

Utjecaj opterećenja na ukupnu potrošnju goriva i ostale parametre glavnog motora

Šarić, Matija

Undergraduate thesis / Završni rad

2021

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:187:778315>

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

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



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

Repository / Repozitorij:

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



uniri DIGITALNA
KNJIŽNICA

dabar
DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

SVEUČILIŠTE U RIJECI
POMORSKI FAKULTET

MATIJA ŠARIĆ

**UTJECAJ OPTEREĆENJA NA UKUPNU POTROŠNJU
GORIVA I OSTALE PARAMETRE GLAVNOG MOTORA**

ZAVRŠNI RAD

Rijeka, 2021. godina

SVEUČILIŠTE U RIJECI

POMORSKI FAKULTET

MATIJA ŠARIĆ

**UTJECAJ OPTEREĆENJA NA UKUPNU POTROŠNJU
GORIVA I OSTALE PARAMETRE GLAVNOG MOTORA**

**INFLUENCE OF LOAD ON TOTAL FUEL
CONSUMPTION AND OTHER PARAMETERS OF MAIN
ENGINE**

ZAVRŠNI RAD

Kolegij: Rad na simulatoru 1

Mentor: Izv. Prof. Dr. sc. Dean Bernečić

Student: Matija Šarić

Studijski smjer: Brodostrojarstvo

JMBAG: 0112075974

Rijeka, srpanj 2021.

Student/studentica: Matija Šarić

Studijski program: Brodostrojarstvo

JMBAG: 0112075974

IZJAVA O SAMOSTALNOJ IZRADI ZAVRŠNOG RADA

Kojom izjavljujem da sam završni rad s naslovom
Utjecaj opterećenja na ukupnu potrošnju goriva i ostale parametre glavnog motora
(naslov završnog rada)

izradio/la samostalno pod mentorstvom
izv. prof. dr. sc. Deana Bernečića
(prof. dr. sc. / izv. prof. dr. sc. / doc dr. sc Ime i Prezime)

te komentorstvom _____/_____

stručnjaka/stručnjakinje iz tvrtke _____/
(naziv tvrtke).

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

Suglasan/na sam s trajnom pohranom završnog rada u cjelovitom tekstu u mrežnom digitalnom repozitoriju Pomorskog fakulteta Sveučilišta u Rijeci te Nacionalnom repozitoriju Nacionalne i sveučilišne knjižnice.

Za navedeni rad dozvoljavam sljedeće pravo i razinu pristupa mrežnog objavljivanja:
(zaokružiti jedan ponuđeni odgovor)

- a) rad u otvorenom pristupu
- b) pristup svim korisnicima sustava znanosti i visokog obrazovanja RH
- c) pristup korisnicima matične ustanove
- d) rad nije dostupan

Student/studentica
Matija Šarić
(potpis)

Ime i prezime studenta/studentice

SAŽETAK

U ovom radu provedeno je istraživanje, odnosno analiza utjecaja promjene opterećenja na ukupnu potrošnju goriva te ostale parametre glavnoga motora. Rezultati su prikazani grafički i analitički. Sustavi na kojima se vršilo ispitivanje opisani su kako bi se shvatila međusobna povezanost istih.

Analizom prikupljenih podataka dobio se uvid u red veličina izmjerenih parametara te njihovo ponašanje. Konačni rezultat ispitivanja dao je odgovor na pitanje pri kojem opterećenju bi bilo poželjno eksploatirati ispitivani pogon, odnosno pri kojem će opterećenju ukupna potrošnja goriva i ostali parametri glavnoga motora biti ekonomski i ekološki najisplativiji.

Ključne riječi: Analiza parametara glavnog motora, specifična potrošnja goriva, ukupna potrošnja goriva

SUMMARY

This paper presents the research conducted i.e., an analysis of the total fuel consumption and other parameters of a main engine. The produced results are presented graphically, as well as analytically. The systems on which test was performed are described.

By the analysis of the collected data, an insight was provided into the magnitude of measured parameters and their behaviour. The final result of the test gave an answer to a question at which load it would be desirable to operate tested plant i.e., at which load the total fuel consumption and other parameters of the main engine will be the most economically and environmentally viable.

