DVOGORIVNOM SUSTAVU

Kao što je već rečeno, cilj ovog rada je izraditi projekt pripreme i dobave dizelskog goriva, te ćemo se usredotočiti na ulogu dizelskog goriva u dvogorivnom sustavu.

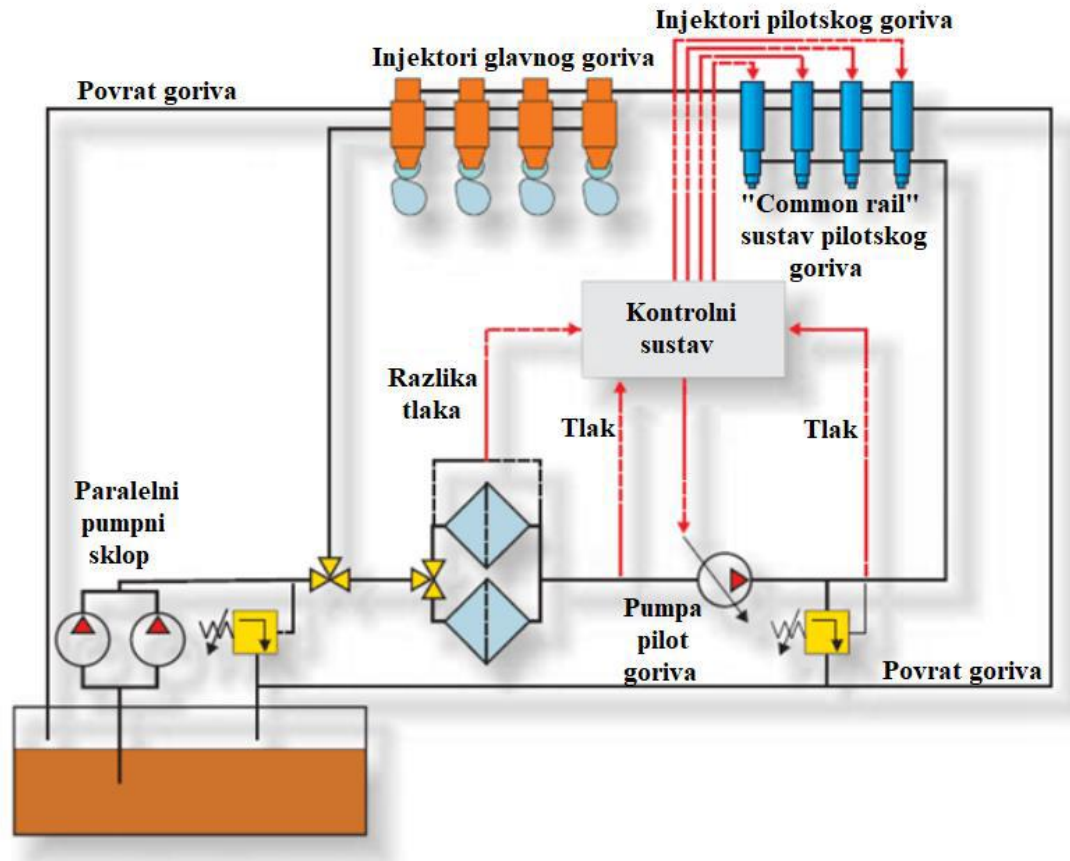
Ako se koristi plinski režim rada motora, dizelsko će gorivo imat ulogu pilot goriva, dok sustavom mora cirkulirati glavno dizelsko gorivo (MDO, MGO, HFO) da bi se moglo koristiti kao glavno gorivo u slučaju kvara na plinskom sustavu. Sustavi za glavno i pilot gorivo su odvojeni iako se koristi ista vrsta goriva. Jedini zajednički element je pozicioniran u glavi cilindra, a to je rasprskać goriva s dvostrukom mlaznicom. [10]



Slika 6.1 Rasprskać goriva s dvostrukom mlaznicom [11]

Motori s dvojnim gorivom djeluju kao uobičajeni dizelski motori koji koriste uobičajene visokotlačne pumpe za ubrizgavanje goriva kada rade u dizelskom režimu. Bregasto vratilo pokreće visokotlačnu pumpu, a rasprskaći za gorivo se aktiviraju tlakom goriva koje podiže “iglu”, odnosno igličasti ventil rasprkača. Veća mlaznica se koristi za ubrizgavanje dizelskog goriva kada motor radi u dizelskom režimu rada, dok se manja koristi za ubrizgavanje pilot goriva kada se motor nalazi u plinskom režimu rada. Elektroničkim putem upravlja se ubrizgavanje pilot goriva, dok se hidrauličkim i mehaničkim putem pomoću visokotlačne pumpe za gorivo upravlja ubrizgavanjem glavnog goriva. Bez obzira na režim rada pilot gorivo se

uvijek uštrcava u cilindar što je važno napomenuti kako bi se spriječilo začepljenje mlaznice naslagama koksiranih ugljikovodika. [10] Pojednostavljena shema sustava ubrizgavanja dizelskog goriva prikazana je na slici 6.2.



Slika 6.2 Pojednostavljena shema sustava ubrizgavanja dizelskog goriva [2]

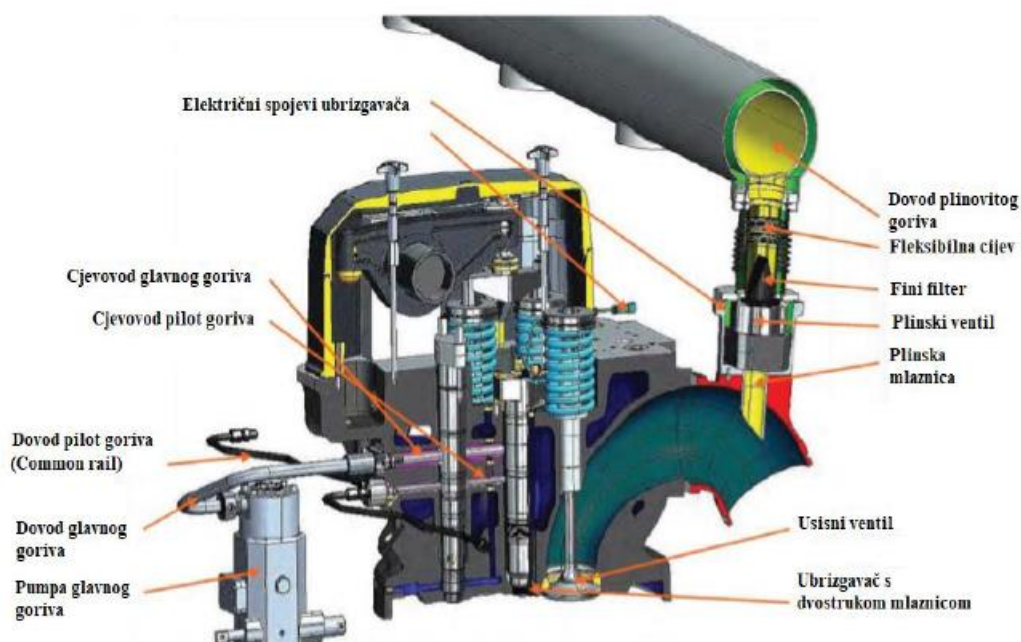
6.1. Pilot gorivo

Tijekom rada u plinskom režimu, za paljenje smjese zraka i plina u cilindru koristi se pilot gorivo. Pilotni sustav ubrizgavanja goriva sadrži filter pilot goriva, "Common rail" visokotlačnu pumpu, cjevovod i rasprskач goriva s dvostrukom mlaznicom.

Ulazak nečistoća u sustav ubrizgavanja goriva sprječava filter pilot goriva finoće 10 μm . Na slobodnom kraju motora montira se visokotlačna radijalna pumpa za gorivo i pogoni se preko zupčanika na vratilu motora. Isporučeno gorivo mora imati kontrolirani tlak za što je odgovoran upravljački sustav koji automatski kontrolira tlak koji treba iznositi oko 100 MPa. Nakon što se

pilot gorivo isporuči pumpom u zajedničku cijev (pod tlakom) manjeg promjera, ona distribuira pilot gorivo dalje, u ventile za ubrizgavanje, i zbog tlačnih impulsa djeluje kao akumulator tlaka. Iz pilotskog sustava za gorivo, višak pilot goriva vraća se u dnevni spremnik MDO-a. Kako bi bio osiguran rad svih komponenti ovakvog sustava, pad tlaka u cjevovodima smije biti maksimalno 80 kPa. [12]

Na slici koja se nalazi ispod ovog teksta nalazi se prikaz dovoda goriva u najmodernije dvogorivne dizelske motore (plinski i dizelski režim rada).



Slika 6.3 Dovod goriva dvogorivnog dizelskog motora [12]

6.2. Teško dizelsko gorivo

Teško dizelsko gorivo (Heavy fuel oil) je potrebno prije ubrizgavanja pripremiti na odgovarajući način u slučaju da se on koristi kao glavno gorivo. Kako bi se gorivo moglo pumpati, temperatura spremnika za gorivo mora biti između 40 – 50 °C što je 5 – 10 °C iznad točke tečenja goriva. Grijači spremnika su većinom projektirani na održavanje temperature od 60 °C. Iako različiti brodovi imaju različito dizajnirane sustave goriva, bitno je da svaki sustav osigura očišćeno gorivo pri odgovarajućoj temperaturi i tlaku. Ono što je najvažnije kod korištenja teškog goriva je da je ono pravilno očišćeno od krutih čestica i vode. Osim što bi gorivo koje nije

dovoljno odvojeno od krutih čestica uzrokovalo štetu u motoru, došlo bi i do štete u sustavu dovoda teškog goriva zbog visokog sadržaja vode. Svaki sustav za pročišćavanje (separiranje) goriva mora se sastojati od minimalno jednog taložnog spremnika i dva separatora (ili više) za opskrbljivanje motora pročišćenim gorivom. Ono što je jako važno je činjenica da se teško dizelsko gorivo ne smije koristiti kao pilot gorivo kod modernih dizelskih motora na dvojno gorivo. U takvim slučajevima bi brod koji koristi teško dizelsko gorivo trebao imati sustav za lako dizelsko gorivo koje bi se koristilo kod zastoja sustava teškog dizelskog goriva, kao pilot gorivo u plinskom režimu rada. [11]

6.3. Lako dizelsko gorivo

Kada se kao dizelsko gorivo u dvogorivnom sustavu koristi lako dizelsko gorivo (Marine gas oil), unutarnji sustav ubrizgavanja glavnog goriva za motor sastoji se od sljedeće glavne opreme:

- pumpa za ubrizgavanje goriva
- visokotlačna cijev
- ubrizgavač goriva s dvostrukom mlaznicom

Pumpa za ubrizgavanje goriva je najčešće dizajnirana da podržava tlak ubrizgavanja od 150 MPa. Takve pumpe moraju biti opremljene pneumatskim cilindrima za zaustavljanje, koji su spojeni na zaštitni sustav od prekoračene brzine. Visokotlačna cijev za ubrizgavanje nalazi se između pumpe i rasprskavača. Sustavi ubrizgavanja moraju biti potpuno odvojeni od strane ispušnog sustava i prostora za podmazivanje ulja u motoru. Iscureno čisto gorivo može se odvoditi natrag u spremnik radi daljnjeg korištenja, dok se samo odvođenje odvija pri atmosferskom tlaku. Ukoliko dođe do nekontroliranog curenja i miješanja goriva s uljem, smjesa se odvodi u kaljužni tank. Cjevovod za povrat goriva mora biti opremljen ventilom za kontrolu tlaka (tlačni ventil). [12]

Lako dizelsko gorivo inače nije potrebno predgrijavati, ali su brodovlasnici posebno za “Disney Wish” zatražili grijanje dnevnih tankova. U nastavku će biti prikazan i detaljno objašnjen sustav pripreme i dobave lakog dizelskog goriva te proračun grijanja dnevnih tankova.

7. SUSTAV PRIPREME I DOBAVE LAKOG DIZELSKOG GORIVA

Na slici 7.1 prikazana su dva sustava pripreme i dobave lakog dizelskog goriva. Jedan sustav za dizel generatore označene brojevima 1, 2 i 3, a drugi sustav za dizel generatore označene brojevima 4 i 5.

Gorivo za pogon dizelskih generatora čuva se u skladišnim tankovima, te se prepumpava u taložni tank. Prije transfera iz taložnih tankova u dnevne, dizelsko gorivo prolazi kroz separatore kako bi uklonili većinu onečišćenja vodom i krutim česticama koja se mogu pojaviti.

Na poseban zahtjev brodoglasnika dnevni tankovi se griju.

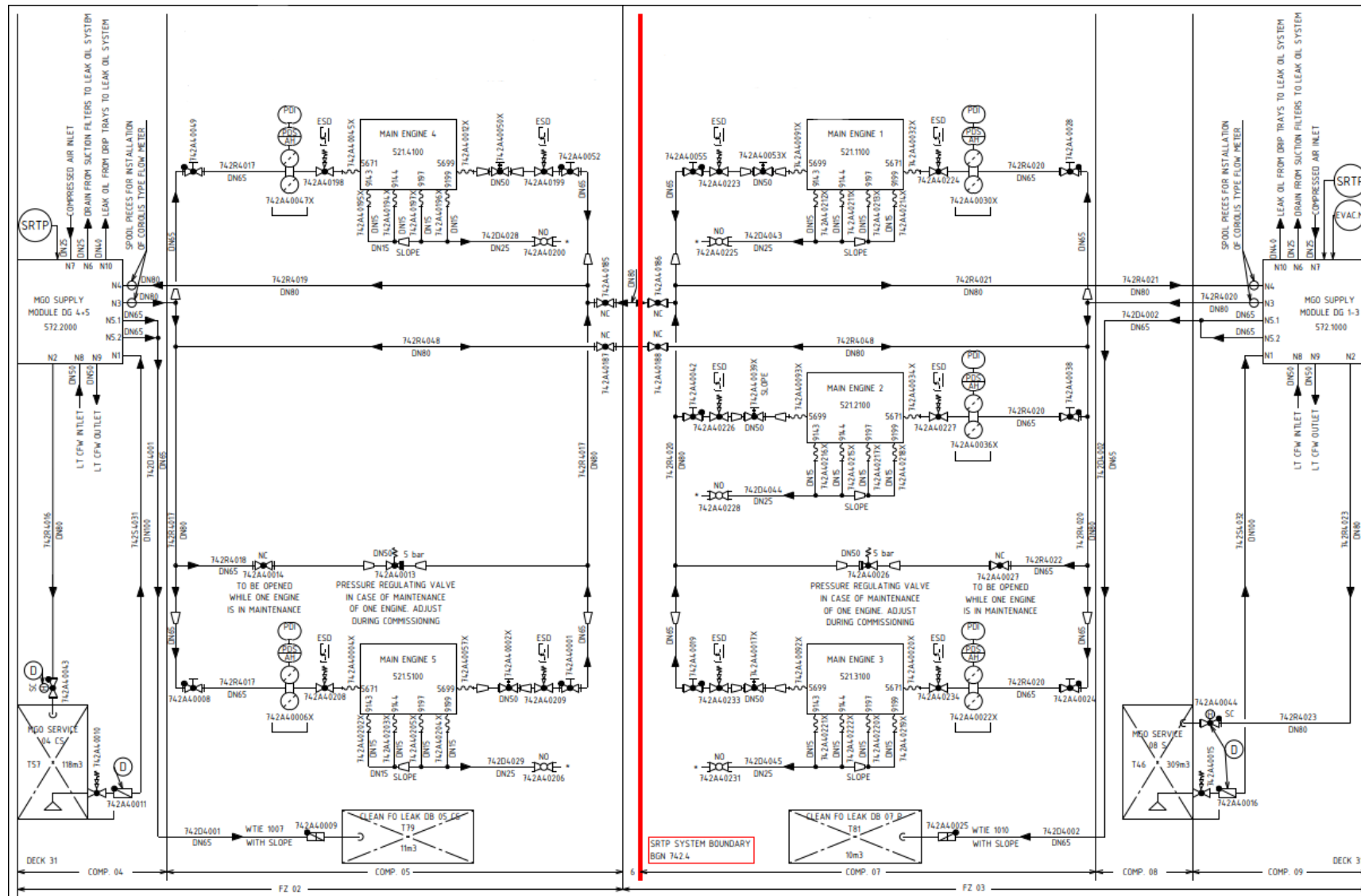
Popis opreme modula za dobavu dizelskog goriva dizel generatorima 1, 2 i 3 na strani pramca:

- MGO dobavna pumpa – 26,5 m³/h – 10 bara
- MGO dobavna pumpa - 26,5 m³/h – 10 bara
- pumpa u slučaju nužde (pogonjena zračnim motorom) – 9,7 m³/h – 10 bara
- automatski filter 1 – finoća filtriranja 0,034 mm
- automatski filter 2 – finoća filtriranja 0,034 mm
- MGO hladnjak 180 kW
- prigušivač hidrauličkih udara
- 3 duplex filtera, jedan po motoru – gustoća mreže 0,034 mm
- 12 brzozatvarajućih ventila
- coalescer filter
- tank pilot goriva – 600 litara
- pumpa pilot goriva – 0,9 m³/h – 10 bara
- filter pilot goriva

Popis opreme modula za dobavu dizelskog goriva dizel generatorima 4 i 5 na strani krme:

- MGO dobavna pumpa – 22,5 m³/h – 10 bara
- MGO dobavna pumpa – 22,5 m³/h – 10 bara
- pumpa u slučaju nužde (pogonjena zračnim motorom) – 9,7 m³/h – 10 bara
- automatski filter 1 – gustoća mreže 0,034 mm
- automatski filter 2 – gustoća mreže 0,034 mm
- MGO hladnjak 180 kW
- prigušivač pulsiranja

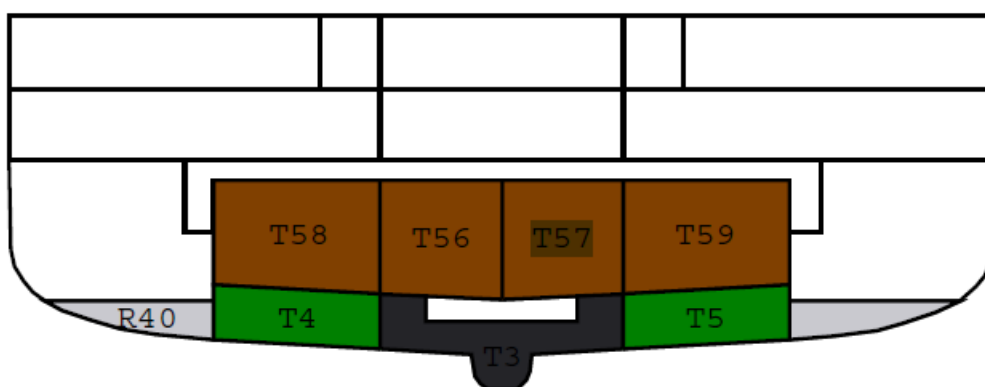
- 2 duplex filtera, jedan po motoru – gustoća mreže 0,034 mm
- 8 brzozatvarajućih ventila
- coalescer filter
- tank pilot goriva – 400 litara
- pumpa pilot goriva – 0,9 m³/h – 10 bara
- filter pilot goriva



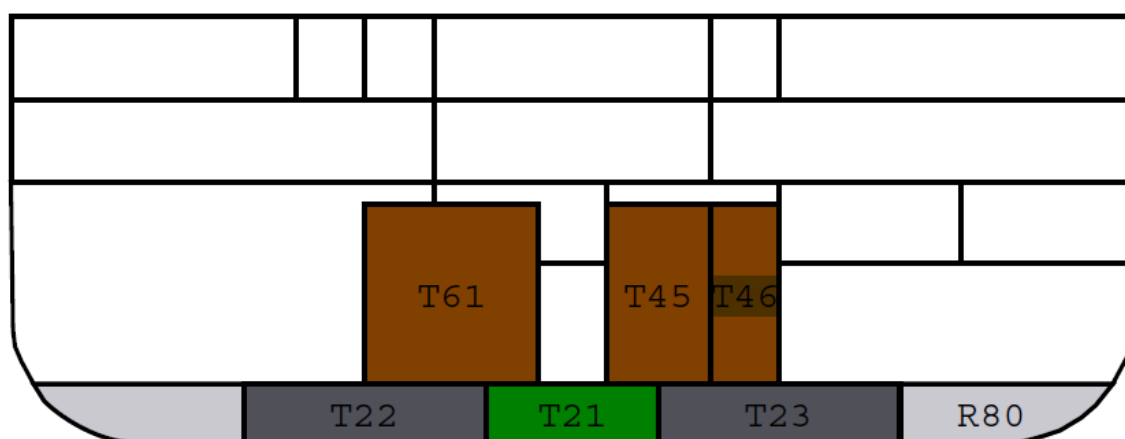
Slika 7.1 Shema pripreme i dobave lakog dizelskog goriva [7]

7.1. Položaj dnevnih tankova

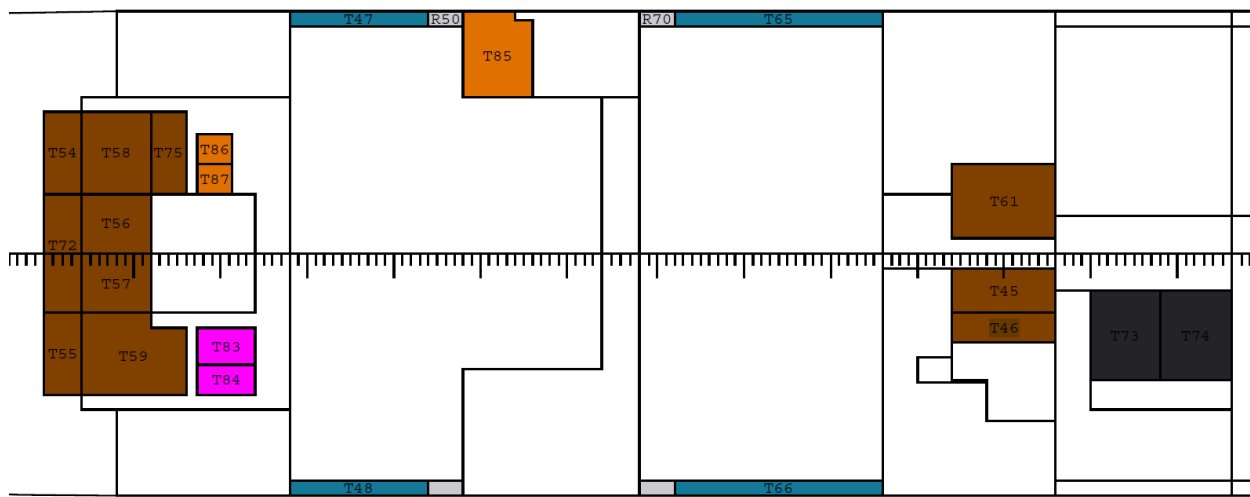
Kako je već spomenuto ranije, na poseban zahtjev brodovlasnika dnevni tankovi se griju. Kako bi proračun gubitaka topline dnevnih tankova bio što precizniji potrebno je odrediti položaj tankova na brodu, tj. što se nalazi oko tih tankova. „Disney Wish“ posjeduje dva dnevna tanka dizelskog goriva pod nazivom T57 i T46. Oba tanka se nalaze na desnoj (starboard) strani gledano od krme prema pramcu što se može vidjeti na slikama ispod.