Key words: Analysis of main engine parameters, specific fuel consumption, total fuel consumption

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. OPIS SUSTAVA GORIVA GLAVNOG I POMOĆNIH MOTORA TE SUSTAVA GORIVA LOŽENOG GENERATORA PARE	2
3. OPIS SUSTAVA PARE	9
4. ANALIZA UKUPNE POTROŠNJE GORIVA I OSTALIH PARAMETARA GLAVNOG MOTORA	16
4.1. Analiza parametara indikatorskih dijagrama	16
4.2. Analiza snage i momenta	21
4.3. Opis kontrolnih ventila rashladnog sustava slatke vode	22
4.4. Analiza prijedene udaljenosti i ukupne potrošnje goriva	25
4.5. Analiza utjecaja opterećenja na potrošnju pomoćnih uređaja	27
4.6. Analiza količine NO_x-a i specifične potrošnje goriva glavnog motora	28
4.7. Analiza broja okretaja i specifične potrošnje goriva glavnog motora	30
5. ZAKLJUČAK	32
LITERATURA	33
POPIS SLIKA	34
POPIS TABLICA	34

1. UVOD

Kroz završni rad prikazati će se utjecaj promjene opterećenja na ukupnu potrošnju goriva te ostale parametre glavnog motora. Istraživanje će se vršiti na simulatoru strojarnice tvrtke Kongsberg na modelu sporookretnog glavnog motora s pripadajućim pomoćnim strojevima poput dizelskih generatora te generatora pare.

Opisima sustava goriva glavnog motora, pomoćnih motora i generatora pare te sustava pare biti će objašnjen svaki element sustava te način rada istih. Osim elemenata i načina rada nastojat će se objasniti povezanost i međusobna zavisnost navedenih sustava. Uz svaki od opisa biti će priložena numerirana shema kako bi opisivanje bilo razumljivije.

Istraživanje će se provesti tako da se pri svakom od unaprijed definiranih opterećenja mjere određeni parametri. Tako će se za potrebe praćenja ukupne potrošnje goriva mjeriti potrošnja goriva glavnog motora, potrošnja goriva pomoćnih strojeva (dizelskih generatora i generatora pare), specifična potrošnja goriva glavnog motora i sl.

Od ostalih parametara glavnog motora analizirati će se snaga, moment, broj okretaja, trenutak početka izgaranja, maksimalni tlak i sl.

Na osnovu prikupljenih parametara izvršiti će se grafički prikaz i analiza. Cilj analize jest odrediti opterećenje pri kojem će ukupna potrošnja goriva i ostali parametri glavnog motora biti što bliže optimalnima.

2. OPIS SUSTAVA GORIVA GLAVNOG I POMOĆNIH MOTORA TE SUSTAVA GORIVA LOŽENOG GENERATORA PARE

Sustav goriva obuhvaća više podsustava kojima se omogućuje priprema i dobava goriva za potrošnju u glavnom i pomoćnim motorima. Pogonsko gorivo koje se ukrca na brod u sebi sadrži nečistoće i vodu koju je potrebno izdvojiti kako bi se gorivo moglo upotrebljavati na siguran i efikasan način u potrošačima. Stoga pogonsko gorivo prolazi kroz pripremne faze poput grijanja, taloženja i filtracije.

Na slici 1 prikazan je sustav goriva od dnevnih tankova prema glavnom motoru i brodskom generatoru pare. Gorivo koje je prošlo pripremne faze pohranjuje se u dnevni tank goriva. Dnevni tank goriva opremljen je parnim grijačem (3) kojim se održava zadana temperatura kako bi gorivo bilo odgovarajućeg viskoziteta. Osim grijača, tank je opremljen drenažnom linijom te brzo-zatvarajućim ventilom (4) na izlaznoj liniji goriva. Brzo-zatvarajući ventil je dio sigurnosne opreme, a uloga mu je prekinuti dovod goriva iz dnevnog spremnika prema potrošačima u slučaju nastanka požara u prostoru strojarnice. Upravljanje ovim ventilom je omogućeno iz prostora koji se nalaze izvan strojarnice. Sustav sadrži dva dnevna tanka goriva, jedan je za teško gorivo (1) dok je drugi za dizelsko gorivo (2) [1] [2].