Slika 7.2 Položaj dnevnog tanka T57 [7]



Slika 7.3 Položaj dnevnog tanka T46 [7]



Slika 7.4 Položaj dnevnih tankova T57 i T46 u tlocrtu [7]

Dnevni tank dizelskog goriva T46 okružen je sljedećim tankovima:

- taložni tank dizelskog goriva T45 s lijeve (portside) strane gledano od krme prema pramcu
- tank pročišćenih otpadnih voda T23 s donje strane dnevnog tanka dizelskog goriva

S ostalih strana dnevni tank dizelskog goriva T46 okružen je zrakom.

Dnevni tank dizelskog goriva T57 okružen je sljedećim tankovima:

- skladišni tank dizelskog goriva T56 s lijeve (portside) strane gledano od krme prema pramcu
- skladišni tank dizelskog goriva T72 sa stražnje strane
- taložni tank dizelskog goriva T45 s desne (starboard) strane gledano od krme prema pramcu
- balastni tank T3 s donje strane dnevnog tanka dizelskog goriva

S ostalih strana dnevni tank dizelskog goriva T57 okružen je zrakom.

8. PRORAČUN GUBITAKA TOPLINE DNEVNIH TANKOVA

Toplina koju je potrebno utrošiti na zagrijavanje tankova jednaka je zbroju gubitaka topline preko stijenki tanka i dovedene topline pare za povećanje temperature dizelskog goriva preko cijevi u tanku. Prilikom projektiranja sustava grijanja dnevnih tankova uzima se u obzir da sustav grijanja mora ispuniti zahtjev povećanja temperature dizelskog goriva s 15 °C na 60 °C u roku 12h.

Pri proračunu gubitaka topline u tankovima biti će uključene sljedeće pretpostavke:

- dnevni tankova dizelskog goriva su puni
- svi susjedni tankovi su puni

Gubitke topline dnevnih tankova računati će se s temperaturom dizelskog goriva od 60 °C jer su tada najveći gubici topline, tj. to je najnepovoljniji slučaj.

Potrebne temperature za proračun gubitaka topline dnevnih tankova:

- temperatura zraka u strojarnici: 15 °C
- temperatura dizelskog goriva u dnevnim tankovima: 60 °C
- temperature vode u balastnim tankovima i tankovima otpadne vode: 15 °C
- temperature dizelskog goriva u skladišnim i taložnim tankovima: 15 °C

8.1. Termodinamičke karakteristike dizelskog goriva

Kako bi bilo moguće odrediti toplinske gubitke i topline za grijanje dizelskog goriva potrebno je poznavati termodinamičke karakteristike dizelskog goriva. U sljedećem poglavlju biti će prikazane gustoća, viskoznost, specifični toplinski kapacitet i toplinska vodljivost u ovisnosti o temperaturi.

Gustoća dizelskog goriva:

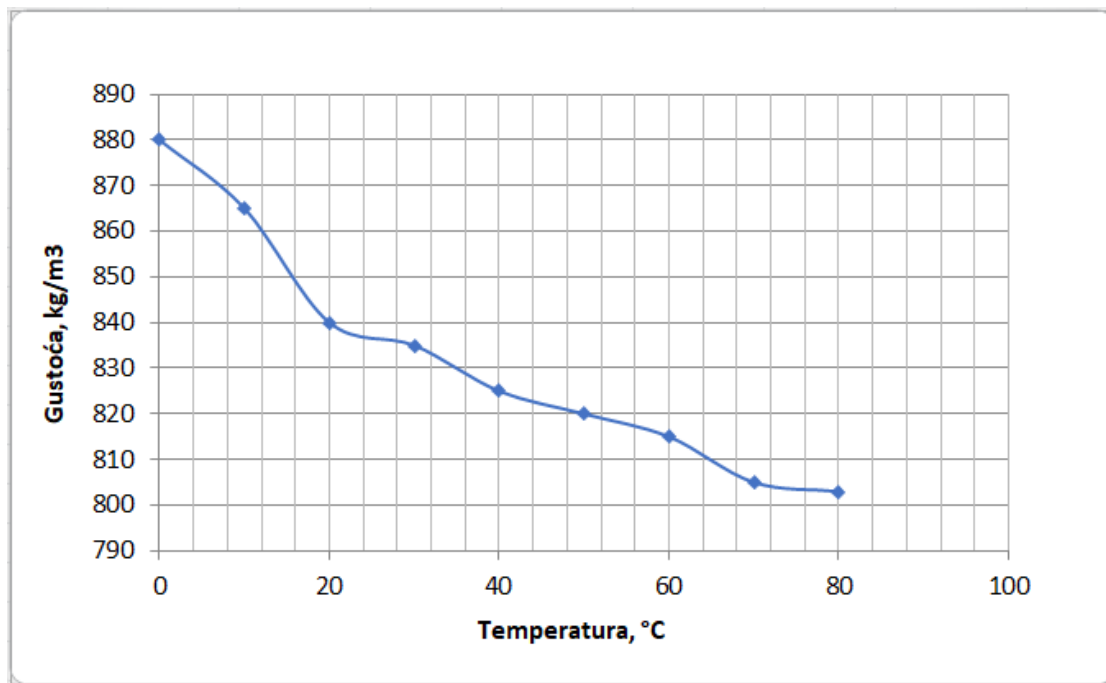
Gustoća dizelskog goriva mijenja se s temperaturom. U software Microsoft Excel unesene su gustoće dizelskog goriva u rasponu temperatura od 0 °C do 80 °C dane u [14] te je metodom polinomne regresije dobivena formula za ovisnost gustoće dizelskog goriva o temperaturi. Formula za izračun gustoće dizelskog goriva u ovisnosti o temperaturi iznosi:

$$\rho_D = -8,611111 \cdot 10^{-9} \cdot t_m^6 + 2,441667 \cdot 10^{-6} \cdot t_m^5 - 2,599893 \cdot 10^{-4} \cdot t_m^4 + 1,261635 \cdot 10^{-2} \cdot t_m^3 - 0,2532856 \cdot t_m^2 - 0,1276829 \cdot t_m + 880,1874 \quad (8.1)$$

gdje je:

- ρ_D – gustoća dizelskog goriva, $\frac{kg}{m^3}$
- t_m – srednja temperatura dizelskog goriva, °C

Ovisnost gustoće dizelskog goriva o temperaturi prikazana je sljedećoj slici.



Slika 8.1 Ovisnost gustoće dizelskog goriva o temperaturi

Toplinska vodljivost dizelskog goriva:

U [13] je dana formula za izračun toplinske vodljivosti dizelskog goriva u ovisnosti o temperaturi:

$$\lambda_D = 0,1601 - 7,5343 \cdot 10^{-5} \cdot T_m \quad (8.2)$$

gdje je:

- λ_D – toplinska vodljivost dizelskog goriva, W/mK
- T_m – srednja temperatura dizelskog goriva, K

Dinamička viskoznost dizelskog goriva:

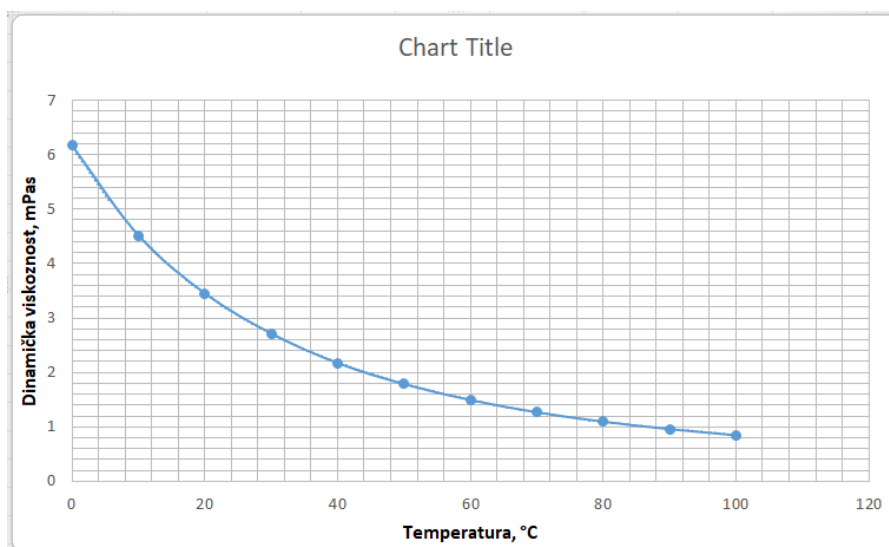
Dinamička viskoznost dizelskog goriva mijenja se s temperaturom. U software Microsoft Excel unesene su dinamičke viskoznosti dizelskog goriva u rasponu temperatura od 0 °C do 100 °C dane u [14] te je metodom polinomne regresije dobivena formula za ovisnost dinamičke viskoznosti dizelskog goriva o temperaturi. Formula za izračun dinamičke viskoznosti dizelskog goriva u ovisnosti o temperaturi iznosi:

$$\eta_D = (1,4974 - 0,0056 \cdot t_m + 0,000078333 \cdot t_m^2 - 0,00000029488 \cdot t_m^3) \cdot 10^{-3} \quad (8.3)$$

gdje je:

- η_D – dinamička viskoznost dizelskog goriva, Pas
- t_m – srednja temperatura dizelskog goriva

Ovisnost dinamičke viskoznosti dizelskog goriva o temperature prikazana je sljedećoj slici.



Slika 8.2 Ovisnost dinamičke viskoznosti dizelskog goriva o temperaturi

Specifični toplinski kapacitet dizelskog goriva:

U [13] je dana formula za izračun specifičnog toplinskog kapaciteta dizelskog goriva u ovisnosti o temperaturi:

$$c_p = 831,25 + 3,714 \cdot T_m \quad (8.4)$$

gdje je:

- c_p – specifični toplinski kapacitet dizelskog goriva, J/kgK
- T_m – srednja temperatura dizelskog goriva, K

8.2. Prikaz toplinskih gubitaka iz dnevnih tankova dizelskog goriva

Toplina koju je potrebno utrošiti na zagrijavanje tankova jednaka je zbroju gubitaka topline preko stijenki tanka i dovedene topline pare za povećanje temperature dizelskog goriva preko cijevi u tanku. Izmjena topline između dva fluida odvojena stijenkom naziva se prolaz topline, a uključuje prijelaz topline konvekcijom s jedne strane stijenke, provođenje kroz stijenku i prijelaz topline konvekcijom s druge strane stijenke. U ovom slučaju riječ je slobodnoj konvekciji. Toplinski gubici dnevnih tankova računati će se za najnepovoljniji slučaj, tj. kada je temperatura dizelskog goriva u tanku najviša (60 °C).

Toplinski gubici iz dnevnih tankova dizelskog goriva računaju se prema sljedećoj formuli:

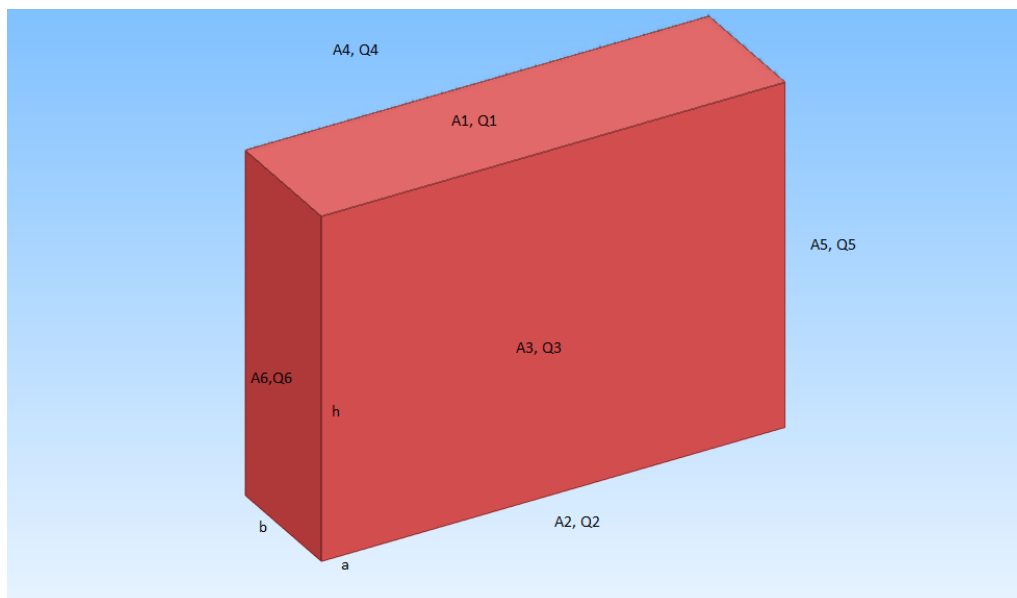
$$Q = A \cdot k \cdot \Delta t \quad (8.5)$$

gdje su:

- A – površina odavanja topline, m²
- k – koeficijent prolaza topline, W/m²K
- Δt – razlika temperatura, °C

8.3. Površine svih stranica tankova

Prije svega potrebno je poznavati površine svih stijenki dnevnih tankova.



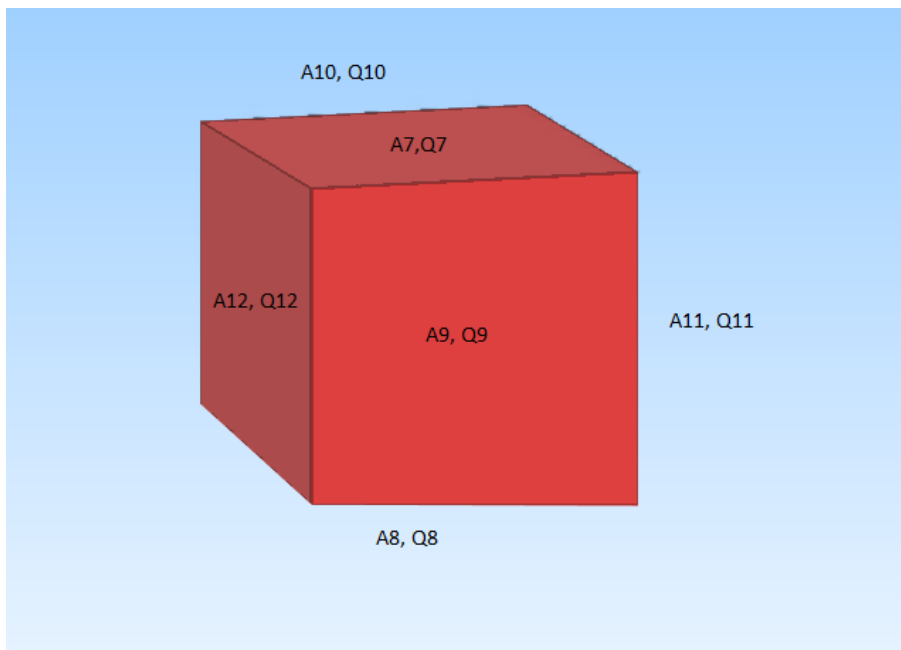
Slika 8.3 Dnevni tank T46

Dimenzije:

- $a = 8,4 \text{ m}$
- $b = 2,4 \text{ m}$
- $h = 6,25 \text{ m}$

Površine:

- $A_1 = 20,16 \text{ m}^2$
- $A_2 = 20,16 \text{ m}^2$
- $A_3 = 52,5 \text{ m}^2$
- $A_4 = 52,5 \text{ m}^2$
- $A_5 = 15 \text{ m}^2$
- $A_6 = 15 \text{ m}^2$

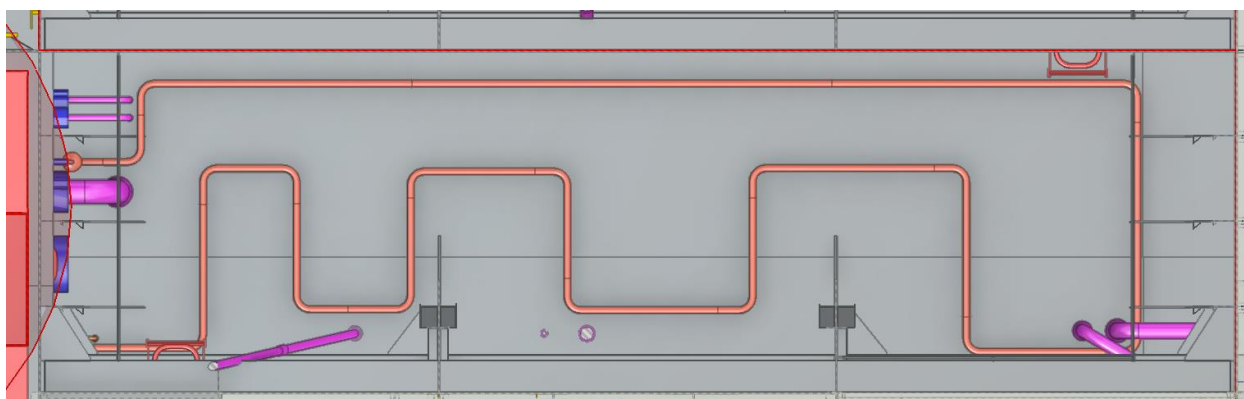


Slika 8.4 Dnevni tank T57

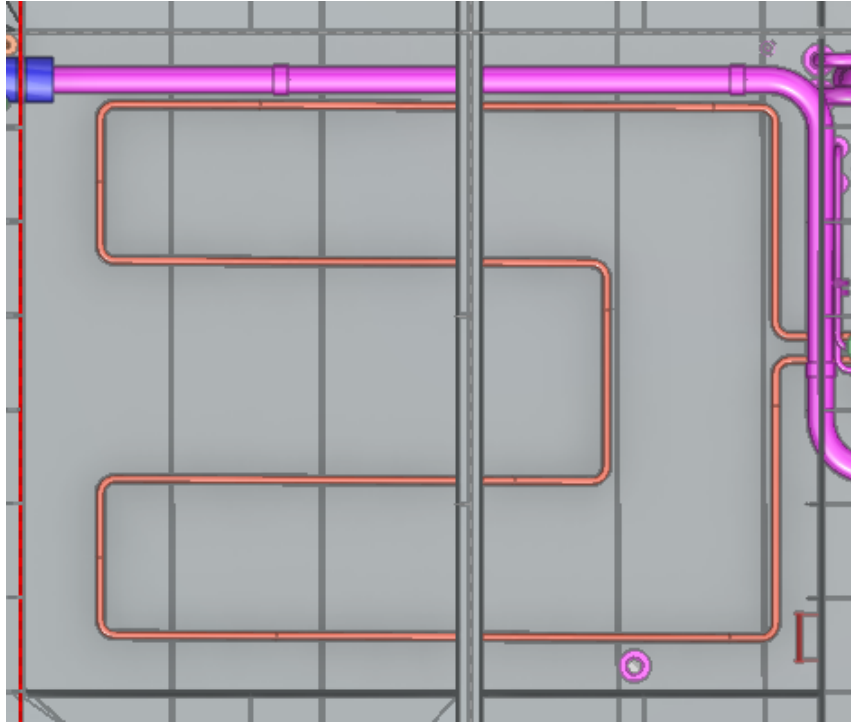
Površine:

- $A_7 = 27,2 \text{ m}^2$
- $A_8 = 27,3 \text{ m}^2$
- $A_9 = 24,3 \text{ m}^2$
- $A_{10} = 25,72 \text{ m}^2$
- $A_{11} = 22,344 \text{ m}^2$
- $A_{12} = 20,06 \text{ m}^2$

Na sljedećim slikama prikazani su 3D modeli dnevnih tankova goriva i cijevi za grijanje u njima.