Izlazna linija goriva iz dnevnog tanka se odvaja prema sustavu goriva za loženi generator pare te prema sustavu goriva glavnog motora. Svaka od ovih linija opremljena je nepovratnim ventilima kojima se sprječava povratno strujanje goriva. Prije nego li gorivo dospije u sustav goriva glavnog motora isto prolazi kroz troputni ventil (5) za odabir goriva. Ovim ventilom se odabire ili tijekom rada vrši prebacivanje s jedne vrste goriva na drugu i obrnuto. Sustav je opremljen dvjema dobavnim pumpama (6) koje sišu gorivo iz dnevnog tanka te ga tlače u tank za miješanje (7). Pumpe su izvedene u paraleli te je uz njih izveden i dodatni mimovod s ventilom konstantnog tlaka. Mimovod ima ulogu cirkulacije goriva u slučaju prevelikog tlaka – recirkulira gorivo između tlačne i usisne strane pumpi. Svaka pumpa opremljena je prekotlačnim i nepovratnim ventilom kao i filtrom na usisu koji štiti pumpu od nečistoća u gorivu. Kapacitet svake pumpe pojedinačno nadilazi maksimalnu potrošnju glavnog i pomoćnih motora stoga je za rad sustava dovoljna samo jedna dok je druga u stanju pripravnosti. Ukupna količina goriva

koja se opskrbljuje u tank za miješanje se prati uz pomoć mjerača protoka (8) koji je izveden u paraleli s mimovodnim („by pass“) ventilom (9). Kako se i ispred mjerača protoka nalazi filter, u slučaju da dođe do prevelikog zaprljanja istog, otvaranjem „by pass“ ventila omogućen je nesmetan rad pogona dok se filter čisti. Između mjerača protoka i tanka za miješanje nalazi se uređaj za emulzifikaciju goriva i vode (10). Navedeni uređaj dodaje destiliranu vodu u gorivo u svrhu smanjivanja količine NO_x-a u ispušnim plinovima motora [1] [2].

Nadalje gorivo glavnom linijom sustava cirkulira iz dobavnih pumpi (6) preko mjerača protoka (8) prema tanku za miješanje (7). Uloga tanka za miješanje jest miješanje povratnog goriva iz motora i goriva koje dolazi iz dnevnog tanka. Postupkom miješanja goriva se nastoji ublažiti temperaturne „šokove“ na sustavu uslijed prebacivanja sustava s jedne na drugu vrstu goriva. Uz miješanje goriva uloga ovog tanka je i otpjenjivanje goriva koje se u cirkulaciji zapjeni. Stoga je tank opremljen automatskim odzračnim ventilom (11). Tim uređajem se nastoje otkloniti oslobođeni lako hlapljivi plinovi te zrak koji može ući u sustav. Iz tanka za miješanje gorivo se do visokotlačnih pumpi dobavlja uz pomoć dvije cirkulacijske pumpe (12). Svaka od pumpi kapaciteta je većeg od ukupne potrošnje glavnog i pomoćnih motora stoga je jedna dovoljna za funkcionalnost dok je druga u pripravnosti. Svrha cirkulacijskih pumpi je povećanje tlaka (na 7 do 10 bar) u sustavu goriva kako bi se osiguralo da svaka visokotlačna pumpa goriva dobije predviđenu količinu goriva za rad te da se spriječi isparavanje zaostale vode¹. Povećanjem tlaka se također nastoji zaštititi visokotlačne pumpe od kavitacije te višak goriva podmazuje i hladi visokotlačnu pumpu [1] [2].

U sklopu sustava nakon cirkulacijskih pumpi nalaze se dva parna zagrijača (13) te dva filtra. Parnim zagrijačima se vrši zagrijavanje goriva sa svrhom održavanja viskoziteta goriva u zahtijevanom području. Kapacitet jednog parnog zagrijača dostatan je za grijanje ukupne količine goriva koja ide na potrošnju stoga u normalnom radu, jedan radi dok je drugi u stanju pripravnosti. Prije svakog zagrijača se nalazi zaporni ventil čijim se otvaranjem odabire koji će biti u uporabi [1] [2].

¹ Zbog visoke temperature teškog goriva (oko 140°C) moguće je isparavanje vode iz goriva što može uzrokovati probleme u radu visokotlačnih pumpi i rasprskavača. Kako bi se to spriječilo važno je podignuti tlak iznad tlaka na temperaturi zasićenja, a za 140°C je to iznad 3 bar-a. Stoga se na brodovima koji koriste teška goriva tlak prije visokotlačnih pumpi drži od 5 do 10-ak bar-a, ovisno o proizvođaču motora.

Nakon što se gorivo zagrijalo na željenu temperaturu isto prolazi kroz samočistivi filter (14). Uz samočistivi filter u paraleli je izveden „by pass“ filter (15) koji se upotrebljava kada se kod samočistivog zahtjeva ručno čišćenje. Izbor filtra se vrši zapornim ventilima na ulaznom vodu. Ovi filteri su iznimno visoke finoće kako bi se spriječio prolaz najsitnijih nečistoća koje mogu biti iznimno opasne za rad visokotlačnih pumpi [1] [2].

Završna kontrola stanja goriva vrši se uz pomoć viskozimetra (16). Viskozimetar (16) preko senzora dobiva informaciju viskoziteta goriva te posljedično djeluje na sustav grijanja parom. Kontrola sustava grijanja može se vršiti na dva načina: jednostruko ili kaskadno. Jednostrukim načinom se direktno djeluje preko viskozimetra na prigušni ventil pare te je odlika ovog načina kontrole brzo djelovanje, ali slabija preciznost. Dok se drugim kaskadnim načinom kontrole upravljanje prigušnim ventilom pare vrši uz pomoć dodatnog kontrolera koji prati dva parametra, a to su viskozitet goriva u dobavnoj liniji te temperatura goriva na izlazu iz parnog zagrijača. Odlika ovog načina kontrole je preciznost, ali i sporo djelovanje. Kroz cijeli sustav goriva glavnog motora, generatora pare i pomoćnih motora provedeno je grijanje parom pomoću tanke cijevi omotane duž linije goriva, a sve u svrhu održavanja viskoziteta u području željene vrijednosti [1] [2].

Sustav goriva glavnog motora izveden je s dva odvojka prema sustavu goriva pomoćnih motora. Prvi odvojak koji se nalazi prije visokotlačnih pumpi služi za opskrbu pomoćnih motora teškim gorivom te je opremljen zapornim ventilom. Dok se drugi ogranak nalazi nakon ventila konstantnog tlaka te se koristi za povrat viška goriva s pomoćnih motora. Kako bi se mogla pratiti potrošnja pomoćnih motora svaki ogranak je opremljen mjeračem protoka (17). Prije no što gorivo dopiše do visokotlačnih pumpi prolazi kroz brzo-zatvarajući (18) ventil kojim se u slučaju požara u prostoru strojarne prekida dovod goriva na glavni motor. Naposljetku gorivo dolazi do visokotlačnih pumpi (19) koje dobavljaju gorivo do rasprskavača na glavama cilindara. Višak goriva s visokotlačnih pumpi se vraća u glavnu liniju goriva uz pomoć pripadajućeg cjevovoda. Spomenutim viškom goriva vrši se neophodno hlađenje i podmazivanje visokotlačnih pumpi. Svaka visokotlačna pumpa ima sistem za prihvatanje propuštanja goriva te viška goriva s rasprskavača, a sve se spaja na zajednički tank za detekciju propuštanja (20). U slučaju propuštanja visokotlačnih cijevi ili pumpi nakupljeno gorivo će izazvati javljanje alarma. Da bi se osigurao željeni tlak i dostatna količina goriva za sve visokotlačne pumpe u sustav je ugrađen ventil konstantnog tlaka (21). Povratna linija goriva se na kraju grana

u dvije linije. Jednom linijom se vrši povrat goriva u tank za miješanje (7) dok se drugom linijom gorivo vraća u dnevni tank teškog goriva (1). Troputnim ventilom (22) na povratnoj liniji se vrši odabir smjera povrata ovisno o fazi u kojoj se sustav nalazi: potrošnja ili recirkulacija² [1] [2].