Slika 8.5 3D model dnevnog tanka dizelskog goriva T46



Slika 8.6 3D model dnevnog tanka dizelskog goriva T57

9. TOPLINSKI GUBICI DNEVNOG TANKA T46

9.1. Toplinski gubici horizontalnog poklopca dnevnog tanka T46

- temperatura zraka oko tanka t_z : 15 °C
- temperatura dizelskog goriva unutar dnevnog tanka t_d : 60 °C
- debljina stijenke od čelika δ_1 : 9 mm
- toplinska vodljivost čelika λ_c : 50 W/mK
- emisijski omjer zračenja ϵ : 0.8
- dimenzije poklopca tanka: 8,4x2,4 m
- površina A_1 : 20,16 m²

Koeficijent prijelaza topline s donje strane poklopca (dizelsko gorivo – stijenka)

Pretpostavlja se temperature stijenke (t_s) 59 °C, a kasnije će se iterativnim postupkom dobiti točna vrijednost temperature stijenke.

1.iteracija:

$$t_m = \frac{t_d + t_s}{2} = \frac{60 + 59}{2} = 59,5 \text{ °C} \quad (9.1)$$

Prema formulama danim u prijašnjem poglavlju mogu se dobiti termodinamičke karakteristike dizelskog goriva:

- toplinska vodljivost, λ (59,5 °C): 0,135 W/mK
- gustoća dalje od stijenke, ρ_∞ (60 °C): 813,249 kg/m³
- gustoća stijenke, ρ (59,5 °C): 813,675 kg/m³
- dinamička viskoznost, η (59,5 °C): 0,00138 Pas
- Kinematička viskoznost, ν (59,5 °C): $1,695 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
- specifični toplinski kapacitet, c_p (59,5 °C): 2066,712 J/kgK

Prandtlov broj:

$$Pr = \frac{\eta \cdot c}{\lambda} = \frac{0,00138 \cdot 2066,712}{0,135} = 21,11 \quad (9.2)$$

Za daljnje računanje biti će potrebne sljedeće vrijednosti:

- koeficijent toplinske ekspanzije za kapljevine i pare, β

$$\beta = \left| \frac{\rho - \rho_{\infty}}{\rho} \right| \cdot \frac{1}{T_s - T_{\infty}} [K^{-1}] \quad (9.3)$$

- karakteristična duljina, l

$$l = \frac{A_1}{O} = \frac{a \cdot b}{2 \cdot (a + b)} = \frac{8,4 \cdot 2,4}{2 \cdot (8,4 + 2,4)} = 0,933 \text{ m} \quad (9.4)$$

Grashofov broj:

$$\begin{aligned} Gr &= \frac{g \cdot l^3 \cdot \beta \cdot (T_s - T_{\infty})}{\nu^2} = g \cdot l^3 \cdot \left| \frac{\rho - \rho_{\infty}}{\rho \cdot \nu^2} \right| \quad (9.5) \\ &= 9,81 \cdot 0,933^3 \cdot \left| \frac{813,675 - 813,249}{813,675 \cdot (1,695 \cdot 10^{-6})^2} \right| = 1454377542 \end{aligned}$$

Rayleighov broj:

$$Ra = Gr \cdot Pr = 1454377542 \cdot 21,11 = 30704015774 \quad (9.6)$$

Nusseltov broj za slobodnu konvekciju, horizontalnu ravnu ploču nastrujavanju s donje strane:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda} = 0,27 \cdot Ra^{\frac{1}{4}} = 113,02 \quad (9.7)$$

Koeficijent prijelaza topline:

$$\alpha_1 = \frac{Nu \cdot \lambda}{l} = \frac{113,0219 \cdot 0,135}{0,933} = 16,35 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (9.8)$$

Koeficijent prijelaza topline s gornje strane poklopca (zrak – stijenka)

Pretpostavlja se temperature stijenke (t_s) 16 °C, a kasnije će se iterativnim postupkom dobiti točna vrijednost temperature stijenke.

1.iteracija:

$$t_m = \frac{t_z + t_s}{2} = \frac{15 + 16}{2} = 15,5 \text{ °C} \quad (9.9)$$

Termodinamičke karakteristike zraka:

- toplinska vodljivost, λ (15,5 °C): 0,026 W/mK
- gustoća dalje od stijenke, ρ_∞ (15 °C): 1,226 kg/m³
- gustoća stijenke, ρ (15,5 °C): 1,223 kg/m³
- dinamička viskoznost, η (15,5 °C): $1,799 \cdot 10^{-5}$ Pas
- Kinematička viskoznost, ν (15,5 °C): $1,47 \cdot 10^{-5}$ m²/s
- specifični toplinski kapacitet, c_p (15,5 °C): 1006,013 J/kgK

Prandtlov broj:

$$Pr = \frac{\eta \cdot c}{\lambda} = \frac{1,799 \cdot 10^{-5} \cdot 1006,013}{0,026} = 0,71 \quad (9.10)$$

Za daljnje računanje biti će potrebne slijedeće vrijednosti:

- koeficijent toplinske idealne plinove, β

$$\beta = \frac{1}{T_m} [K^{-1}] \quad (9.11)$$

- karakteristična duljina, l

$$l = \frac{A_1}{O} = \frac{a \cdot b}{2 \cdot (a + b)} = \frac{8,4 \cdot 2,4}{2 \cdot (8,4 + 2,4)} = 0,933 \text{ m} \quad (9.12)$$

Grashofov broj:

$$Gr = \frac{g \cdot l^3 \cdot \beta \cdot |T_s - T_\infty|}{\nu^2} = \frac{g \cdot l^3 \cdot |16 - 15|}{(15,5 + 273,15) \cdot (1,47 \cdot 10^{-5})^2} = 127844200,3 \quad (9.13)$$

Rayleighov broj:

$$Ra = Gr \cdot Pr = 90586283 \quad (9.14)$$

Nusseltov broj za slobodnu konvekciju, horizontalnu ravnu ploču nastrujavanju s gornje strane:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda} = 0,15 \cdot Ra^{\frac{1}{3}} = 67,37 \quad (9.15)$$

Koeficijentu prijelaza topline s gornjeg strane poklopca potrebno je dodati koeficijent prijelaza topline zračenjem:

$$\alpha_2 = \frac{Nu \cdot \lambda}{l} + \varepsilon \cdot (5,67 \cdot 10^{-8}) \cdot \frac{|T_s|^4 - |T_z|^4}{|T_s - T_z|} = 6,21 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (9.16)$$

Koeficijent prolaza topline horizontalnog poklopca dnevnog tanka T46:

$$k_1 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_1}{\lambda_c} + \frac{1}{\alpha_2}} = 4,5 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (9.17)$$

Gustoća toplinskog toka horizontalnog poklopca dnevnog tanka T46:

$$q_1 = k_1 \cdot (t_d - t_z) = 4,5 \cdot (60 - 15) = 202,3 \text{ W/m}^2 \quad (9.18)$$

Izmijenjeni toplinski tok horizontalnog poklopca dnevnog tanka T46:

$$Q_1 = q_1 \cdot A_1 = 202,3 \cdot 20,16 = 4078,28 \text{ W} \quad (9.19)$$

Temperature stijenke za ostale iteracije mogu se izračunati preko izraza:

$$t_s = t_{fluida} - \frac{q}{\alpha} \quad (9.20)$$

Nakon 17 iteracija rezultati su konvergirali i dobivene su slijedeće vrijednosti:

- temperatura stijenke s unutarnje strane, t_{su} : 48,13 °C
- koeficijent prijelaza topline s unutarnje strane, α_1 : 30,224 W/m²K
- temperatura stijenke s vanjske strane tanka, t_{sv} : 48,07 °C
- koeficijent prijelaza topline s vanjske strane, α_2 : 10,845 W/m²K
- koeficijent prolaza topline horizontalnog poklopca dnevnog tanka T46, k_1 : 7,97 W/m²K
- gustoća toplinskog toka horizontalnog poklopca dnevnog tanka T46, q_1 : 358,641 W/m²
- Izmijenjeni toplinski tok horizontalnog poklopca dnevnog tanka T46, Q_1 : 7230,192 W

9.2. Toplinski gubici horizontalnog dna dnevnog tanka T46

- temperatura vode u balastnom tanku t_w : 15 °C
- temperatura dizelskog goriva unutar dnevnog tanka t_d : 60 °C
- debljina stijenke od čelika δ_1 : 12 mm
- toplinska vodljivost čelika λ_c : 50 W/mK

- emisijski omjer zračenja ε : 0.8
- dimenzije poklopca tanka: 8,4x2,4 m
- površina A_2 : 20,16 m²

Koeficijent prijelaza topline s gornje strane dna (dizelsko gorivo – stijenka)

Pretpostavlja se temperature stijenke (t_s) 59 °C, a kasnije će se iterativnim postupkom dobiti točna vrijednost temperature stijenke.

1.iteracija:

$$t_m = \frac{t_d + t_s}{2} = \frac{60 + 59}{2} = 59,5 \text{ °C} \quad (9.21)$$

Prema formulama danim u prijašnjem poglavlju mogu se dobiti termodinamičke karakteristike dizelskog goriva:

- toplinska vodljivost, λ (59,5 °C): 0,135 W/mK
- gustoća dalje od stijenke, ρ_∞ (60 °C): 813,249 kg/m³
- gustoća stijenke, ρ (59,5 °C): 813,675 kg/m³
- dinamička viskoznost, η (59,5 °C): 0,00138 Pas
- Kinematička viskoznost, ν (59,5 °C): $1,695 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
- specifični toplinski kapacitet, c_p (59,5 °C): 2066,712 J/kgK

Prandtlov broj:

$$Pr = \frac{\eta \cdot c}{\lambda} = \frac{0,00138 \cdot 2066,712}{0,135} = 21,11 \quad (9.22)$$

Za daljnje računanje biti će potrebne slijedeće vrijednosti:

- koeficijent toplinske ekspanzije za kapljevine i pare, β

$$\beta = \left| \frac{\rho - \rho_\infty}{\rho} \right| \cdot \frac{1}{T_s - T_\infty} [K^{-1}] \quad (9.23)$$

- karakteristična duljina, l

$$l = \frac{A_1}{O} = \frac{a \cdot b}{2 \cdot (a + b)} = \frac{8,4 \cdot 2,4}{2 \cdot (8,4 + 2,4)} = 0,933 \text{ m} \quad (9.24)$$

Grashofov broj:

$$\begin{aligned} Gr &= \frac{g \cdot l^3 \cdot \beta \cdot (T_s - T_\infty)}{\nu^2} = g \cdot l^3 \cdot \left| \frac{\rho - \rho_\infty}{\rho \cdot \nu^2} \right| \\ &= 9,81 \cdot 0,933^3 \cdot \left| \frac{813,675 - 813,249}{813,675 \cdot (1,695 \cdot 10^{-6})^2} \right| = 1454377542 \end{aligned} \quad (9.25)$$

Rayleighov broj:

$$Ra = Gr \cdot Pr = 1454377542 \cdot 21,11 = 30704015774 \quad (9.26)$$

Nusseltov broj za slobodnu konvekciju, horizontalnu ravnu ploču nastrujavanju s gornje strane:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda} = 0,15 \cdot Ra^{\frac{1}{3}} = 469,7026 \quad (9.27)$$

Koeficijent prijelaza topline:

$$\alpha_1 = \frac{Nu \cdot \lambda}{l} = \frac{469,7026 \cdot 0,135}{0,933} = 67,96 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (9.28)$$

Koeficijent prijelaza topline s donje strane dna (voda – stijenka)

Pretpostavlja se temperature stijenske (t_s) 16 °C, a kasnije će se iterativnim postupkom dobiti točna vrijednost temperature stijenske.

1.iteracija:

$$t_m = \frac{t_z + t_s}{2} = \frac{15 + 16}{2} = 15,5 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (9.29)$$

Termodinamičke karakteristike vode:

- toplinska vodljivost, λ (15,5 °C): 0,59 W/mK
- gustoća dalje od stijenke, ρ_∞ (15 °C): 999,103 kg/m³
- gustoća stijenke, ρ (15,5 °C): 999,026 kg/m³
- dinamička viskoznost, η (15,5 °C): 0,0011227 Pas
- Kinematička viskoznost, ν (15,5 °C): $1,124 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
- specifični toplinski kapacitet, c_p (15,5 °C): 4187,93 J/kgK

Prandtllov broj:

$$Pr = \frac{\eta \cdot c}{\lambda} = \frac{0,0011227 \cdot 4187,93}{0,59} = 7,97 \quad (9.30)$$

Za daljnje računanje biti će potrebne slijedeće vrijednosti:

- koeficijent toplinske ekspanzije za kapljevine i pare, β

$$\beta = \left| \frac{\rho - \rho_\infty}{\rho} \right| \cdot \frac{1}{T_s - T_\infty} \text{ [K}^{-1}\text{]} \quad (9.31)$$

- karakteristična duljina, l

$$l = \frac{A_1}{O} = \frac{a \cdot b}{2 \cdot (a + b)} = \frac{8,4 \cdot 2,4}{2 \cdot (8,4 + 2,4)} = 0,933 \text{ m} \quad (9.32)$$

Grashofov broj:

$$\begin{aligned} Gr &= \frac{g \cdot l^3 \cdot \beta \cdot (T_s - T_\infty)}{\nu^2} = g \cdot l^3 \cdot \left| \frac{\rho - \rho_\infty}{\rho \cdot \nu^2} \right| & (9.33) \\ &= 9,81 \cdot 0,933^3 \cdot \left| \frac{999,026 - 999,103}{999,026 \cdot (1,124 \cdot 10^{-6})^2} \right| = 485671043,2 \end{aligned}$$

Rayleighov broj:

$$Ra = Gr \cdot Pr = 3871860360 \quad (9.34)$$

Nusseltov broj za slobodnu konvekciju, horizontalnu ravnu ploču nastrujavanju s donje strane:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda} = 0,27 \cdot Ra^{\frac{1}{4}} = 67,351 \quad (9.35)$$

Koeficijentu prijelaza topline:

$$\alpha_2 = \frac{Nu \cdot \lambda}{l} = 42,56 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (9.36)$$

Koeficijent prolaza topline horizontalnog dna dnevnog tanka T46:

$$k_2 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_c} + \frac{1}{\alpha_2}} = 26,0062 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (9.37)$$

Gustoća toplinskog toka horizontalnog dna dnevnog tanka T46:

$$q_2 = k_2 \cdot (t_d - t_w) = 26,0062 \cdot (60 - 15) = 1170,28 \text{ W/m}^2 \quad (9.38)$$

Izmijenjeni toplinski tok horizontalnog dna dnevnog tanka T46:

$$Q_2 = q_2 \cdot A_2 = 1170,28 \cdot 20,16 = 23592,8 \text{ W} \quad (9.39)$$

Temperature stijenje za ostale iteracije mogu se izračunati preko izraza:

$$t_s = t_{fluida} - \frac{q}{\alpha} \quad (9.40)$$

Nakon 15 iteracija rezultati su konvergirali i dobivene su sljedeće vrijednosti:

- temperatura stijenje s unutarnje strane, t_{su} : 44,89 °C
- koeficijent prijelaza topline s unutarnje strane, α_1 : 166,01 W/m²K
- temperatura stijenje s vanjske strane tanka, t_{sv} : 44,28 °C
- koeficijent prijelaza topline s vanjske strane, α_2 : 85,7 W/m²K
- koeficijent prolaza topline horizontalnog dna dnevnog tanka T46, k_2 : 55,762 W/m²K
- gustoća toplinskog toka horizontalnog dna dnevnog tanka T46, q_2 : 2509,29 W/m²
- Izmijenjeni toplinski tok horizontalnog dna dnevnog tanka T46, Q_2 : 50587,25 W

9.3. Toplinski gubici vertikalne stijenje dnevnog tanka T46 s desne (starboard - SB) strane gledano od krme prema pramcu

- temperatura zraka oko tanka t_z : 15 °C
- temperatura dizelskog goriva unutar dnevnog tanka t_d : 60 °C
- debljina stijenje od čelika δ_3 : 12 mm
- toplinska vodljivost čelika λ_c : 50 W/mK
- emisijski omjer zračenja ϵ : 0.8
- dimenzije poklopca tanka: 8,4x6,25 m
- visina tanka H: 6,25 m
- površina A_3 : 52,5 m²

Koeficijent prijelaza topline s unutarnje strane (dizelsko gorivo – stijenska)

Pretpostavlja se temperature stijenje (t_s) 59 °C, a kasnije će se iterativnim postupkom dobiti točna vrijednost temperature stijenje.

1.iteracija:

$$t_m = \frac{t_d + t_s}{2} = \frac{60 + 59}{2} = 59,5 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (9.41)$$

Prema formulama danim u prijašnjem poglavlju mogu se dobiti termodinamičke karakteristike dizelskog goriva:

- toplinska vodljivost, λ (59,5 °C): 0,135 W/mK
- gustoća dalje od stijenke, ρ_∞ (60 °C): 813,249 kg/m³
- gustoća stijenke, ρ (59,5 °C): 813,675 kg/m³
- dinamička viskoznost, η (59,5 °C): 0,00138 Pas
- Kinematička viskoznost, ν (59,5 °C): $1,695 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
- specifični toplinski kapacitet, c (59,5 °C): 2066,712 J/kgK

Prandtlov broj:

$$Pr = \frac{\eta \cdot c}{\lambda} = \frac{0,00138 \cdot 2066,712}{0,135} = 21,11 \quad (9.42)$$

Za daljnje računanje biti će potrebne slijedeće vrijednosti:

- koeficijent toplinske ekspanzije za kapljevine i pare, β

$$\beta = \left| \frac{\rho - \rho_\infty}{\rho} \right| \cdot \frac{1}{T_s - T_\infty} \text{ [K}^{-1}\text{]} \quad (9.43)$$

- karakteristična duljina, l

$$l = H = 6,25 \text{ m} \quad (9.44)$$

Grashofov broj:

$$\begin{aligned} Gr &= \frac{g \cdot l^3 \cdot \beta \cdot (T_s - T_\infty)}{\nu^2} = g \cdot l^3 \cdot \left| \frac{\rho - \rho_\infty}{\rho \cdot \nu^2} \right| & (9.45) \\ &= 9,81 \cdot 6,25^3 \cdot \left| \frac{813,675 - 813,249}{813,675 \cdot (1,695 \cdot 10^{-6})^2} \right| = 4,37 \cdot 10^{11} \end{aligned}$$

Rayleighov broj:

$$Ra = Gr \cdot Pr = 9,22 \cdot 10^{12} \quad (9.46)$$

Nusseltov broj za slobodnu konvekciju, vertikalnu ravnu ploču:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda} = \left\{ 0,825 + \frac{0,387 \cdot Ra^{\frac{1}{6}}}{\left[1 + \left(\frac{0,492}{Pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{8}{27}}} \right\}^2 = 3025,502 \quad (9.47)$$

Koeficijent prijelaza topline:

$$\alpha_1 = \frac{Nu \cdot \lambda}{l} = \frac{3025,502 \cdot 0,135}{6,25} = 65,37 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (9.48)$$

Koeficijent prijelaza topline s vanjske strane (zrak – stijenka)

Pretpostavlja se temperature stijenke (t_s) 16 °C, a kasnije će se iterativnim postupkom dobiti točna vrijednost temperature stijenke.