Sustav goriva pomoćnih motora izveden je s mogućnošću napajanja gorivom na dva načina. Stoga se pomoćni motori mogu napajati gorivom iz dnevnog tanka dizelskog goriva ili preko sustava goriva glavnog motora. Kojom će se vrstom goriva pomoćni motori napajati određeno je položajem troputnog ventila (23) koji se nalazi na ulazu u sustav. Uz troputni ventil na liniji dovoda se nalazi brzo-zatvarajući ventil (24) kojim se vrši prekid dobave goriva u slučaju požara ili u nekom drugom slučaju nužde u prostoru strojarnice. Tlak goriva u sustavu pomoćnih motora se omogućuje uz pomoć privješene vijčane pumpe (25). U paraleli s pumpom su izvedeni prekotlačni ventil i cirkulacijski ventil. Prekotlačnim ventilom se sustav i pumpa štite od prevelikog tlaka dok se cirkulacijskim ventilom omogućuje dovod goriva do visokotlačne pumpe kod upućivanja pomoćnog motora kada privješena pumpa još ne radi. U sklopu sustava nadalje se nalaze dva filtra (26) izvedena u paraleli. Kapacitet jednog filtra je dovoljan za normalan rad sustava stoga je drugi u pripravnosti. Odabir filtra vrši se zapornim ventilom na ulazu. Filtrima se nastoji zaštititi visokotlačnu pumpu (27) od zaostalih nečistoća. Visokotlačnim pumpama se vrši dobava goriva do rasprskaača na cilindarskim glavama pomoćnog motora. Dobava visokotlačne pumpe kontrolira se pomoću regulatora broja okretaja (28). Senzor regulatora prati broj okretaja generatora te na osnovi izmjerene veličine regulator kontrolira dobavu kako bi se frekvencija struje proizvedene u generatoru zadržala u željenim granicama. Nakon visokotlačne pumpe nalazi se ventil konstantnog tlaka (29). Njime se nastoji održavati konstantan tlak goriva na visokotlačnim pumpama. Višak goriva kojim su se pumpe hladile i podmazivale vraća se preko povratne linije i troputnog ventila (23) u sustav goriva glavnog motora ili prema dnevnom tanku dizelskog goriva (ovisno o načinu napajanja). Sustav grijanja parom linije