1.iteracija:

$$t_m = \frac{t_z + t_s}{2} = \frac{15 + 16}{2} = 15,5 \text{ °C} \quad (9.49)$$

Termodinamičke karakteristike zraka:

- toplinska vodljivost, λ (15,5 °C): 0,026 W/mK
- gustoća dalje od stijenke, ρ_{∞} (15 °C): 1,226 kg/m³
- gustoća stijenke, ρ (15,5 °C): 1,223 kg/m³
- dinamička viskoznost, η (15,5 °C): $1,799 \cdot 10^{-5}$ Pas
- Kinematička viskoznost, ν (15,5 °C): $1,47 \cdot 10^{-5}$ m²/s
- specifični toplinski kapacitet, c_p (15,5 °C): 1006,013 J/kgK

Prandtllov broj:

$$Pr = \frac{\eta \cdot c}{\lambda} = \frac{1,799 \cdot 10^{-5} \cdot 1006,013}{0,026} = 0,71 \quad (9.50)$$

Za daljnje računanje biti će potrebne slijedeće vrijednosti:

- koeficijent toplinske idealne plinove, β

$$\beta = \frac{1}{T_m} [K^{-1}] \quad (9.51)$$

- karakteristična duljina, l

$$l = H = 6,25 \text{ m} \quad (9.52)$$

Grashofov broj:

$$Gr = \frac{g \cdot l^3 \cdot \beta \cdot |T_s - T_{\infty}|}{\nu^2} = \frac{g \cdot l^3 \cdot |16 - 15|}{(15,5 + 273,15) \cdot (1,47 \cdot 10^{-5})^2} = 38389349504 \quad (9.53)$$

Rayleighov broj:

$$Ra = Gr \cdot Pr = 2,72 \cdot 10^{10} \quad (9.54)$$

Nusseltov broj za slobodnu konvekciju, vertikalnu ravnu ploču:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda} = \left\{ 0,825 + \frac{0,387 \cdot Ra^{\frac{1}{4}}}{\left[1 + \left(\frac{0,492}{Pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{8}{27}}} \right\}^2 = 346,47 \quad (9.55)$$

Koeficijentu prijelaza topline s vanjske strane stijenke potrebno je dodati koeficijent prijelaza topline zračenjem:

$$\alpha_2 = \frac{Nu \cdot \lambda}{l} + \varepsilon \cdot (5,67 \cdot 10^{-8}) \cdot \frac{|T_s|^4 - |T_z|^4}{|T_s - T_z|} = 5,78 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (9.56)$$

Koeficijent prolaza topline vertikalne stijenke (SB) dnevnog tanka T46:

$$k_3 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_3}{\lambda_c} + \frac{1}{\alpha_2}} = 5,303 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (9.57)$$

Gustoća toplinskog toka vertikalne stijenke (SB) dnevnog tanka T46:

$$q_3 = k_3 \cdot (t_d - t_z) = 5,303 \cdot (60 - 15) = 238,64 \text{ W/m}^2 \quad (9.58)$$

Izmijenjeni toplinski tok vertikalne stijenke (SB) dnevnog tanka T46:

$$Q_3 = q_1 \cdot A_3 = 238,64 \cdot 52,5 = 12528,42 \text{ W} \quad (9.59)$$

Temperature stijenke za ostale iteracije mogu se izračunati preko izraza:

$$t_s = t_{fluida} - \frac{q}{\alpha} \quad (9.60)$$

Nakon 17 iteracija rezultati su konvergirali i dobivene su sljedeće vrijednosti:

- temperatura stijenke s unutarnje strane, t_{su} : 56,1 °C
- koeficijent prijelaza topline s unutarnje strane, α_1 : 102,54 W/m²K

- temperatura stijenke s vanjske strane tanka, t_{sv} : 55,98 °C
- koeficijent prijelaza topline s vanjske strane, α_2 : 9,84 W/m²K
- koeficijent prolaza topline vertikalne stijenke (SB) dnevnog tanka T46, k_3 : 8,96 W/m²K
- gustoća toplinskog toka vertikalne stijenke (SB) dnevnog tanka T46, q_3 : 403,03 W/m²
- Izmijenjeni toplinski tok vertikalne stijenke (SB) dnevnog tanka T46, Q_3 : 21159,22 W

9.4. Toplinski gubici vertikalne stijenke dnevnog tanka T46 s lijeve (portside - PS) strane gledano od krme prema pramcu

- temperatura dizelskog goriva susjednog tanka t_{d1} : 15 °C
- temperatura dizelskog goriva unutar dnevnog tanka t_{d2} : 60 °C
- debljina stijenke od čelika δ_4 : 12 mm
- toplinska vodljivost čelika λ_c : 50 W/mK
- emisijski omjer zračenja ϵ : 0.8
- dimenzije poklopca tanka: 8,4x6,25 m
- visina tanka H: 6,25 m
- površina A_3 : 52,5 m²

Koeficijent prijelaza topline s unutarnje strane (dizelsko gorivo – stijenka)

Pretpostavlja se temperature stijenke (t_s) 59 °C, a kasnije će se iterativnim postupkom dobiti točna vrijednost temperature stijenke.

1.iteracija:

$$t_m = \frac{t_d + t_s}{2} = \frac{60 + 59}{2} = 59,5 \text{ °C} \quad (9.61)$$

Prema formulama danim u prijašnjem poglavlju mogu se dobiti termodinamičke karakteristike dizelskog goriva:

- toplinska vodljivost, λ (59,5 °C): 0,135 W/mK
- gustoća dalje od stijenke, ρ_∞ (60 °C): 813,249 kg/m³
- gustoća stijenke, ρ (59,5 °C): 813,675 kg/m³

- dinamička viskoznost, η (59,5 °C): 0,00138 Pas
- Kinematička viskoznost, ν (59,5 °C): $1,695 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
- specifični toplinski kapacitet, c (59,5 °C): 2066,712 J/kgK

Prandtllov broj:

$$Pr = \frac{\eta \cdot c}{\lambda} = \frac{0,00138 \cdot 2066,712}{0.135} = 21,11 \quad (9.62)$$

Za daljnje računanje biti će potrebne sljedeće vrijednosti:

- koeficijent toplinske ekspanzije za kapljevine i pare, β

$$\beta = \left| \frac{\rho - \rho_{\infty}}{\rho} \right| \cdot \frac{1}{T_s - T_{\infty}} [K^{-1}] \quad (9.63)$$

- karakteristična duljina, l

$$l = H = 6,25 \text{ m} \quad (9.64)$$

Grashofov broj:

$$\begin{aligned} Gr &= \frac{g \cdot l^3 \cdot \beta \cdot (T_s - T_{\infty})}{\nu^2} = g \cdot l^3 \cdot \left| \frac{\rho - \rho_{\infty}}{\rho \cdot \nu^2} \right| \quad (9.65) \\ &= 9,81 \cdot 6,25^3 \cdot \left| \frac{813,675 - 813,249}{813,675 \cdot (1,695 \cdot 10^{-6})^2} \right| = 4,37 \cdot 10^{11} \end{aligned}$$

Rayleighov broj:

$$Ra = Gr \cdot Pr = 9,22 \cdot 10^{12} \quad (9.66)$$

Nusseltov broj za slobodnu konvekciju, vertikalnu ravnu ploču:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda} = \left\{ 0,825 + \frac{0,387 \cdot Ra^{\frac{1}{6}}}{\left[1 + \left(\frac{0,492}{Pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{8}{27}}} \right\}^2 = 3025,502 \quad (9.67)$$

Koeficijent prijelaza topline:

$$\alpha_1 = \frac{Nu \cdot \lambda}{l} = \frac{3025,502 \cdot 0,135}{6,25} = 65,37 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (9.68)$$

Koeficijent prijelaza topline s vanjske strane (stijenka – dizelsko gorivo)

Pretpostavlja se temperature stijenske (t_s) 16 °C, a kasnije će se iterativnim postupkom dobiti točna vrijednost temperature stijenske.

1.iteracija:

$$t_m = \frac{t_{d1} + t_s}{2} = \frac{15 + 16}{2} = 15,5 \text{ °C} \quad (9.69)$$

Prema formulama danim u prijašnjem poglavlju mogu se dobiti termodinamičke karakteristike dizelskog goriva:

- toplinska vodljivost, λ (15,5 °C): 0,138 W/mK
- gustoća dalje od stijenske, ρ_∞ (15 °C): 852,46 kg/m³
- gustoća stijenske, ρ (15,5 °C): 851,4 kg/m³
- dinamička viskoznost, η (15,5 °C): 0,00143 Pas
- Kinematička viskoznost, ν (15,5 °C): $1,68 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$
- specifični toplinski kapacitet, c_p (15,5 °C): 1903,3 J/kgK

Prandtllov broj:

$$Pr = \frac{\eta \cdot c}{\lambda} = \frac{0,00143 \cdot 1903,3}{0,138} = 19,65 \quad (9.70)$$

Za daljnje računanje biti će potrebne sljedeće vrijednosti:

- koeficijent toplinske idealne plinove, β

$$\beta = \left| \frac{\rho - \rho_{\infty}}{\rho} \right| \cdot \frac{1}{T_s - T_{\infty}} [K^{-1}] \quad (9.71)$$

- karakteristična duljina, l

$$l = H = 6,25 \text{ m} \quad (9.72)$$

Grashofov broj:

$$\begin{aligned} Gr &= \frac{g \cdot l^3 \cdot \beta \cdot (T_s - T_{\infty})}{\nu^2} = g \cdot l^3 \cdot \left| \frac{\rho - \rho_{\infty}}{\rho \cdot \nu^2} \right| \quad (9.73) \\ &= 9,81 \cdot 6,25^3 \cdot \left| \frac{851,4 - 852,46}{851,4 \cdot (1,68 \cdot 10^{-5})^2} \right| = 1,06 \cdot 10^{12} \end{aligned}$$

Rayleighov broj:

$$Ra = Gr \cdot Pr = 2,08 \cdot 10^{13} \quad (9.74)$$

Nusseltov broj za slobodnu konvekciju, vertikalnu ravnu ploču:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda} = \left\{ 0,825 + \frac{0,387 \cdot Ra^{\frac{1}{6}}}{\left[1 + \left(\frac{0,492}{Pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{8}{27}}} \right\}^2 = 3944,562 \quad (9.75)$$

Koeficijent prijelaza topline:

$$\alpha_2 = \frac{Nu \cdot \lambda}{l} = 87,32 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (9.76)$$

Koeficijent prolaza topline vertikalne stijenke (PS) dnevnog tanka T46:

$$k_4 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_4}{\lambda_{\xi}} + \frac{1}{\alpha_2}} = 37,05 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (9.77)$$

Gustoća toplinskog toka vertikalne stijenke (PS) dnevnog tanka T46:

$$q_4 = k_4 \cdot (t_{d2} - t_{d1}) = 37,05 \cdot (60 - 15) = 1667,27 \text{ W/m}^2 \quad (9.78)$$

Izmijenjeni toplinski tok vertikalne stijenke (PS) dnevnog tanka T46:

$$Q_4 = q_4 \cdot A_4 = 1667,27 \cdot 52,5 = 87531,86 \text{ W} \quad (9.79)$$

Temperature stijenke za ostale iteracije mogu se izračunati preko izraza:

$$t_s = t_{fluida} - \frac{q}{\alpha} \quad (9.80)$$

Nakon 14 iteracija rezultati su konvergirali i dobivene su sljedeće vrijednosti:

- temperatura stijenke s unutarnje strane, t_{su} : 36 °C
- koeficijent prijelaza topline s unutarnje strane, α_1 : 179,92 W/m²K
- temperatura stijenke s vanjske strane tanka, t_{sv} : 34,97 °C
- koeficijent prijelaza topline s vanjske strane, α_2 : 216,23 W/m²K
- koeficijent prolaza topline vertikalne stijenke (PS) dnevnog tanka T46, k_4 : 95,94 W/m²K
- gustoća toplinskog toka vertikalne stijenke (PS) dnevnog tanka T46, q_4 : 4317,46 W/m²
- Izmijenjeni toplinski tok vertikalne stijenke (PS) dnevnog tanka T46, Q_4 : 226666,7 W

9.5. Toplinski gubici vertikalne stijenske dnevnog tanka T46 s prednje strane (pramca)

- temperatura zraka oko tanka t_z : 15 °C
- temperatura dizelskog goriva unutar dnevnog tanka t_d : 60 °C
- debljina stijenske od čelika δ_s : 10 mm
- toplinska vodljivost čelika λ_c : 50 W/mK
- emisijski omjer zračenja ϵ : 0.8
- dimenzije poklopca tanka: 2,4x6,25 m
- visina tanka H: 6,25 m
- površina A_s : 15 m²

Koeficijent prijelaza topline s unutarnje strane (dizelsko gorivo – stijenska)

Pretpostavlja se temperature stijenske (t_s) 59 °C, a kasnije će se iterativnim postupkom dobiti točna vrijednost temperature stijenske.

1.iteracija:

$$t_m = \frac{t_d + t_s}{2} = \frac{60 + 59}{2} = 59,5 \text{ °C} \quad (9.81)$$

Prema formulama danim u prijašnjem poglavlju mogu se dobiti termodinamičke karakteristike dizelskog goriva:

- toplinska vodljivost, λ (59,5 °C): 0,135 W/mK
- gustoća dalje od stijenske, ρ_∞ (60 °C): 813,249 kg/m³
- gustoća stijenske, ρ (59,5 °C): 813,675 kg/m³
- dinamička viskoznost, η (59,5 °C): 0,00138 Pas
- Kinematička viskoznost, ν (59,5 °C): $1,695 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
- specifični toplinski kapacitet, c (59,5 °C): 2066,712 J/kgK

Prandtllov broj:

$$Pr = \frac{\eta \cdot c}{\lambda} = \frac{0,00138 \cdot 2066,712}{0,135} = 21,11 \quad (9.82)$$

Za daljnje računanje biti će potrebne sljedeće vrijednosti:

- koeficijent toplinske ekspanzije za kapljevine i pare, β

$$\beta = \left| \frac{\rho - \rho_{\infty}}{\rho} \right| \cdot \frac{1}{T_s - T_{\infty}} [K^{-1}] \quad (9.83)$$

- karakteristična duljina, l

$$l = H = 6,25 \text{ m} \quad (9.84)$$

Grashofov broj:

$$\begin{aligned} Gr &= \frac{g \cdot l^3 \cdot \beta \cdot (T_s - T_{\infty})}{\nu^2} = g \cdot l^3 \cdot \left| \frac{\rho - \rho_{\infty}}{\rho \cdot \nu^2} \right| \quad (9.85) \\ &= 9,81 \cdot 6,25^3 \cdot \left| \frac{813,675 - 813,249}{813,675 \cdot (1,695 \cdot 10^{-6})^2} \right| = 4,37 \cdot 10^{11} \end{aligned}$$

Rayleighov broj:

$$Ra = Gr \cdot Pr = 9,22 \cdot 10^{12} \quad (9.86)$$

Nusseltov broj za slobodnu konvekciju, vertikalnu ravnu ploču:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda} = \left\{ 0,825 + \frac{0,387 \cdot Ra^{\frac{1}{6}}}{\left[1 + \left(\frac{0,492}{Pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{8}{27}}} \right\}^2 = 3025,502 \quad (9.87)$$

Koeficijent prijelaza topline:

$$\alpha_1 = \frac{Nu \cdot \lambda}{l} = \frac{3025,502 \cdot 0,135}{6,25} = 65,37 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (9.88)$$

Koeficijent prijelaza topline s vanjske strane (zrak – stijenka)

Pretpostavlja se temperature stijenke (t_s) 16 °C, a kasnije će se iterativnim postupkom dobiti točna vrijednost temperature stijenke.

1.iteracija:

$$t_m = \frac{t_z + t_s}{2} = \frac{15 + 16}{2} = 15,5 \text{ °C} \quad (9.89)$$

Termodinamičke karakteristike zraka:

- toplinska vodljivost, λ (15,5 °C): 0,026 W/mK
- gustoća dalje od stijenke, ρ_∞ (15 °C): 1,226 kg/m³
- gustoća stijenke, ρ (15,5 °C): 1,223 kg/m³
- dinamička viskoznost, η (15,5 °C): $1,799 \cdot 10^{-5}$ Pas
- Kinematička viskoznost, ν (15,5 °C): $1,47 \cdot 10^{-5}$ m²/s
- specifični toplinski kapacitet, c_p (15,5 °C): 1006,013 J/kgK

Prandtlov broj:

$$Pr = \frac{\eta \cdot c}{\lambda} = \frac{1,799 \cdot 10^{-5} \cdot 1006,013}{0,026} = 0,71 \quad (9.90)$$

Za daljnje računanje biti će potrebne slijedeće vrijednosti:

- koeficijent toplinske idealne plinove, β

$$\beta = \frac{1}{T_m} [K^{-1}] \quad (9.91)$$

- karakteristična duljina, l

$$l = H = 6,25 \text{ m} \quad (9.92)$$

Grashofov broj:

$$Gr = \frac{g \cdot l^3 \cdot \beta \cdot |T_s - T_\infty|}{\nu^2} = \frac{g \cdot l^3 \cdot |16 - 15|}{(15,5 + 273,15) \cdot (1,47 \cdot 10^{-5})^2} = 38389349504 \quad (9.93)$$

Rayleighov broj:

$$Ra = Gr \cdot Pr = 2,72 \cdot 10^{10} \quad (9.94)$$

Nusseltov broj za slobodnu konvekciju, vertikalnu ravnu ploču:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda} = \left\{ 0,825 + \frac{0,387 \cdot Ra^{\frac{1}{4}}}{\left[1 + \left(\frac{0,492}{Pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{8}{27}}} \right\}^2 = 346,47 \quad (9.95)$$

Koeficijentu prijelaza topline s vanjske strane stijenke potrebno je dodati koeficijent prijelaza topline zračenjem:

$$\alpha_2 = \frac{Nu \cdot \lambda}{l} + \varepsilon \cdot (5,67 \cdot 10^{-8}) \cdot \frac{|T_s|^4 - |T_z|^4}{|T_s - T_z|} = 5,78 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (9.96)$$

Koeficijent prolaza topline vertikalne stijenke (pramac) dnevnog tanka T46:

$$k_5 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_1}{\lambda_c} + \frac{1}{\alpha_2}} = 5,304 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (9.97)$$

Gustoća toplinskog toka vertikalne stijenke (pramac) dnevnog tanka T46:

$$q_5 = k_1 \cdot (t_d - t_z) = 5,304 \cdot (60 - 15) = 238,69 \text{ W/m}^2 \quad (9.98)$$

Izmijenjeni toplinski tok vertikalne stijenke (pramac) dnevnog tanka T46:

$$Q_5 = q_1 \cdot A_3 = 238,69 \cdot 15 = 3580.308 \text{ W} \quad (9.99)$$

Temperature stijenke za ostale iteracije mogu se izračunati preko izraza:

$$t_s = t_{fluida} - \frac{q}{\alpha} \quad (9.100)$$

Nakon 17 iteracija rezultati su konvergirali i dobivene su slijedeće vrijednosti:

- temperatura stijenke s unutarnje strane, t_{su} : 56,1 °C
- koeficijent prijelaza topline s unutarnje strane, α_1 : 102,55 W/m²K
- temperatura stijenke s vanjske strane tanka, t_{sv} : 55,99 °C
- koeficijent prijelaza topline s vanjske strane, α_2 : 9,84 W/m²K
- koeficijent prolaza topline vertikalne stijenke (pramac) dnevnog tanka T46, k_5 : 8,96 W/m²K
- gustoća toplinskog vertikalne stijenke (pramac) dnevnog tanka T46, q_5 : 403,21 W/m²
- Izmijenjeni toplinski vertikalne stijenke (pramac) dnevnog tanka T46, Q_5 : 6048,2 W

9.6. Toplinski gubici vertikalne stijenke dnevnog tanka T46 sa stražnje strane (krme)

- temperatura zraka oko tanka t_z : 15 °C
- temperatura dizelskog goriva unutar dnevnog tanka t_d : 60 °C
- debljina stijenke od čelika δ_1 : 10 mm

- toplinska vodljivost čelika λ_ε : 50 W/mK
- emisijski omjer zračenja ε : 0.8
- dimenzije poklopca tanka: 2,4x6,25 m
- visina tanka H: 6,25 m
- površina A_5 : 15 m²

Koeficijent prijelaza topline s unutarnje strane (dizelsko gorivo – stijenka)

Pretpostavlja se temperature stijenke (t_s) 59 °C, a kasnije će se iterativnim postupkom dobiti točna vrijednost temperature stijenke.

1.iteracija:

$$t_m = \frac{t_d + t_s}{2} = \frac{60 + 59}{2} = 59,5 \text{ °C} \quad (9.101)$$

Prema formulama danim u prijašnjem poglavlju mogu se dobiti termodinamičke karakteristike dizelskog goriva:

- toplinska vodljivost, λ (59,5 °C): 0,135 W/mK
- gustoća dalje od stijenke, ρ_∞ (60 °C): 813,249 kg/m³
- gustoća stijenke, ρ (59,5 °C): 813,675 kg/m³
- dinamička viskoznost, η (59,5 °C): 0,00138 Pas
- Kinematička viskoznost, ν (59,5 °C): $1,695 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
- specifični toplinski kapacitet, c (59,5 °C): 2066,712 J/kgK

Prandtlov broj:

$$Pr = \frac{\eta \cdot c}{\lambda} = \frac{0,00138 \cdot 2066,712}{0,135} = 21,11 \quad (9.102)$$

Za daljnje računanje biti će potrebne slijedeće vrijednosti:

- koeficijent toplinske ekspanzije za kapljevine i pare, β

$$\beta = \left| \frac{\rho - \rho_{\infty}}{\rho} \right| \cdot \frac{1}{T_s - T_{\infty}} [K^{-1}] \quad (9.103)$$

- karakteristična duljina, l

$$l = H = 6,25 \text{ m} \quad (9.104)$$

Grashofov broj:

$$\begin{aligned} Gr &= \frac{g \cdot l^3 \cdot \beta \cdot (T_s - T_{\infty})}{\nu^2} = g \cdot l^3 \cdot \left| \frac{\rho - \rho_{\infty}}{\rho \cdot \nu^2} \right| \quad (9.105) \\ &= 9,81 \cdot 6,25^3 \cdot \left| \frac{813,675 - 813,249}{813,675 \cdot (1,695 \cdot 10^{-6})^2} \right| = 4,37 \cdot 10^{11} \end{aligned}$$

Rayleighov broj:

$$Ra = Gr \cdot Pr = 9,22 \cdot 10^{12} \quad (9.106)$$

Nusseltov broj za slobodnu konvekciju, vertikalnu ravnu ploču:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda} = \left\{ 0,825 + \frac{0,387 \cdot Ra^{\frac{1}{6}}}{\left[1 + \left(\frac{0,492}{Pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{8}{27}}} \right\}^2 = 3025,502 \quad (9.107)$$

Koeficijent prijelaza topline:

$$\alpha_1 = \frac{Nu \cdot \lambda}{l} = \frac{3025,502 \cdot 0,135}{6,25} = 65,37 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (9.108)$$

Koeficijent prijelaza topline s vanjske strane (zrak – stijenka)

Pretpostavlja se temperature stijenske (t_s) 16 °C, a kasnije će se iterativnim postupkom dobiti točna vrijednost temperature stijenske.

1.iteracija:

$$t_m = \frac{t_z + t_s}{2} = \frac{15 + 16}{2} = 15,5 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (9.109)$$

Termodinamičke karakteristike zraka:

- toplinska vodljivost, λ (15,5 °C): 0,026 W/mK
- gustoća dalje od stijenke, ρ_∞ (15 °C): 1,226 kg/m³
- gustoća stijenke, ρ (15,5 °C): 1,223 kg/m³
- dinamička viskoznost, η (15,5 °C): $1,799 \cdot 10^{-5}$ Pas
- Kinematička viskoznost, ν (15,5 °C): $1,47 \cdot 10^{-5}$ m²/s
- specifični toplinski kapacitet, c_p (15,5 °C): 1006,013 J/kgK

Prandtllov broj:

$$Pr = \frac{\eta \cdot c}{\lambda} = \frac{1,799 \cdot 10^{-5} \cdot 1006,013}{0,026} = 0,71 \quad (9.110)$$

Za daljnje računanje biti će potrebne slijedeće vrijednosti:

- koeficijent toplinske idealne plinove, β

$$\beta = \frac{1}{T_m} [K^{-1}] \quad (9.111)$$

- karakteristična duljina, l

$$l = H = 6,25 \text{ m} \quad (9.112)$$

Grashofov broj:

$$Gr = \frac{g \cdot l^3 \cdot \beta \cdot |T_s - T_\infty|}{\nu^2} = \frac{g \cdot l^3 \cdot |16 - 15|}{(15,5 + 273,15) \cdot (1,47 \cdot 10^{-5})^2} = 38389349504 \quad (9.113)$$

Rayleighov broj:

$$Ra = Gr \cdot Pr = 2,72 \cdot 10^{10} \quad (9.114)$$

Nusseltov broj za slobodnu konvekciju, vertikalnu ravnu ploču:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda} = \left\{ 0,825 + \frac{0,387 \cdot Ra^{\frac{1}{6}}}{\left[1 + \left(\frac{0,492}{Pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{8}{27}}} \right\}^2 = 346,47 \quad (9.115)$$

Koeficijentu prijelaza topline s vanjske strane stijenke potrebno je dodati koeficijent prijelaza topline zračenjem:

$$\alpha_2 = \frac{Nu \cdot \lambda}{l} + \varepsilon \cdot (5,67 \cdot 10^{-8}) \cdot \frac{|T_s|^4 - |T_z|^4}{|T_s - T_z|} = 5,78 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (9.116)$$

Koeficijent prolaza topline vertikalne stijenke (krma) dnevnog tanka T46:

$$k_6 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_6}{\lambda_c} + \frac{1}{\alpha_2}} = 5,304 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (9.117)$$

Gustoća toplinskog toka vertikalne stijenke (krma) dnevnog tanka T46:

$$q_6 = k_6 \cdot (t_d - t_z) = 5,304 \cdot (60 - 15) = 238,69 \text{ W/m}^2 \quad (9.118)$$

Izmijenjeni toplinski tok vertikalne stijenke (krma) dnevnog tanka T46:

$$Q_6 = q_6 \cdot A_6 = 238,69 \cdot 15 = 3580,308 \text{ W} \quad (9.119)$$

Temperature stijenje za ostale iteracije mogu se izračunati preko izraza:

$$t_s = t_{fluida} - \frac{q}{\alpha} \quad (9.120)$$

Nakon 17 iteracija rezultati su konvergirali i dobivene su sljedeće vrijednosti:

- temperatura stijenje s unutarnje strane, t_{su} : 56,1 °C
- koeficijent prijelaza topline s unutarnje strane, α_1 : 102,55 W/m²K
- temperatura stijenje s vanjske strane tanka, t_{sv} : 55,99 °C
- koeficijent prijelaza topline s vanjske strane, α_2 : 9,84 W/m²K
- koeficijent prolaza vertikalne stijenje (krma) dnevnog tanka T46, k_6 : 8,96 W/m²K
- gustoća toplinskog toka vertikalne stijenje (krma) dnevnog tanka T46, q_6 : 403,21 W/m²
- Izmijenjeni toplinski tok vertikalne stijenje (krma) dnevnog tanka T46, Q_6 : 6048,2 W

10. TOPLINSKI GUBICI DNEVNOG TANKA T57

10.1. Toplinski gubici horizontalnog poklopca dnevnog tanka T57

- temperatura zraka oko tanka t_z : 15 °C
- temperatura dizelskog goriva unutar dnevnog tanka t_d : 60 °C
- debljina stijenke od čelika δ_7 : 9 mm
- toplinska vodljivost čelika λ_c : 50 W/mK
- emisijski omjer zračenja ϵ : 0.8
- dimenzije poklopca tanka: 5,66x4,8 m
- površina A_7 : 27,168 m²

Koeficijent prijelaza topline s donje strane poklopca (dizelsko gorivo – stijenka)

Pretpostavlja se temperature stijenke (t_s) 59 °C, a kasnije će se iterativnim postupkom dobiti točna vrijednost temperature stijenke.

1. iteracija:

$$t_m = \frac{t_d + t_s}{2} = \frac{60 + 59}{2} = 59,5 \text{ °C} \quad (10.1)$$

Prema formulama danim u prijašnjem poglavlju mogu se dobiti termodinamičke karakteristike dizelskog goriva:

- toplinska vodljivost, λ (59,5 °C): 0,135 W/mK
- gustoća dalje od stijenke, ρ_∞ (60 °C): 813,249 kg/m³
- gustoća stijenke, ρ (59,5 °C): 813,675 kg/m³
- dinamička viskoznost, η (59,5 °C): 0,00138 Pas
- Kinematička viskoznost, ν (59,5 °C): $1,695 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
- specifični toplinski kapacitet, c_p (59,5 °C): 2066,712 J/kgK

Prandtlov broj:

$$Pr = \frac{\eta \cdot c}{\lambda} = \frac{0,00138 \cdot 2066,712}{0,135} = 21,11 \quad (10.2)$$

Za daljnje računanje biti će potrebne sljedeće vrijednosti:

- koeficijent toplinske ekspanzije za kapljevine i pare, β

$$\beta = \left| \frac{\rho - \rho_{\infty}}{\rho} \right| \cdot \frac{1}{T_s - T_{\infty}} [K^{-1}] \quad (10.3)$$

- karakteristična duljina, l

$$l = \frac{A_7}{O} = \frac{a \cdot b}{2 \cdot (a + b)} = \frac{5,66 \cdot 4,8}{2 \cdot (5,66 + 4,8)} = 1,3 \text{ m} \quad (10.4)$$

Grashofov broj:

$$\begin{aligned} Gr &= \frac{g \cdot l^3 \cdot \beta \cdot (T_s - T_{\infty})}{\nu^2} = g \cdot l^3 \cdot \left| \frac{\rho - \rho_{\infty}}{\rho \cdot \nu^2} \right| \quad (10.5) \\ &= 9,81 \cdot 1,3^3 \cdot \left| \frac{813,675 - 813,249}{813,675 \cdot (1,695 \cdot 10^{-6})^2} \right| = 3917913063 \end{aligned}$$

Rayleighov broj:

$$Ra = Gr \cdot Pr = 82712817693 \quad (10.6)$$

Nusseltov broj za slobodnu konvekciju, horizontalnu ravnu ploču nastrujavanu s donje strane:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda} = 0,27 \cdot Ra^{\frac{1}{4}} = 144,8 \quad (10.7)$$

Koeficijent prijelaza topline:

$$\alpha_1 = \frac{Nu \cdot \lambda}{l} = \frac{144,8 \cdot 0,135}{1,3} = 15,06 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (10.8)$$

Koeficijent prijelaza topline s gornje strane poklopca (zrak – stijenka)

Pretpostavlja se temperature stijenke (t_s) 16 °C, a kasnije će se iterativnim postupkom dobiti točna vrijednost temperature stijenke.

1.iteracija:

$$t_m = \frac{t_z + t_s}{2} = \frac{15 + 16}{2} = 15,5 \text{ °C} \quad (10.9)$$

Termodinamičke karakteristike zraka:

- toplinska vodljivost, λ (15,5 °C): 0,026 W/mK
- gustoća dalje od stijenke, ρ_∞ (15 °C): 1,226 kg/m³
- gustoća stijenke, ρ (15,5 °C): 1,223 kg/m³
- dinamička viskoznost, η (15,5 °C): $1,799 \cdot 10^{-5}$ Pas
- Kinematička viskoznost, ν (15,5 °C): $1,47 \cdot 10^{-5}$ m²/s
- specifični toplinski kapacitet, c_p (15,5 °C): 1006,013 J/kgK

Prandtllov broj:

$$Pr = \frac{\eta \cdot c}{\lambda} = \frac{1,799 \cdot 10^{-5} \cdot 1006,013}{0,026} = 0,71 \quad (10.10)$$

Za daljnje računanje biti će potrebne slijedeće vrijednosti:

- koeficijent toplinske idealne plinove, β

$$\beta = \frac{1}{T_m} [K^{-1}] \quad (10.11)$$

- karakteristična duljina, l

$$l = \frac{A_7}{O} = \frac{a \cdot b}{2 \cdot (a + b)} = \frac{5,66 \cdot 4,8}{2 \cdot (5,66 + 4,8)} = 1,3 \text{ m} \quad (10.12)$$

Grashofov broj:

$$Gr = \frac{g \cdot l^3 \cdot \beta \cdot |T_s - T_\infty|}{\nu^2} = \frac{g \cdot l^3 \cdot |16 - 15|}{(15,5 + 273,15) \cdot (1,47 \cdot 10^{-5})^2} = 344396450,1 \quad (10.13)$$

Rayleighov broj:

$$Ra = Gr \cdot Pr = 244028233 \quad (10.14)$$

Nusseltov broj za slobodnu konvekciju, horizontalnu ravnu ploču nastrujavanju s gornje strane:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda} = 0,15 \cdot Ra^{\frac{1}{3}} = 93,74 \quad (10.15)$$

Koeficijentu prijelaza topline s gornjeg strane poklopca potrebno je dodati koeficijent prijelaza topline zračenjem:

$$\alpha_2 = \frac{Nu \cdot \lambda}{l} + \varepsilon \cdot (5,67 \cdot 10^{-8}) \cdot \frac{|T_s|^4 - |T_z|^4}{|T_s - T_z|} = 6,21 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (10.16)$$

Koeficijent prolaza topline horizontalnog poklopca dnevnog tanka T57:

$$k_7 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_7}{\lambda_c} + \frac{1}{\alpha_2}} = 4,4 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (10.17)$$

Gustoća toplinskog toka horizontalnog poklopca dnevnog tanka T57:

$$q_7 = k_7 \cdot (t_d - t_z) = 4,4 \cdot (60 - 15) = 197,62 \text{ W/m}^2 \quad (10.18)$$

Izmijenjeni toplinski tok horizontalnog poklopca dnevnog tanka T57:

$$Q_7 = q_7 \cdot A_7 = 197,62 \cdot 27,168 = 5368,91 \text{ W} \quad (10.19)$$

Temperature stijenske za ostale iteracije mogu se izračunati preko izraza:

$$t_s = t_{fluida} - \frac{q}{\alpha} \quad (10.20)$$

Nakon 14 iteracija rezultati su konvergirali i dobivene su sljedeće vrijednosti:

- temperatura stijenske s unutarnje strane, t_{su} : 47,54 °C
- koeficijent prijelaza topline s unutarnje strane, α_1 : 28,15 W/m²K
- temperatura stijenske s vanjske strane tanka, t_{sv} : 47,48 °C
- koeficijent prijelaza topline s vanjske strane, α_2 : 10,8 W/m²K
- koeficijent prolaza topline horizontalnog poklopca dnevnog tanka T57, k_7 : 7,8 W/m²K
- gustoća toplinskog toka horizontalnog poklopca dnevnog tanka T57, q_7 : 350,74 W/m²
- Izmijenjeni toplinski tok horizontalnog poklopca dnevnog tanka T57, Q_7 : 9528,9 W

10.2. Toplinski gubici horizontalnog dna dnevnog tanka T57

- temperatura vode u tanku otpadne vode t_w : 15 °C
- temperatura dizelskog goriva unutar dnevnog tanka t_d : 60 °C
- debljina stijenske od čelika δ_8 : 15 mm
- toplinska vodljivost čelika λ_8 : 50 W/mK
- emisijski omjer zračenja ε : 0.8
- dimenzije poklopca tanka: 5,68x4,807 m
- površina A_2 : 27,3 m²

Koeficijent prijelaza topline s gornje strane dna (dizelsko gorivo – stijenska)

Pretpostavlja se temperature stijenske (t_s) 59 °C, a kasnije će se iterativnim postupkom dobiti točna vrijednost temperature stijenske.

1.iteracija:

$$t_m = \frac{t_d + t_s}{2} = \frac{60 + 59}{2} = 59,5 \text{ °C} \quad (10.21)$$

Prema formulama danim u prijašnjem poglavlju mogu se dobiti termodinamičke karakteristike dizelskog goriva:

- toplinska vodljivost, λ (59,5 °C): 0,135 W/mK
- gustoća dalje od stijenke, ρ_∞ (60 °C): 813,249 kg/m³
- gustoća stijenke, ρ (59,5 °C): 813,675 kg/m³
- dinamička viskoznost, η (59,5 °C): 0,00138 Pas
- Kinematička viskoznost, ν (59,5 °C): $1,695 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
- specifični toplinski kapacitet, c_p (59,5 °C): 2066,712 J/kgK

Prandtllov broj:

$$Pr = \frac{\eta \cdot c}{\lambda} = \frac{0,00138 \cdot 2066,712}{0,135} = 21,11 \quad (10.22)$$

Za daljnje računanje biti će potrebne slijedeće vrijednosti:

- koeficijent toplinske ekspanzije za kapljevine i pare, β

$$\beta = \left| \frac{\rho - \rho_\infty}{\rho} \right| \cdot \frac{1}{T_s - T_\infty} [K^{-1}] \quad (10.23)$$

- karakteristična duljina, l

$$l = \frac{A_1}{O} = \frac{a \cdot b}{2 \cdot (a + b)} = \frac{5,68 \cdot 4,807}{2 \cdot (5,68 + 4,807)} = 1,3 \text{ m} \quad (10.24)$$

Grashofov broj:

$$\begin{aligned} Gr &= \frac{g \cdot l^3 \cdot \beta \cdot (T_s - T_\infty)}{\nu^2} = g \cdot l^3 \cdot \left| \frac{\rho - \rho_\infty}{\rho \cdot \nu^2} \right| \quad (10.25) \\ &= 9,81 \cdot 1,3^3 \cdot \left| \frac{813,675 - 813,249}{813,675 \cdot (1,695 \cdot 10^{-6})^2} \right| = 3496302861 \end{aligned}$$

Rayleighov broj:

$$Ra = Gr \cdot Pr = 83312167436 \quad (10.26)$$

Nusseltov broj za slobodnu konvekciju, horizontalnu ravnu ploču nastrujavanju s gornje strane:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda} = 0,15 \cdot Ra^{\frac{1}{3}} = 655,13 \quad (10.27)$$

Koeficijent prijelaza topline:

$$\alpha_1 = \frac{Nu \cdot \lambda}{l} = \frac{655,13 \cdot 0,135}{1,3} = 67,96 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (10.28)$$

Koeficijent prijelaza topline s donje strane dna (voda – stijenka)

Pretpostavlja se temperature stijenske (t_s) 16 °C, a kasnije će se iterativnim postupkom dobiti točna vrijednost temperature stijenske.