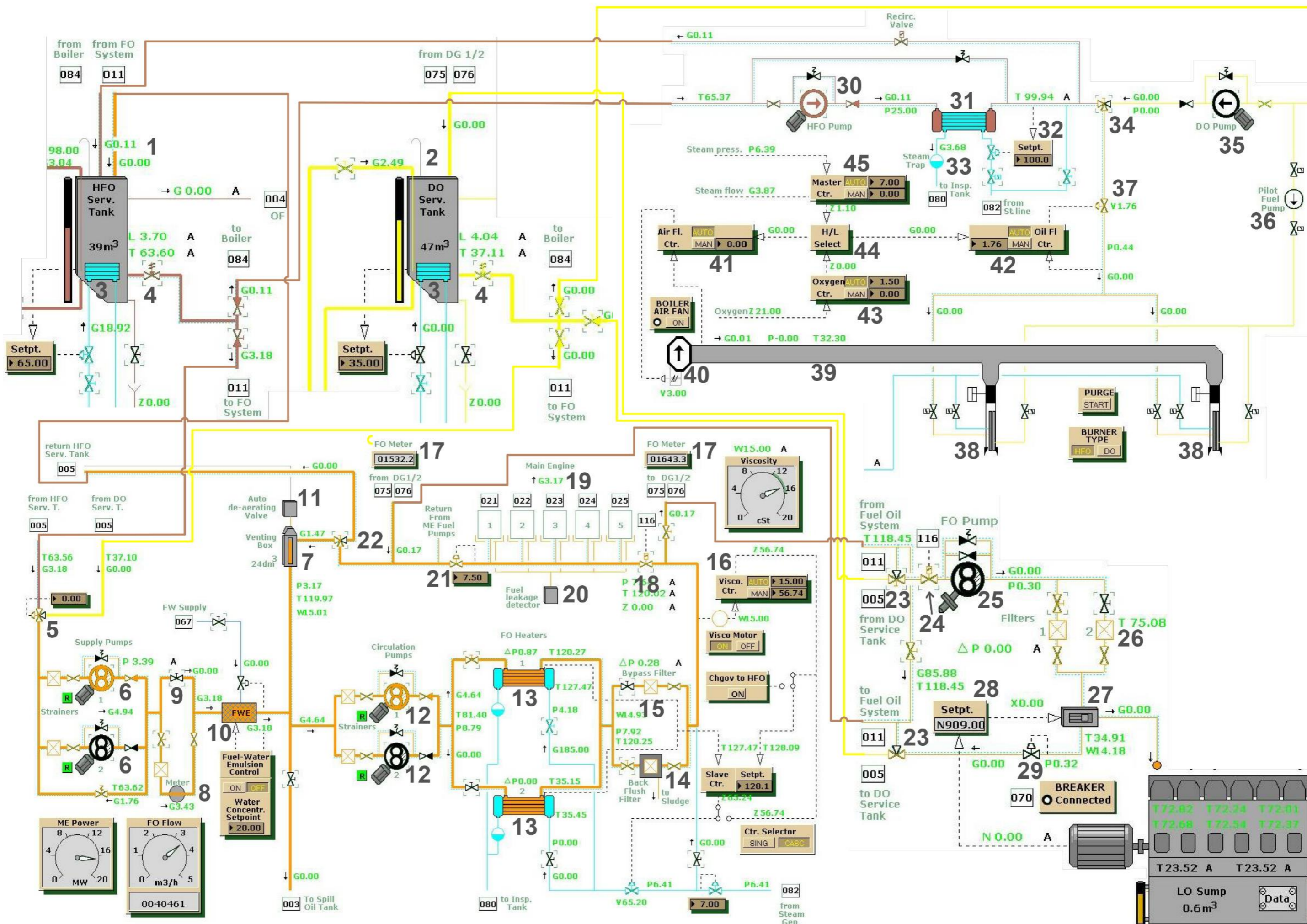
² Recirkulacija goriva prema dnevnom tanku teškog goriva se vrši u dva slučaja. Prilikom upućivanja glavnog motora na teško gorivo odnosno kako bi se sustav goriva i pripadni cjevovodi zagrijali za rad s teškim gorivom. Drugi slučaj se odnosi na situaciju kada je potrebno brzo prebaciti sustav goriva sa teškog goriva na dizelsko gorivo.

goriva koji se nalazi na glavnom sustavu goriva proteže se i na sustav goriva pomoćnih motora [1] [2].