1.iteracija:

$$t_m = \frac{t_z + t_s}{2} = \frac{15 + 16}{2} = 15,5 \text{ °C} \quad (10.29)$$

Termodinamičke karakteristike vode:

- toplinska vodljivost, λ (15,5 °C): 0,59 W/mK
- gustoća dalje od stijenske, ρ_∞ (15 °C): 999,103 kg/m³
- gustoća stijenske, ρ (15,5 °C): 999,026 kg/m³
- dinamička viskoznost, η (15,5 °C): 0,0011227 Pas
- Kinematička viskoznost, ν (15,5 °C): $1,124 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
- specifični toplinski kapacitet, c_p (15,5 °C): 4187,93 J/kgK

Prandtllov broj:

$$Pr = \frac{\eta \cdot c}{\lambda} = \frac{0,0011227 \cdot 4187,93}{0,59} = 7,97 \quad (10.30)$$

Za daljnje računanje biti će potrebne sljedeće vrijednosti:

- koeficijent toplinske ekspanzije za kapljevine i pare, β

$$\beta = \left| \frac{\rho - \rho_{\infty}}{\rho} \right| \cdot \frac{1}{T_s - T_{\infty}} [K^{-1}] \quad (10.31)$$

- karakteristična duljina, l

$$l = \frac{A_1}{O} = \frac{a \cdot b}{2 \cdot (a + b)} = \frac{5,68 \cdot 4,807}{2 \cdot (5,68 + 4,807)} = 1,3 \text{ m} \quad (10.32)$$

Grashofov broj:

$$\begin{aligned} Gr &= \frac{g \cdot l^3 \cdot \beta \cdot (T_s - T_{\infty})}{\nu^2} = g \cdot l^3 \cdot \left| \frac{\rho - \rho_{\infty}}{\rho \cdot \nu^2} \right| \quad (10.33) \\ &= 9,81 \cdot 1,3^3 \cdot \left| \frac{999,026 - 999,103}{999,026 \cdot (1,124 \cdot 10^{-6})^2} \right| = 1317818085 \end{aligned}$$

Rayleighov broj:

$$Ra = Gr \cdot Pr = 1,051 \cdot 10^{10} \quad (10.34)$$

Nusseltov broj za slobodnu konvekciju, horizontalnu ravnu ploču nastrujavanju s donje strane:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda} = 0,27 \cdot Ra^{\frac{1}{4}} = 86,44 \quad (10.35)$$

Koeficijentu prijelaza topline:

$$\alpha_2 = \frac{Nu \cdot \lambda}{l} = 39,16 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (10.36)$$

Koeficijent prolaza topline horizontalnog dna dnevnog tanka T57:

$$k_8 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_8}{\lambda_c} + \frac{1}{\alpha_2}} = 24,66 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (10.37)$$

Gustoća toplinskog toka horizontalnog dna dnevnog tanka T57:

$$q_8 = k_8 \cdot (t_d - t_w) = 24,66 \cdot (60 - 15) = 1109,72 \text{ W/m}^2 \quad (10.38)$$

Izmijenjeni toplinski tok horizontalnog dna dnevnog tanka T57:

$$Q_8 = q_8 \cdot A_8 = 1109,72 \cdot 27,3 = 30299,66 \text{ W} \quad (10.39)$$

Temperature stijenke za ostale iteracije mogu se izračunati preko izraza:

$$t_s = t_{fluida} - \frac{q}{\alpha} \quad (10.40)$$

Nakon 17 iteracija rezultati su konvergirali i dobivene su slijedeće vrijednosti:

- temperatura stijenke s unutarnje strane, t_{su} : 42,92 °C
- koeficijent prijelaza topline s unutarnje strane, α_1 : 172,22 W/m²K
- temperatura stijenke s vanjske strane tanka, t_{sv} : 42,04 °C
- koeficijent prijelaza topline s vanjske strane, α_2 : 108,8 W/m²K
- koeficijent prolaza topline horizontalnog dna dnevnog tanka T57, k_8 : 65,37 W/m²K
- gustoća toplinskog toka horizontalnog dna dnevnog tanka T57, q_8 : 2941,6 W/m²
- Izmijenjeni toplinski tok horizontalnog dna dnevnog tanka T57, Q_8 : 80316,78 W

10.3. Toplinski gubici vertikalne stijenke dnevnog tanka T46 s desne (starboard-SB) strane gledano od krme prema pramcu

- temperatura dizelskog goriva susjednog tanka t_{d1} : 15 °C
- temperatura dizelskog goriva unutar dnevnog tanka t_{d2} : 60 °C
- debljina stijenke od čelika δ_9 : 10 mm
- toplinska vodljivost čelika λ_ξ : 50 W/mK
- emisijski omjer zračenja ε : 0.8
- visina tanka H: 4,278
- površina A_3 : 24,3 m²

Koeficijent prijelaza topline s unutarnje strane (dizelsko gorivo – stijenka)

Pretpostavlja se temperature stijenke (t_s) 59 °C, a kasnije će se iterativnim postupkom dobiti točna vrijednost temperature stijenke.

1.iteracija:

$$t_m = \frac{t_d + t_s}{2} = \frac{60 + 59}{2} = 59,5 \text{ °C} \quad (10.41)$$

Prema formulama danim u prijašnjem poglavlju mogu se dobiti termodinamičke karakteristike dizelskog goriva:

- toplinska vodljivost, λ (59,5 °C): 0,135 W/mK
- gustoća dalje od stijenke, ρ_∞ (60 °C): 813,249 kg/m³
- gustoća stijenke, ρ (59,5 °C): 813,675 kg/m³
- dinamička viskoznost, η (59,5 °C): 0,00138 Pas
- Kinematička viskoznost, ν (59,5 °C): $1,695 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
- specifični toplinski kapacitet, c (59,5 °C): 2066,712 J/kgK

Prandtlov broj:

$$Pr = \frac{\eta \cdot c}{\lambda} = \frac{0,00138 \cdot 2066,712}{0,135} = 21,11 \quad (10.42)$$

Za daljnje računanje biti će potrebne slijedeće vrijednosti:

- koeficijent toplinske ekspanzije za kapljevine i pare, β

$$\beta = \left| \frac{\rho - \rho_{\infty}}{\rho} \right| \cdot \frac{1}{T_s - T_{\infty}} [K^{-1}] \quad (10.43)$$

- karakteristična duljina, l

$$l = H = 4,278 \text{ m} \quad (10.44)$$

Grashofov broj:

$$\begin{aligned} Gr &= \frac{g \cdot l^3 \cdot \beta \cdot (T_s - T_{\infty})}{\nu^2} = g \cdot l^3 \cdot \left| \frac{\rho - \rho_{\infty}}{\rho \cdot \nu^2} \right| \quad (10.45) \\ &= 9,81 \cdot 4,278^3 \cdot \left| \frac{813,675 - 813,249}{813,675 \cdot (1,695 \cdot 10^{-6})^2} \right| = 1,4 \cdot 10^{11} \end{aligned}$$

Rayleighov broj:

$$Ra = Gr \cdot Pr = 2,96 \cdot 10^{12} \quad (10.46)$$

Nusseltov broj za slobodnu konvekciju, vertikalnu ravnu ploču:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda} = \left\{ 0,825 + \frac{0,387 \cdot Ra^{\frac{1}{4}}}{\left[1 + \left(\frac{0,492}{Pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{8}{27}}} \right\}^2 = 2083,881 \quad (10.47)$$

Koeficijent prijelaza topline:

$$\alpha_1 = \frac{Nu \cdot \lambda}{l} = \frac{2083,881 \cdot 0,135}{4,278} = 65,78 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (10.48)$$

Koeficijent prijelaza topline s vanjske strane (stijenka – dizelsko gorivo)

Pretpostavlja se temperature stijenske (t_s) 16 °C, a kasnije će se iterativnim postupkom dobiti točna vrijednost temperature stijenske.

1.iteracija:

$$t_m = \frac{t_{d1} + t_s}{2} = \frac{15 + 16}{2} = 15,5 \text{ °C} \quad (10.49)$$

Prema formulama danim u prijašnjem poglavlju mogu se dobiti termodinamičke karakteristike dizelskog goriva:

- toplinska vodljivost, λ (15,5 °C): 0,138 W/mK
- gustoća dalje od stijenske, ρ_∞ (15 °C): 852,46 kg/m³
- gustoća stijenske, ρ (15,5 °C): 851,4 kg/m³
- dinamička viskoznost, η (15,5 °C): 0,00143 Pas
- Kinematički viskoznost, ν (15,5 °C): $1,68 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$
- specifični toplinski kapacitet, c_p (15,5 °C): 1903,3 J/kgK

Prandtlov broj:

$$Pr = \frac{\eta \cdot c}{\lambda} = \frac{0,00143 \cdot 1903,3}{0,138} = 19,65 \quad (10.50)$$

Za daljnje računanje biti će potrebne slijedeće vrijednosti:

- koeficijent toplinske idealne plinove, β

$$\beta = \left| \frac{\rho - \rho_\infty}{\rho} \right| \cdot \frac{1}{T_s - T_\infty} [K^{-1}] \quad (10.51)$$

- karakteristična duljina, l

$$l = H = 4,278 \text{ m} \quad (10.52)$$

Grashofov broj:

$$\begin{aligned} Gr &= \frac{g \cdot l^3 \cdot \beta \cdot (T_s - T_\infty)}{\nu^2} = g \cdot l^3 \cdot \left| \frac{\rho - \rho_\infty}{\rho \cdot \nu^2} \right| \\ &= 9,81 \cdot 4,278^3 \cdot \left| \frac{851,4 - 852,46}{851,4 \cdot (1,68 \cdot 10^{-5})^2} \right| = 3,4 \cdot 10^{12} \end{aligned} \quad (10.53)$$

Rayleighov broj:

$$Ra = Gr \cdot Pr = 6,68 \cdot 10^{12} \quad (10.54)$$

Nusseltov broj za slobodnu konvekciju, vertikalnu ravnu ploču:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda} = \left\{ 0,825 + \frac{0,387 \cdot Ra^{\frac{1}{6}}}{\left[1 + \left(\frac{0,492}{Pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{8}{27}}} \right\}^2 = 2714,8 \quad (10.55)$$

Koeficijent prijelaza topline:

$$\alpha_2 = \frac{Nu \cdot \lambda}{l} = 87,8 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (10.56)$$

Koeficijent prolaza topline vertikalne stijenske (SB) dnevnog tanka T57:

$$k_9 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_9}{\lambda_c} + \frac{1}{\alpha_2}} = 37,32 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (10.57)$$

Gustoća toplinskog toka vertikalne stijenke (SB) dnevnog tanka T57:

$$q_9 = k_9 \cdot (t_{d2} - t_{d1}) = 37,32 \cdot (60 - 15) = 1679,6 \text{ W/m}^2 \quad (10.58)$$

Izmijenjeni toplinski tok vertikalne stijenke (SB) dnevnog tanka T57:

$$Q_9 = q_9 \cdot A_9 = 1679,6 \cdot 24,3 = 40813,95 \text{ W} \quad (10.59)$$

Temperature stijenke za ostale iteracije mogu se izračunati preko izraza:

$$t_s = t_{fluida} - \frac{q}{\alpha} \quad (10.60)$$

Nakon 18 iteracija rezultati su konvergirali i dobivene su sljedeće vrijednosti:

- temperatura stijenke s unutarnje strane, t_{su} : 35,92 °C
- koeficijent prijelaza topline s unutarnje strane, α_1 : 180,77 W/m²K
- temperatura stijenke s vanjske strane tanka, t_{sv} : 35,05 °C
- koeficijent prijelaza topline s vanjske strane, α_2 : 217,18 W/m²K
- koeficijent prolaza topline vertikalne stijenke (SB) dnevnog tanka T46, k_9 : 96,75 W/m²K
- gustoća toplinskog toka vertikalne stijenke (SB) dnevnog tanka T46, q_9 : 4353,53 W/m²
- Izmijenjeni toplinski tok vertikalne stijenke (SB) dnevnog tanka T46, Q_9 : 105790,7 W

10.4. Toplinski gubici vertikalne stijenke dnevnog tanka T57 s lijeve (portside - PS) strane gledano od krme prema pramcu

- temperatura dizelskog goriva susjednog tanka t_{d1} : 15 °C
- temperatura dizelskog goriva unutar dnevnog tanka t_{d2} : 60 °C
- debljina stijenke od čelika δ_{10} : 10 mm
- toplinska vodljivost čelika λ_c : 50 W/mK
- emisijski omjer zračenja ϵ : 0.8
- visina tanka H: 4,54 m
- površina A_{10} : 25,72 m²

Koeficijent prijelaza topline s unutarnje strane (dizelsko gorivo – stijenka)

Pretpostavlja se temperature stijenke (t_s) 59 °C, a kasnije će se iterativnim postupkom dobiti točna vrijednost temperature stijenke.

1.iteracija:

$$t_m = \frac{t_d + t_s}{2} = \frac{60 + 59}{2} = 59,5 \text{ °C} \quad (10.61)$$

Prema formulama danim u prijašnjem poglavlju mogu se dobiti termodinamičke karakteristike dizelskog goriva:

- toplinska vodljivost, λ (59,5 °C): 0,135 W/mK
- gustoća dalje od stijenke, ρ_∞ (60 °C): 813,249 kg/m³
- gustoća stijenke, ρ (59,5 °C): 813,675 kg/m³
- dinamička viskoznost, η (59,5 °C): 0,00138 Pas
- Kinematička viskoznost, ν (59,5 °C): $1,695 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
- specifični toplinski kapacitet, c (59,5 °C): 2066,712 J/kgK

Prandtlov broj:

$$Pr = \frac{\eta \cdot c}{\lambda} = \frac{0,00138 \cdot 2066,712}{0,135} = 21,11 \quad (10.62)$$

Za daljnje računanje biti će potrebne slijedeće vrijednosti:

- koeficijent toplinske ekspanzije za kapljevine i pare, β

$$\beta = \left| \frac{\rho - \rho_\infty}{\rho} \right| \cdot \frac{1}{T_s - T_\infty} [K^{-1}] \quad (10.63)$$

- karakteristična duljina, l

$$l = H = 4,54 \text{ m} \quad (10.64)$$

Grashofov broj:

$$\begin{aligned} Gr &= \frac{g \cdot l^3 \cdot \beta \cdot (T_s - T_\infty)}{\nu^2} = g \cdot l^3 \cdot \left| \frac{\rho - \rho_\infty}{\rho \cdot \nu^2} \right| & (10.65) \\ &= 9,81 \cdot 4,54^3 \cdot \left| \frac{813,675 - 813,249}{813,675 \cdot (1,695 \cdot 10^{-6})^2} \right| = 1,68 \cdot 10^{11} \end{aligned}$$

Rayleighov broj:

$$Ra = Gr \cdot Pr = 3,54 \cdot 10^{12} \quad (10.66)$$

Nusseltov broj za slobodnu konvekciju, vertikalnu ravnu ploču:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda} = \left\{ 0,825 + \frac{0,387 \cdot Ra^{\frac{1}{4}}}{\left[1 + \left(\frac{0,492}{Pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{8}{27}}} \right\}^2 = 2210,36 \quad (10.67)$$

Koeficijent prijelaza topline:

$$\alpha_1 = \frac{Nu \cdot \lambda}{l} = \frac{2210,36 \cdot 0,135}{4,54} = 65,71 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (10.68)$$

Koeficijent prijelaza topline s vanjske strane (stijenka – dizelsko gorivo)

Pretpostavlja se temperature stijenske (t_s) 16 °C, a kasnije će se iterativnim postupkom dobiti točna vrijednost temperature stijenske.

1.iteracija:

$$t_m = \frac{t_{d1} + t_s}{2} = \frac{15 + 16}{2} = 15,5 \text{ °C} \quad (10.69)$$

Prema formulama danim u prijašnjem poglavlju mogu se dobiti termodinamičke karakteristike dizelskog goriva:

- toplinska vodljivost, λ (15,5 °C): 0,138 W/mK
- gustoća dalje od stijenke, ρ_∞ (15 °C): 852,46 kg/m³
- gustoća stijenke, ρ (15,5 °C): 851,4 kg/m³
- dinamička viskoznost, η (15,5 °C): 0,00143 Pas
- Kinematička viskoznost, ν (15,5 °C): $1,68 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$
- specifični toplinski kapacitet, c_p (15,5 °C): 1903,3 J/kgK

Prandtlov broj:

$$Pr = \frac{\eta \cdot c}{\lambda} = \frac{0,00143 \cdot 1903,3}{0,138} = 19,65 \quad (10.70)$$

Za daljnje računanje biti će potrebne slijedeće vrijednosti:

- koeficijent toplinske idealne plinove, β

$$\beta = \left| \frac{\rho - \rho_\infty}{\rho} \right| \cdot \frac{1}{T_s - T_\infty} [K^{-1}] \quad (10.71)$$

- karakteristična duljina, l

$$l = H = 4,54 \text{ m} \quad (10.72)$$

Grashofov broj:

$$\begin{aligned} Gr &= \frac{g \cdot l^3 \cdot \beta \cdot (T_s - T_\infty)}{\nu^2} = g \cdot l^3 \cdot \left| \frac{\rho - \rho_\infty}{\rho \cdot \nu^2} \right| \quad (10.73) \\ &= 9,81 \cdot 4,54^3 \cdot \left| \frac{851,4 - 852,46}{851,4 \cdot (1,68 \cdot 10^{-5})^2} \right| = 4,07 \cdot 10^{11} \end{aligned}$$

Rayleighov broj:

$$Ra = Gr \cdot Pr = 8 \cdot 10^{12} \quad (10.74)$$

Nusseltov broj za slobodnu konvekciju, vertikalnu ravnu ploču:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda} = \left\{ 0,825 + \frac{0,387 \cdot Ra^{\frac{1}{4}}}{\left[1 + \left(\frac{0,492}{Pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{8}{27}}} \right\}^2 = 2879,951 \quad (10.75)$$

Koeficijent prijelaza topline:

$$\alpha_2 = \frac{Nu \cdot \lambda}{l} = 87,72 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (10.76)$$

Koeficijent prolaza topline vertikalne stijenke (PS) dnevnog tanka T57:

$$k_{10} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_{10}}{\lambda_{\check{c}}} + \frac{1}{\alpha_2}} = 37,29 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (10.77)$$

Gustoća toplinskog toka vertikalne stijenke (PS) dnevnog tanka T57:

$$q_{10} = k_{10} \cdot (t_{d2} - t_{d1}) = 37,29 \cdot (60 - 15) = 1677,9 \text{ W/m}^2 \quad (10.78)$$

Izmijenjeni toplinski tok vertikalne stijenke (PS) dnevnog tanka T57:

$$Q_{10} = q_{10} \cdot A_{10} = 1677,9 \cdot 25,72 = 43155,61 \text{ W} \quad (10.79)$$

Temperature stijenke za ostale iteracije mogu se izračunati preko izraza:

$$t_s = t_{fluida} - \frac{q}{\alpha} \quad (10.80)$$

Nakon 18 iteracija rezultati su konvergirali i dobivene su slijedeće vrijednosti:

- temperatura stijenke s unutarnje strane, t_{su} : 35,91 °C
- koeficijent prijelaza topline s unutarnje strane, α_1 : 180,65 W/m²K
- temperatura stijenke s vanjske strane tanka, t_{sv} : 35,05 °C
- koeficijent prijelaza topline s vanjske strane, α_2 : 217,05 W/m²K
- koeficijent prolaza topline vertikalne stijenke (PS) dnevnog tanka T57, k_{10} : 96,69 W/m²K
- gustoća toplinskog toka vertikalne stijenke (PS) dnevnog tanka T57, q_{10} : 4350,9 W/m²
- Izmijenjeni toplinski tok vertikalne stijenke (PS) dnevnog tanka T57, Q_{10} : 111904,7 W

10.5. Toplinski gubici vertikalne stijenke dnevnog tanka T57 s prednje strane (pramca)

- temperatura zraka oko tanka t_z : 15 °C
- temperatura dizelskog goriva unutar dnevnog tanka t_d : 60 °C
- debljina stijenke od čelika δ_{11} : 9 mm
- toplinska vodljivost čelika λ_{ϵ} : 50 W/mK
- emisijski omjer zračenja ϵ : 0.8
- visina tanka H: 4,655 m
- površina A_{11} : 22,344 m²

Koeficijent prijelaza topline s unutarnje strane (dizelsko gorivo – stijenka)

Pretpostavlja se temperature stijenke (t_s) 59 °C, a kasnije će se iterativnim postupkom dobiti točna vrijednost temperature stijenke.

1.iteracija:

$$t_m = \frac{t_d + t_s}{2} = \frac{60 + 59}{2} = 59,5 \text{ °C} \quad (10.81)$$

Prema formulama danim u prijašnjem poglavlju mogu se dobiti termodinamičke karakteristike dizelskog goriva:

- toplinska vodljivost, λ (59,5 °C): 0,135 W/mK
- gustoća dalje od stijenke, ρ_∞ (60 °C): 813,249 kg/m³
- gustoća stijenke, ρ (59,5 °C): 813,675 kg/m³
- dinamička viskoznost, η (59,5 °C): 0,00138 Pas
- Kinematička viskoznost, ν (59,5 °C): $1,695 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
- specifični toplinski kapacitet, c (59,5 °C): 2066,712 J/kgK

Prandtlov broj:

$$Pr = \frac{\eta \cdot c}{\lambda} = \frac{0,00138 \cdot 2066,712}{0,135} = 21,11 \quad (10.82)$$

Za daljnje računanje biti će potrebne slijedeće vrijednosti:

- koeficijent toplinske ekspanzije za kapljevine i pare, β

$$\beta = \left| \frac{\rho - \rho_\infty}{\rho} \right| \cdot \frac{1}{T_s - T_\infty} [K^{-1}] \quad (10.83)$$

- karakteristična duljina, l

$$l = H = 4,655 \text{ m} \quad (10.84)$$

Grashofov broj:

$$\begin{aligned} Gr &= \frac{g \cdot l^3 \cdot \beta \cdot (T_s - T_\infty)}{\nu^2} = g \cdot l^3 \cdot \left| \frac{\rho - \rho_\infty}{\rho \cdot \nu^2} \right| \quad (10.85) \\ &= 9,81 \cdot 4,655^3 \cdot \left| \frac{813,675 - 813,249}{813,675 \cdot (1,695 \cdot 10^{-6})^2} \right| = 1,8 \cdot 10^{11} \end{aligned}$$

Rayleighov broj:

$$Ra = Gr \cdot Pr = 3,81 \cdot 10^{12} \quad (10.86)$$

Nusseltov broj za slobodnu konvekciju, vertikalnu ravnu ploču:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda} = \left\{ 0,825 + \frac{0,387 \cdot Ra^{\frac{1}{4}}}{\left[1 + \left(\frac{0,492}{Pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{8}{27}}} \right\}^2 = 2264,136 \quad (10.87)$$

Koeficijent prijelaza topline:

$$\alpha_1 = \frac{Nu \cdot \lambda}{l} = \frac{2264,136 \cdot 0,135}{4,655} = 65,68 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (10.88)$$

Koeficijent prijelaza topline s vanjske strane (zrak – stijenka)

Pretpostavlja se temperature stijenke (t_s) 16 °C, a kasnije će se iterativnim postupkom dobiti točna vrijednost temperature stijenke.