Sustav goriva loženog generatora pare je također izveden s mogućnošću napajanja gorivom na dva načina. Gorivo se do loženog generatora može opskrbljivati iz dnevnog tanka teškog goriva (1) ili iz dnevnog tanka dizelskog goriva (2). Linija napajanja iz dnevnog tanka teškog goriva izvedena je s zapornim ventilom na odvojkju prema loženom generatoru pare. Nadalje iz odvojka gorivo putuje do pumpe teškog goriva (30) kojom se gorivo dobavlja do gorača. Pumpa teškog goriva je opremljena rasteretnim ventilom te zapornim ventilima na usisnoj i tlačnoj strani. Uz pumpu je u paraleli izvedena i linija recirkulacije kojom se osigurava neprestani protok teškog goriva kroz pripadajući parni zagrijač (31). Unutar parnog zagrijača se vrši grijanje teškog goriva kako bi isto bilo odgovarajućeg viskoziteta za izgaranje. Odgovarajuća temperatura, a samim time i viskozitet teškog goriva kontrolira se uz pomoć temperaturnog kontrolera (32). Navedeni kontroler na osnovi izlazne temperature teškog goriva iz zagrijača vrši upravljanje prigušnim ventilom pare. Para se osim za grijanje unutar zagrijača, odvojkom malog promjera koristi za grijanje cijelog cjevovoda u kojem se teško gorivo može zateći. Osim kontrolera za regulaciju temperature zagrijač je opremljen zapornim ventilom te uređajem za kontrolirani protok pare kroz zagrijač (33). Nakon zagrijača na dobavnoj liniji teškog goriva se nalazi troputni ventil (34). Troputnim ventilom spojene su dobavna linija teškog i dizelskog goriva odnosno omogućen je odabir vrste goriva koja će se napajati do gorača. Dizelsko gorivo iz dnevnog tanka se također napaja preko odvojka s zapornim ventilom , te se dijeli na dvije linije. Jednom linijom se opskrbljuje pumpu dizelskog goriva (35) dok se drugom linijom opskrbljuje „pilot“ pumpa (36). Uloga „pilot“ linije je stvoriti plamen kojim će se zapaliti gorivo iz glavnih gorača. Istoimena pumpa je opremljena magnetskim zapornim ventilima na usisnoj i tlačnoj strani koji se otvaraju automatski kada se pumpa uputi odnosno uputi generator. Pilot plamen ne gori za cijelog vremena rada generatora već samo jedan vremenski period koji osigurava sigurno paljenje glavnog plamena. Pilot“ linije izvedene su prema oba glavna gorača. Pumpa dizelskog goriva (35) koja opskrbljuje glavne gorače gorivom također je izvedena s rasteretnim te dva zaporna ventila. Odabrano gorivo naposljetku osim kroz troputni ventil (34) prolazi još kroz regulacijski (37) te zaporni ventil na putu do glavnih gorača (38) [1] [2].

U slučaju kada se za rad sustava koristi teško gorivo potrebno je osigurati medij za raspršivanje. Kao medij za raspršivanje koriste se komprimirani zrak ili para [1] [2].

Osim goriva, za rad sustava potrebno je osigurati dostatnu količinu zraka za izgaranje. Stoga se zrak ventilatorima upuhuje kroz pripadajući kanal (39) preko zaklopki (40) do gorača (38). Kontrola izgaranja izvedena je uz pomoć više kontrolera. Kontroler zraka (41) upravlja zaklopkama na kanalu dobave zraka za izgaranje. Zaklopkama (40) se postiže odgovarajuća dobava zraka za odgovarajuću količinu goriva. Kontrolerom protoka goriva (42) utječe se na regulacijski ventil linije goriva prema goračima, kako bi se osigurala odgovarajuća količina za izgaranje. Kontrolerom razine kisika (43) vrši se kontrola kisika u ispušnim plinovima koji se poslije koriste kao inertni plin. Uz navedene kontrolere sustav također sadrži kontroler opterećenja (44) kojim se vrši odabir visokog ili niskog tlaka u parnom bubnju. Glavni kontroler (45) upravlja svim navedenim kontrolerima na osnovi ulaznih signala, a to su tlak pare i protok pare iz parnog bubnja. Ako se dogodi da u parnom bubnju poraste izlazni protok pare te dođe do pada tlaka, glavni kontroler će pripadajućim kontrolerima poslati signal da osiguraju veću količinu zraka i goriva kako bi se pojačala proizvodnja pare te samim time povećao tlak i smanjio izlaz protok pare. U situaciji kada je tlak previsok izvršiti će se obrnuti proces [1] [2].



Slika 1 - Prikaz sheme goriva glavnog i pomoćnih motora te loženog generatora pare

3. OPIS SUSTAVA PARE

Para na brodu ima raznu namjenu, od grijanja tereta, goriva, maziva do pogona turbina teretnih pumpi i generatora. Kako bi se proizvela dovoljna količina pare za sve navedene potrebe sustav je opremljen generatorima pare. Voda koja se koristi za proizvodnju pare unutar generatora pare mora biti kemijski tretirana kako bi se spriječile neželjena pojave poput kamenca, pjenjenja, povećane korozivnosti ili nekontrolirane pH vrijednosti.