1.iteracija:

$$t_m = \frac{t_z + t_s}{2} = \frac{15 + 16}{2} = 15,5 \text{ °C} \quad (10.89)$$

Termodinamičke karakteristike zraka:

- toplinska vodljivost, λ (15,5 °C): 0,026 W/mK
- gustoća dalje od stijenke, ρ_∞ (15 °C): 1,226 kg/m³
- gustoća stijenke, ρ (15,5 °C): 1,223 kg/m³
- dinamička viskoznost, η (15,5 °C): $1,799 \cdot 10^{-5}$ Pas
- Kinematička viskoznost, ν (15,5 °C): $1,47 \cdot 10^{-5}$ m²/s
- specifični toplinski kapacitet, c_p (15,5 °C): 1006,013 J/kgK

Prandtlov broj:

$$Pr = \frac{\eta \cdot c}{\lambda} = \frac{1,799 \cdot 10^{-5} \cdot 1006,013}{0,026} = 0,71 \quad (10.90)$$

Za daljnje računanje biti će potrebne slijedeće vrijednosti:

- koeficijent toplinske idealne plinove, β

$$\beta = \frac{1}{T_m} [K^{-1}] \quad (10.91)$$

- karakteristična duljina, l

$$l = H = 4,655 \text{ m} \quad (10.92)$$

Grashofov broj:

$$Gr = \frac{g \cdot l^3 \cdot \beta \cdot |T_s - T_\infty|}{\nu^2} = \frac{g \cdot l^3 \cdot |16 - 15|}{(15,5 + 273,15) \cdot (1,47 \cdot 10^{-5})^2} = 15860970490 \quad (10.93)$$

Rayleighov broj:

$$Ra = Gr \cdot Pr = 1,12 \cdot 10^{10} \quad (10.94)$$

Nusseltov broj za slobodnu konvekciju, vertikalnu ravnu ploču:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda} = \left\{ 0,825 + \frac{0,387 \cdot Ra^{\frac{1}{6}}}{\left[1 + \left(\frac{0,492}{Pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{8}{27}}} \right\}^2 = 261,7 \quad (10.95)$$

Koeficijentu prijelaza topline s vanjske strane stijenke potrebno je dodati koeficijent prijelaza topline zračenjem:

$$\alpha_2 = \frac{Nu \cdot \lambda}{l} + \varepsilon \cdot (5,67 \cdot 10^{-8}) \cdot \frac{|T_s|^4 - |T_z|^4}{|T_s - T_z|} = 5,8 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (10.96)$$

Koeficijent prolaza topline vertikalne stijenke (pramac) dnevnog tanka T57:

$$k_{11} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_{11}}{\lambda_c} + \frac{1}{\alpha_2}} = 5,32 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (10.97)$$

Gustoća toplinskog toka vertikalne stijenke (pramac) dnevnog tanka T57:

$$q_{11} = k_{11} \cdot (t_d - t_z) = 5,32 \cdot (60 - 15) = 239,56 \text{ W/m}^2 \quad (10.98)$$

Izmijenjeni toplinski tok vertikalne stijenke (pramac) dnevnog tanka T57:

$$Q_{11} = q_{11} \cdot A_{11} = 239,56 \cdot 22,344 = 5352,8 \text{ W} \quad (10.99)$$

Temperature stijenke za ostale iteracije mogu se izračunati preko izraza:

$$t_s = t_{fluida} - \frac{q}{\alpha} \quad (10.100)$$

Nakon 17 iteracija rezultati su konvergirali i dobivene su slijedeće vrijednosti:

- temperatura stijenke s unutarnje strane, t_{su} : 56,1 °C
- koeficijent prijelaza topline s unutarnje strane, α_1 : 102,94 W/m²K
- temperatura stijenke s vanjske strane tanka, t_{sv} : 55,99 °C
- koeficijent prijelaza topline s vanjske strane, α_2 : 9,87 W/m²K
- koeficijent prolaza topline vertikalne stijenke (pramac) dnevnog tanka T57, k_{11} : 9 W/m²K
- gustoća toplinskog vertikalne stijenke (pramac) dnevnog tanka T57, q_{11} : 404,8 W/m²
- Izmijenjeni toplinski vertikalne stijenke (pramac) dnevnog tanka 57, Q_{11} : 9044,86 W

10.6. Toplinski gubici vertikalne stijenske dnevnog tanka T57 sa stražnje strane (krma)

- temperatura dizelskog goriva susjednog tanka t_{d1} : 15 °C
- temperatura dizelskog goriva unutar dnevnog tanka t_{d2} : 60 °C
- debljina stijenske od čelika δ_{12} : 9 mm
- toplinska vodljivost čelika $\lambda_{\text{č}}$: 50 W/mK
- emisijski omjer zračenja ε : 0.8
- visina tanka H: 4,18 m
- površina A_{12} : 20,06 m²

Koeficijent prijelaza topline s unutarnje strane (dizelsko gorivo – stijenka)

Pretpostavlja se temperature stijenske (t_s) 59 °C, a kasnije će se iterativnim postupkom dobiti točna vrijednost temperature stijenske.

1.iteracija:

$$t_m = \frac{t_d + t_s}{2} = \frac{60 + 59}{2} = 59,5 \text{ °C} \quad (10.101)$$

Prema formulama danim u prijašnjem poglavlju mogu se dobiti termodinamičke karakteristike dizelskog goriva:

- toplinska vodljivost, λ (59,5 °C): 0,135 W/mK
- gustoća dalje od stijenske, ρ_{∞} (60 °C): 813,249 kg/m³
- gustoća stijenske, ρ (59,5 °C): 813,675 kg/m³
- dinamička viskoznost, η (59,5 °C): 0,00138 Pas
- Kinematička viskoznost, ν (59,5 °C): $1,695 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
- specifični toplinski kapacitet, c (59,5 °C): 2066,712 J/kgK

Prandtllov broj:

$$Pr = \frac{\eta \cdot c}{\lambda} = \frac{0,00138 \cdot 2066,712}{0,135} = 21,11 \quad (10.102)$$

Za daljnje računanje biti će potrebne slijedeće vrijednosti:

- koeficijent toplinske ekspanzije za kapljevine i pare, β

$$\beta = \left| \frac{\rho - \rho_{\infty}}{\rho} \right| \cdot \frac{1}{T_s - T_{\infty}} [K^{-1}] \quad (10.103)$$

- karakteristična duljina, l

$$l = H = 4,18 \text{ m} \quad (10.104)$$

Grashofov broj:

$$\begin{aligned} Gr &= \frac{g \cdot l^3 \cdot \beta \cdot (T_s - T_{\infty})}{\nu^2} = g \cdot l^3 \cdot \left| \frac{\rho - \rho_{\infty}}{\rho \cdot \nu^2} \right| \quad (10.105) \\ &= 9,81 \cdot 4,18^3 \cdot \left| \frac{813,675 - 813,249}{813,675 \cdot (1,695 \cdot 10^{-6})^2} \right| = 1,31 \cdot 10^{11} \end{aligned}$$

Rayleighov broj:

$$Ra = Gr \cdot Pr = 2,76 \cdot 10^{12} \quad (10.106)$$

Nusseltov broj za slobodnu konvekciju, vertikalnu ravnu ploču:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda} = \left\{ 0,825 + \frac{0,387 \cdot Ra^{\frac{1}{4}}}{\left[1 + \left(\frac{0,492}{Pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{8}{27}}} \right\}^2 = 2036,523 \quad (10.107)$$

Koeficijent prijelaza topline:

$$\alpha_1 = \frac{Nu \cdot \lambda}{l} = \frac{2036,523 \cdot 0,135}{4,18} = 65,81 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (10.108)$$

Koeficijent prijelaza topline s vanjske strane (stijenka – dizelsko gorivo)

Pretpostavlja se temperature stijenske (t_s) 16 °C, a kasnije će se iterativnim postupkom dobiti točna vrijednost temperature stijenske.

1.iteracija:

$$t_m = \frac{t_{d1} + t_s}{2} = \frac{15 + 16}{2} = 15,5 \text{ °C} \quad (10.109)$$

Prema formulama danim u prijašnjem poglavlju mogu se dobiti termodinamičke karakteristike dizelskog goriva:

- toplinska vodljivost, λ (15,5 °C): 0,138 W/mK
- gustoća dalje od stijenske, ρ_∞ (15 °C): 852,46 kg/m³
- gustoća stijenske, ρ (15,5 °C): 851,4 kg/m³
- dinamička viskoznost, η (15,5 °C): 0,00143 Pas
- Kinematička viskoznost, ν (15,5 °C): $1,68 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$
- specifični toplinski kapacitet, c_p (15,5 °C): 1903,3 J/kgK

Prandtllov broj:

$$Pr = \frac{\eta \cdot c}{\lambda} = \frac{0,00143 \cdot 1903,3}{0,138} = 19,65 \quad (10.110)$$

Za daljnje računanje biti će potrebne slijedeće vrijednosti:

- koeficijent toplinske ekspanzije za kapljevine i pare, β

$$\beta = \left| \frac{\rho - \rho_\infty}{\rho} \right| \cdot \frac{1}{T_s - T_\infty} [K^{-1}] \quad (10.111)$$

- karakteristična duljina, l

$$l = H = 4,18 \text{ m} \quad (10.112)$$

Grashofov broj:

$$\begin{aligned} Gr &= \frac{g \cdot l^3 \cdot \beta \cdot (T_s - T_\infty)}{\nu^2} = g \cdot l^3 \cdot \left| \frac{\rho - \rho_\infty}{\rho \cdot \nu^2} \right| \\ &= 9,81 \cdot 4,18^3 \cdot \left| \frac{851,4 - 852,46}{851,4 \cdot (1,68 \cdot 10^{-5})^2} \right| = 3,17 \cdot 10^{11} \end{aligned} \quad (10.113)$$

Rayleighov broj:

$$Ra = Gr \cdot Pr = 6,23 \cdot 10^{12} \quad (10.114)$$

Nusseltov broj za slobodnu konvekciju, vertikalnu ravnu ploču:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda} = \left\{ 0,825 + \frac{0,387 \cdot Ra^{\frac{1}{4}}}{\left[1 + \left(\frac{0,492}{Pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{8}{27}}} \right\}^2 = 2652,962 \quad (10.115)$$

Koeficijent prijelaza topline:

$$\alpha_2 = \frac{Nu \cdot \lambda}{l} = 87,83 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (10.116)$$

Koeficijent prolaza topline vertikalne stijenke (krma) dnevnog tanka T57:

$$k_{12} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_{12}}{\lambda_\xi} + \frac{1}{\alpha_2}} = 37,37 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (10.117)$$

Gustoća toplinskog toka vertikalne stijenke (krma) dnevnog tanka T57:

$$q_{12} = k_{12} \cdot (t_{d2} - t_{d1}) = 37,37 \cdot (60 - 15) = 1681,51 \text{ W/m}^2 \quad (10.118)$$

Izmijenjeni toplinski tok vertikalne stijenke (krma) dnevnog tanka T57:

$$Q_{12} = q_{12} \cdot A_{12} = 1681,51 \cdot 20,06 = 33731,17 \text{ W} \quad (10.119)$$

Temperature stijenke za ostale iteracije mogu se izračunati preko izraza:

$$t_s = t_{fluida} - \frac{q}{\alpha} \quad (10.120)$$

Nakon 16 iteracija rezultati su konvergirali i dobivene su sljedeće vrijednosti:

- temperatura stijenke s unutarnje strane, t_{su} : 35,87 °C
- koeficijent prijelaza topline s unutarnje strane, α_1 : 180,9 W/m²K
- temperatura stijenke s vanjske strane tanka, t_{sv} : 35,09 °C
- koeficijent prijelaza topline s vanjske strane, α_2 : 217,33 W/m²K
- koeficijent prolaza topline vertikalne stijenke (krma) dnevnog tanka T57, k_{12} : 97 W/m²K
- gustoća toplinskog toka vertikalne stijenke (krma) dnevnog tanka T57, q_{12} : 4365,05 W/m²
- Izmijenjeni toplinski tok vertikalne stijenke (krma) dnevnog tanka T57, Q_{12} : 87562,93 W

11. PRORAČUN TOPLINSKOG TOKA IZMEĐU PARE I GORIVA U DNEVNOM TANKU

Dizelsko gorivo se zagrijava parom tlaka 9 bara i ulazne temperature 175,36 °C koja struji kroz grijaće cijevi nominalnog promjera DN40. Potrebno je izračunati prolaz topline, odnosno toplinski tok pare (kao medija za grijanje) na gorivo u dnevnom tanku. To je osnova za određivanje potrebne duljine grijaćih cijevi u dnevnom tanku dizelskog goriva.

Podaci koji su potrebni za proračun:

- unutarnji promjer cijevi d_u : 40,94 mm
- vanjski promjer cijevi d_v : 48,3 mm
- tlak pare p : 9 bara
- toplinska vodljivost: 50 W/m²K
- ulazna temperatura pare za tlak 9 bara t_{pu} : 175,36 °C

Koeficijent prijelaza topline na unutarnjoj strani cijevi (filmska kondenzacija):

Pretpostavlja se temperature stijenske (t_s) 170,36 °C, a kasnije će se iterativnim postupkom dobiti točna vrijednost temperature stijenske.

1.iteracija:

$$t_m = \frac{t_d + t_s}{2} = \frac{175,36 + 170,36}{2} = 172,86 \text{ °C} \quad (11.1)$$

Termodinamičke karakteristike:

- toplinska vodljivost kondenzata, λ (172,86 °C): 0,67 W/mK
- gustoća pare, ρ_p (175,36 °C): 4,65 kg/m³
- gustoća kondenzata, ρ (172,36 °C): 894,52 kg/m³
- dinamička viskoznost kondenzata, η (172,36 °C): 0,00016 Pas
- specifični toplinski kapacitet, c (172,36 °C): 4379,32 J/kgK
- Latentna toplota, r : 2030,31 J/kg

$$\alpha_1 = 0,555 \left[\frac{g \cdot \rho \cdot (\rho - \rho_p) \cdot \lambda^3}{\eta \cdot |t_{pu} - t_s| \cdot d_u} \cdot \left(r + \frac{3}{8} \cdot c \cdot |t_{pu} - t_s| \right) \right]^{\frac{1}{4}} = 10957,83 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (11.2)$$

Koeficijent prijelaza topline na vanjskoj strani cijevi (dizelsko gorivo – stijenka)

Pretpostavlja se temperature stijenke (t_s) 170 °C, a kasnije će se iterativnim postupkom dobiti točna vrijednost temperature stijenke.

1.iteracija:

$$t_m = \frac{t_d + t_s}{2} = \frac{60 + 170}{2} = 115 \text{ °C} \quad (11.3)$$

Prema formulama danim u prijašnjem poglavlju mogu se dobiti termodinamičke karakteristike dizelskog goriva:

- toplinska vodljivost, λ (115 °C): 0,131 W/mK
- gustoća dalje od stijenke, ρ_∞ (60 °C): 813,249 kg/m³
- gustoća blizu stijenke, ρ (115 °C): 424,02 kg/m³
- dinamička viskoznost, η (115 °C): 0,00144 Pas
- Kinematička viskoznost, ν (115 °C): $3,4 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
- specifični toplinski kapacitet, c_p (115 °C): 2272,84 J/kgK

Prandtlov broj:

$$Pr = \frac{\eta \cdot c}{\lambda} = \frac{0,00144 \cdot 2272,84}{0,131} = 25,03 \quad (11.4)$$

Za daljnje računanje biti će potrebne slijedeće vrijednosti:

- koeficijent toplinske ekspanzije za kapljevine i pare, β

$$\beta = \left| \frac{\rho - \rho_{\infty}}{\rho} \right| \cdot \frac{1}{T_s - T_{\infty}} [K^{-1}] \quad (11.5)$$

- karakteristična duljina, l

$$l = D = 0,0483 \text{ m} \quad (11.6)$$

Grashofov broj:

$$\begin{aligned} Gr &= \frac{g \cdot l^3 \cdot \beta \cdot (T_s - T_{\infty})}{\nu^2} = g \cdot l^3 \cdot \left| \frac{\rho - \rho_{\infty}}{\rho \cdot \nu^2} \right| \quad (11.7) \\ &= 9,81 \cdot 0,0483^3 \cdot \left| \frac{424,02 - 813,249}{424,02 \cdot (1,68 \cdot 10^{-5})^2} \right| = 87871241,7 \end{aligned}$$

Rayleighov broj:

$$Ra = Gr \cdot Pr = 2199127435 \quad (11.8)$$

Nusseltov broj za slobodnu konvekciju, horizontalni valjak (cijev):

$$Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda} = \left\{ 0,6 + \frac{0,387 \cdot Ra^{\frac{1}{6}}}{\left[1 + \left(\frac{0,559}{Pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{8}{27}}} \right\}^2 = 198,88 \quad (11.9)$$

Koeficijent prijelaza topline:

$$\alpha_2 = \frac{Nu \cdot \lambda}{l} = 538,82 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (11.10)$$

Za koeficijent prolaza topline vrijedi:

$$\alpha_2 < \alpha_1 \quad \blacktriangleright \quad r = r_2$$

Koeficijent prolaza topline cijevi:

$$k_c = \frac{1}{\frac{r_2}{r_1 \cdot \alpha_1} + \frac{r_2}{\lambda} \cdot \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) + \frac{1}{\alpha_2}} = 489,37 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (11.11)$$

Gustoća toplinskog toka cijevi po dužnom metru:

$$\begin{aligned} Q_c &= k_c \cdot d_v \cdot \pi \cdot (t_{pu} - t_d) = 489,37 \cdot 0,0483 \cdot \pi \cdot (175,36 - 60) \\ &= 8566,14 \text{ W/m} \end{aligned} \quad (11.12)$$

Temperature stijenke za ostale iteracije mogu se izračunati preko izraza:

$$t_s = t_{fluida} - \frac{Q}{\alpha \cdot d \cdot \pi} \quad (11.13)$$

Nakon 14 iteracija rezultati su konvergirali i dobivene su slijedeće vrijednosti:

- temperatura stijenke s unutarnje strane, t_{su} : 169,11 °C
- koeficijent prijelaza topline s unutarnje strane, α_1 : 10364,22 W/m²K
- temperatura stijenke s vanjske strane tanka, t_{sv} : 164,73 °C
- koeficijent prijelaza topline s vanjske strane, α_2 : 523,92 W/m²K
- koeficijent prolaza topline cijevi, k_c : 475,65 W/m²K
- gustoća toplinskog toka (po dužnom metru), Q : 8325,972 W/m²

12. PRORAČUN POTREBNE DULJINE GRIJAĆIH CIJEVI

Kako bi bilo moguće ugrijati dnevne tankove dizelskog goriva, parom je potrebno dovesti više topline nego što se gubi preko stijenki tankova.

DNEVNI TANK T46:

Ukupni gubitak topline dnevnog tanka je jednak zbroju gubitaka svih stijenki tanka.

$$Q_{ukupno} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6 = 317739,7 \text{ W} \quad (12.1)$$

Vrijeme zagrijavanja:

$$t_{zagrijavanja} = \frac{V \cdot \rho \cdot c \cdot (t_{završna} - t_{početna})}{Q_{zagrijavanja}} \text{ [s]} \quad (12.2)$$

U programu Microsoft Excel se preko funkcije "Goal and seek" dobilo da se toplina pare treba uvećati 1,32 puta kako bi se pokrili toplinski gubici dnevnih tankova i kako bi se dnevni tank ugrijao od 15 °C do 60 °C u 12h.

$$Q_{pare} = 1,32 \cdot Q_{ukupno} = 419853,3 \text{ W} \quad (12.3)$$

Duljina cijevi:

$$L_{T46} = \frac{Q_{pare}}{d_v \cdot \pi \cdot (t_{pu} - t_d) \cdot k} = \frac{419853,3}{0,0483\pi \cdot (175,36 - 60) \cdot 475,65} = 50,21 \text{ m} \quad (12.4)$$

DNEVNI TANK T57:

Ukupni gubitak topline dnevnog tanka je jednak zbroju gubitaka svake stranice tanka.

$$Q_{ukupno} = Q_7 + Q_8 + Q_9 + Q_{10} + Q_{11} + Q_{12} = 404148,9 \text{ W} \quad (12.5)$$

Vrijeme zagrijavanja:

$$t_{zagrijavanja} = \frac{V \cdot \rho \cdot c \cdot (t_{završna} - t_{početna})}{Q_{zagrijavanja}} \text{ [s]} \quad (12.6)$$

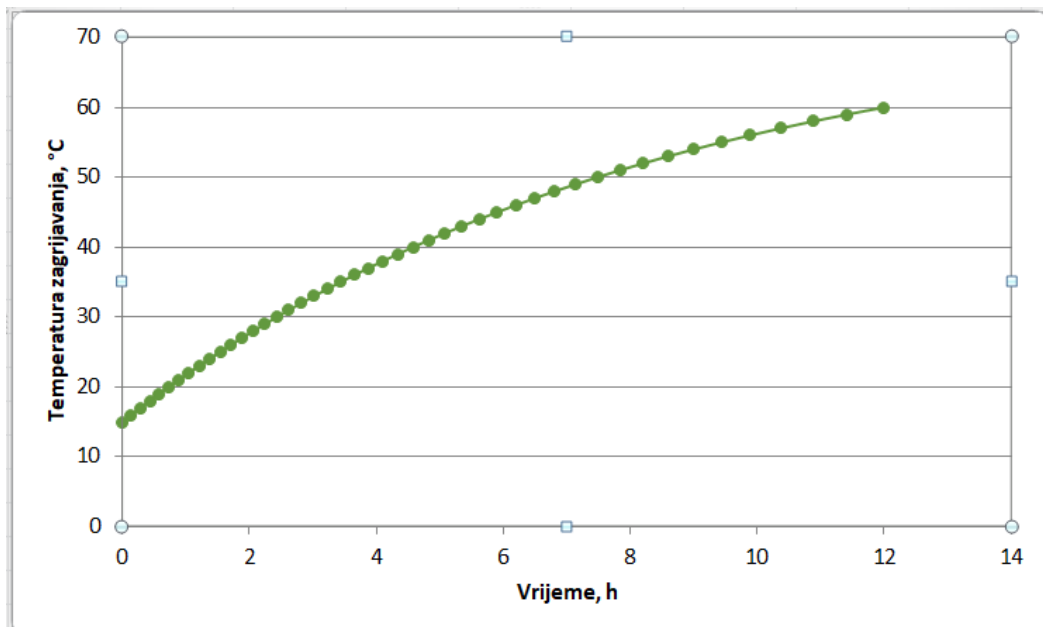
U programu Microsoft Excel se preko funkcije “Goal and seek” dobilo da se toplina pare treba uvećati 1,2 puta kako bi se pokrili toplinski gubici dnevnih tankova i kako bi se dnevni tank ugrijao od 15 °C do 60 °C u 12h.

$$Q_{pare} = 1,2 \cdot Q_{ukupno} = 485515,6 \text{ W} \quad (12.7)$$

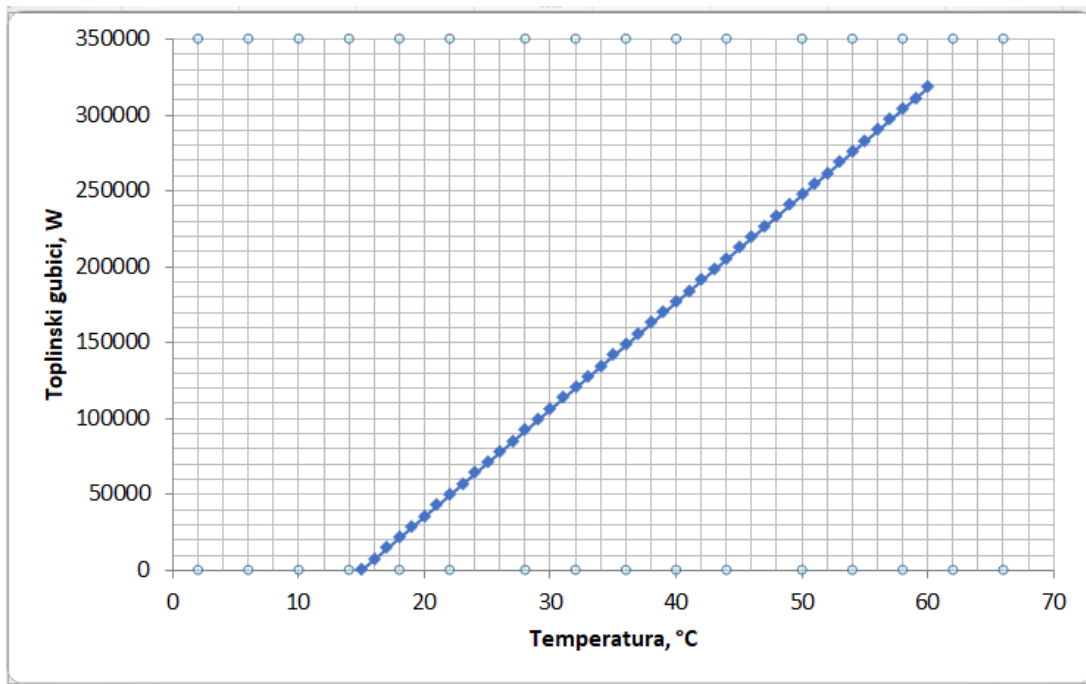
Duljina cijevi:

$$L_{T46} = \frac{Q_{pare}}{d_v \cdot \pi \cdot (t_{pu} - t_d) \cdot k} = \frac{485515,6}{0,0483\pi \cdot (175,36 - 60) \cdot 475,65} = 58,31 \text{ m} \quad (12.8)$$

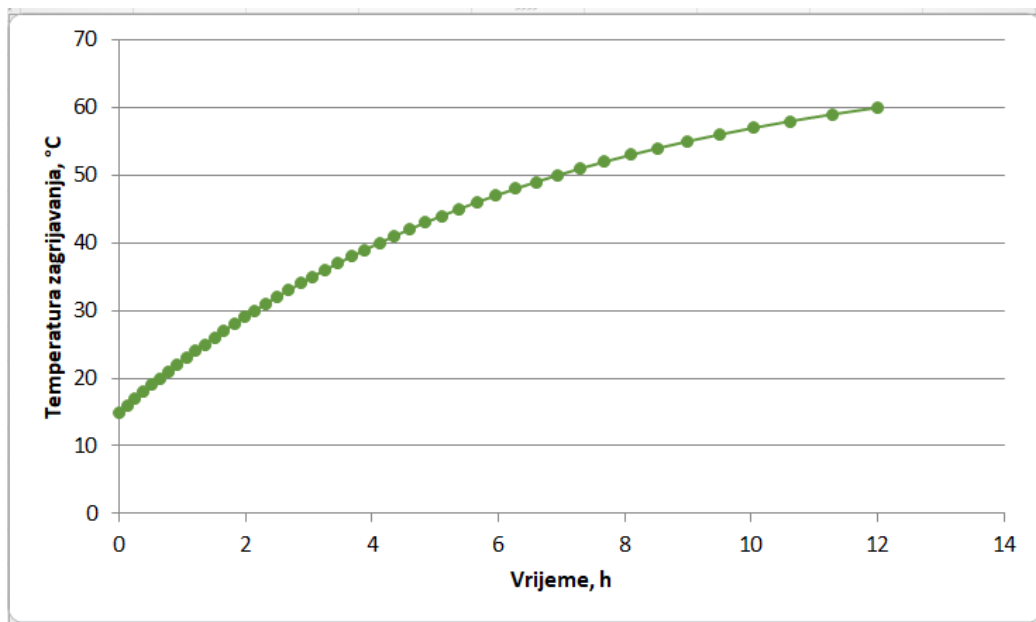
U sljedećim grafovima može se primjetiti kako toplinski gubici rastu s povećanjem temperatura dizelskog goriva u dnevnim tankovima, te da se sporije griju pri većim temperaturama.



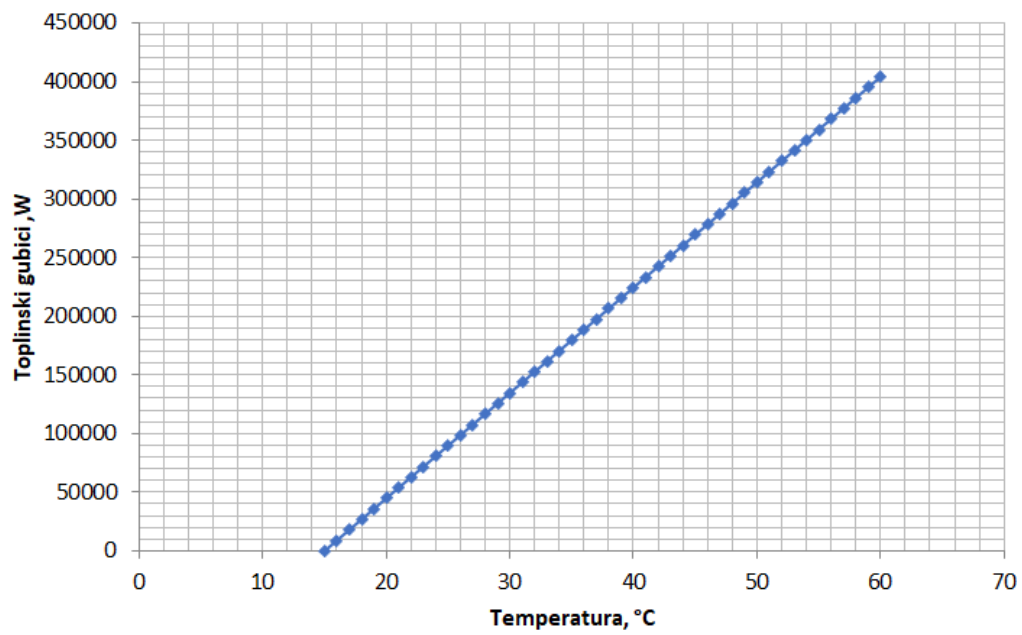
Slika 12.1 Promjena temperature dnevnog tanka dizelskog goriva T46



Slika 12.2 Toplinski gubici dnevnog tanka dizelskog goriva T46 u ovisnosti o njegovoj temperaturi



Slika 12.3 Promjena temperature dnevnog tanka dizelskog goriva T57



Slika 12.4 Toplinski gubici dnevnog tanka dizelskog goriva T57 u ovisnosti o njegovoj temperaturi

13. ZAKLJUČAK

Prema zadatku koji je zadan, izrađen je proračun grijanja dnevnih tankova, te je na temelju tog proračuna dobivena potrebna duljina cijevi kroz koje struji para. Dobivena duljina cijevi biti će dostatna kako bi se dizelsko gorivo u dnevnim tankovima moglo zagrijati od 15 °C do 60 °C u vremenu od 12 sati i kako bi se moglo dobavljati motoru uz minimalne napore dobavnih pumpi. Proračun se radio za najnepovoljniji slučaj, tj. računali su se toplinski gubici kad je dnevni tank dizelskog goriva bio najtopliji (60 °C) jer su tada gubici najveći. Kada bi svi dizelski agregati bili u pogonu, u strojarnici bi bila viša temperatura te bi toplinski gubici bili manji. Također se može primjetiti kako toplinski gubici rastu s povećanjem temperature unutar dnevnih tankova i da je teže zagrijati tank pri većoj temperaturi.

14. LITERATURA

- [1] Podloge za predavanja iz kolegija “Brodski sustavi”, Tehnički fakultet, Sveučilište u Rijeci, Rijeka 2022.
- [2] Ivandić I.: “Sustav goriva brodskih dizelskih motora”,
- [3] Podloge za predavanja iz kolegija “Goriva, maziva i voda”, Tehnički fakultet, Sveučilište u Rijeci, Rijeka 2022.
- [4] Podloge za predavanja iz kolegija “Plinska tehnika”, Tehnički fakultet, Sveučilište u Rijeci, Rijeka 2022.
- [5] MARPOL 73/78 Annex VI – Regulations for the prevention of Pollution from ships
- [6] https://hr.wikipedia.org/wiki/Putni%C4%8Dki_brod#Brod_za_krstarenje, 15.05.2022.
- [7] Meyer Werft, „Technical specification for LNG System, Hull No. 705“, Papenburg 2022.
- [8] <https://disneycruise.disney.go.com/why-cruise-disney/wish/>, 17.05.2022.
- [9] <https://www.linquip.com/device/77936/man-12v5160df-marine-engine>, 17.05.2022.
- [10] Sudan V.: “Plinovito gorivo na brodovima”
- [11] Wärtsilä, Wärtsilä 50DF PROJECT GUIDE, Vassa, srpanj 2007.
- [12] Dvornik J., Dvornik S., „Dual-Fuel-Electric Propulsion Machinery Concept on LNG Carriers“, Split, 2014.
- [13] Nikolaj Ivanov Kolev: “Thermodynamic and transport properties of diesel fuel”, 25.06.2022.
- [14] Javid Safarov: “Thermophysical properties of Diesel fuel over a wide range of temperatures and pressures.” 25.06.2022.

15. POPIS SLIKA

<i>Slika 2.1 Maseni udio pojedinih ugljikovodika u uobičajenom dizelskom gorivu [1]</i>	2
<i>Slika 2.2 Primjer oštećenja dosjednih površina ispušnih ventila dizelskih motora zbog visokotemperaturne korozije [1]</i>	4
<i>Slika 2.3 Cetanski broj za različite vrste goriva [1]</i>	5
<i>Slika 3.1 IMO NOx standardi za emisije [5]</i>	11
<i>Slika 3.2 Granične vrijednosti sumpora u gorivu prema regulativi 14 Priloga VI MARPOL konvencije [5]</i>	12
<i>Slika 4.1 1. faza: Transfer goriva iz skladišnih tankova [1]</i>	14
<i>Slika 4.2 Unutrašnjost skladišnih tankova teškog goriva [1]</i>	14
<i>Slika 4.3 2.faza: Pročišćavanje goriva [1]</i>	15
<i>Slika 4.4 Modul separatora goriva u prostoriji separatora</i>	15
<i>Slika 4.5 Modul dobave goriva glavnog pogonskog motora u prostoriji separatora</i>	16
<i>Slika 4.6 Sustav za kontrolu viskoznosti [1]</i>	17
<i>Slika 4.7 Komponente sustava za kontrolu viskoznosti [1]</i>	18
<i>Slika 5.1 Virtualni prikaz kruzera "Disney Wish" [8]</i>	19
<i>Slika 5.2 Desni pogled na palube broda "Disney Wish" [7]</i>	20
<i>Slika 5.3 Lijevi pogled na palube broda "Disney Wish" [7]</i>	20
<i>Slika 5.4 MAN 12V 51/60DF [9]</i>	21
<i>Slika 6.1 Rasprskач goriva s dvostrukom mlaznicom [11]</i>	22
<i>Slika 6.2 Pojednostavljena shema sustava ubrizgavanja dizelskog goriva [2]</i>	23
<i>Slika 6.3 Dovod goriva dvogorivnog dizelskog motora [12]</i>	24
<i>Slika 7.1 Shema pripreme i dobave lakog dizelskog goriva [7]</i>	29
<i>Slika 7.2 Položaj dnevnog tanka T57 [7]</i>	30
<i>Slika 7.3 Položaj dnevnog tanka T46 [7]</i>	30
<i>Slika 7.4 Položaj dnevnih tankova T57 i T46 u tlocrtu [7]</i>	33
<i>Slika 8.1 Ovisnost gustoće dizelskog goriva o temperaturi</i>	35
<i>Slika 8.2 Ovisnost dinamičke viskoznosti dizelskog goriva o temperaturi</i>	36
<i>Slika 8.3 Dnevni tank T46</i>	38
<i>Slika 8.4 Dnevni tank T57</i>	39
<i>Slika 8.5 3D model dnevnog tanka dizelskog goriva T46</i>	39
<i>Slika 8.6 3D model dnevnog tanka dizelskog goriva T57</i>	40
<i>Slika 12.1 Promjena temperature dnevnog tanka dizelskog goriva T46</i>	103
<i>Slika 12.2 Toplinski gubici dnevnog tanka dizelskog goriva T46 u ovisnosti o njegovoj temperaturi</i>	104
<i>Slika 12.3 Promjena temperature dnevnog tanka dizelskog goriva T57</i>	104
<i>Slika 12.4 Toplinski gubici dnevnog tanka dizelskog goriva T57 u ovisnosti o njegovoj temperaturi</i>	105

16. POPIS TABLICA

<i>Tablica 2.1 Sastav prirodnog plina [3]</i>	<i>7</i>
<i>Tablica 3.1 IMO Tier 1, IMO Tier 2, IMO Tier 3 emisijski standardi [5].....</i>	<i>10</i>
<i>Tablica 3.2 Granične vrijednosti sumpora u brodskom dizelskom gorivu [5]</i>	<i>12</i>
<i>Tablica 5.1 Osnovne karakteristike odabranog broda [7].....</i>	<i>20</i>
<i>Tablica 5.2 Glavni podaci motora MAN 12V51/60DF [9]</i>	<i>21</i>

17. POPIS OZNAKA

a – temperaturna vodljivost, m^2s^{-1}

c – specifični toplinski kapacitet, $\text{J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$

D – promjer, m

F – površina, m^2

f – koeficijent trenja (Fanning), -

\dot{G} – maseni protok, kg s^{-1}

g – ubrzanje sile teže, m s^{-2}

H – visina, m

L – duljina, m

ℓ – karakteristična duljina, m

T_s – temperatura stijenke, K

T_∞ – temperatura fluida podalje stijenke, K

w – brzina strujanja, m s^{-1}

α – koeficijent prijelaza topline, $\text{W m}^{-2}\text{K}^{-1}$

β – koeficijent toplinske ekspanzije, K^{-1}

idealni plinovi: $\beta = 1/T_m$

kapljevine i pare: $\beta = \left| \frac{\rho - \rho_\infty}{\rho} \right| \frac{1}{T_s - T_\infty}$

η – dinamička žilavost, Pa s , $\text{kg m}^{-1}\text{s}^{-1}$

λ – toplinska provodnost, $\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$

ν – kinematska žilavost, m^2s^{-1}

ρ – gustoća, kg m^{-3}

Fizikalna svojstva fluida računaju se za srednju temperaturu:

$$T_m = \frac{T_s + T_\infty}{2}$$

SAŽETAK

Ovaj rad se bavi izradom projekta sustava pripreme i dobave goriva na brodu za kružna putovanja. Glavni zadatak bio je izraditi proračun grijanja dnevnih tankova dizelskog goriva. Potrebno je bilo izabrati najbolji pristup pripreme brodskog dizelskog goriva kako bi osigurali dovoljnu količinu goriva odgovarajućih svojstava te kako bi gubici topline i transporta brodskog dizelskog goriva bili što manji. Na temelju izračunatih toplinskih gubitaka dnevnih tankova dizelskog goriva i topline dovedene parom za grijanje tankova, određena je potrebna duljina cijevi kroz koje struji para. Time je osigurano odgovarajuće grijanje dnevnih tankova dizelskog goriva te pravila i kvalitetna dobava goriva dizelskim motorima.

Ključne riječi: MGO, dnevni tankovi, kruzeri

ABSTRACT

This paper deals with the design of the fuel preparation and supply system on a cruise ship. The main task is calculation of fuel oil daily service tank heating system. It is necessary to choose the best approach for the preparation of marine diesel fuel in order to deliver a sufficient amount of fuel with required properties and to minimize heat losses and transportation losses of marine diesel fuel. Based on the calculated heat losses of the daily diesel fuel tanks and the heat supplied by the steam for heating the tanks, the necessary length of the heating pipe is determined. This ensures adequate heating of the daily diesel fuel tanks with proper and quality fuel supply to diesel engines.

Key words: marine diesel fuel, service tanks, cruisers