Tretirana voda koja se koristi za proizvodnju pare nalazi se unutar tanka napojne vode (1) kojem je uloga osigurati dovoljnu količinu vode za normalnu proizvodnju pare pri bilo kojem opterećenju pogona. Tank je opremljen nivokaznim staklom te parnim grijačem kojim se napojna voda održava na željenoj temperaturi. U slučaju propuštanja sustava te samim time i padom razine vode unutar tanka napojne vode, nadopuna se vrši iz tanka destilirane vode (2), koji se potom puni uz pomoć generatora slatke vode. Vodom iz tanka destilirane vode se osim sustava pare opskrbljuje i rashladni sustav slatke vode glavnog motora te hidrofor. Tank destilirane vode je također opremljen nivokaznim staklom. Voda za nadopunu napojnog tanka se siše iz tanka destilirane vode uz pomoć pumpe za nadopunu (3) [1] [2].

Nakon što para obavi svoju ulogu povrat s potrošača se vrši preko inspeksijskog tanka (4) i vakuumske kondenzatora (5). Povrat u inspeksijski tank se vrši iz manje važnih potrošača poput raznih grijača tankova tereta, goriva, mazivih ulja, raznih separatora i sl. Inspeksijskim tankom se nastoji zaštititi kotao od mogućeg zaprljanja uslijed propuštanja nekog od navedenih izmjenjivača topline. Prema tome uz pomoć inspeksijskog tanka može se vršiti provjera kvalitete vode te dobiti indikacija o kontaminaciji. Turbine koje se koriste za pogon teretnih pumpi te generatora imaju izveden povrat pare direktno prema vakuumskom kondenzatoru (5) kako bi se turbinama povećala iskoristivost, odnosno osigurao veći toplinski pad³. Unutar kondenzatora se para koja je obavila rad u turbinama ukapljuje te ponovno šalje u napojni tank gdje će se koristiti za ponovnu proizvodnju pare. Osim povratnih linija kondenzata, napojni tank je

³ Kada bi povrat turbine bio izveden prema atmosferskom kondenzatoru, turbina bi za istu snagu bila puno većih dimenzija.

opremljen i preljevnom linijom koja je izvedena prema kaljuži u slučaju previsoke razine u tanku [1] [2].

Napojni sustav je izveden s dvije napojne pumpe, glavnom (6) i pomoćnom (7) te je svaka pumpa opremljena pripadajućim ventilima na usisnoj i tlačnoj strani. Osim ventila svaka pumpa na tlačnoj strani izvedena je s recirkulacijskom linijom koja ima prigušnicu. Prigušnicom (8) na recirkulacijskoj liniji nastoji se osigurati minimalni protok napojne vode kroz napojnu pumpu u slučaju kada se napojni regulacijski ventil (9) u potpunosti zatvori. Tim načinom se istu štiti od pregrijavanja i izgaranja njene šupernice (brtve). Glavna i pomoćna napojna pumpa razlikuju se u kapacitetima, a samim time i prema uporabi. Pomoćna napojna (7) pumpa izvedena je sa sedam puta većim kapacitetom od glavne napojne pumpe te je linija napajanja iz nje izvedena direktno prema parnom bubnju loženog generatora pare. Ova pumpa se koristi kada postoji potreba za proizvodnjom velike količine pare. Upućivanje i zaustavljanje ove pumpe vrši se automatski jer se ista upotrebljava samo u slučaju kada se očekuje velika potrošnja pare odnosno kada rade pumpe tereta. Tada je glavna napojna pumpa u stanju pripravnosti („stand by“). Glavna napojna pumpa (6) manjeg je kapaciteta i upotrebljava se za napajanje kada potreba za parom nije velika, na primjer tijekom navigacije. Napojna linija glavne pumpe izvedena je kroz zagrijač napojne vode (10) u generatoru pare na ispušne plinove te je potom spojena na parni bubanj (11) loženog generatora pare. Na napojnim linijama obje pumpe nalaze se regulacijski napojni ventili (9) kojima se otvara ili prigušuje protok napojne vode kako bi se kontrolirala razina vode unutar parnog bubnja. Nadzorni uređaj razine vode (12) zadužen je za upravljanje regulacijskim napojnim ventilima. Uređaj na osnovu protoka pare u izlaznom cjevovodu iz bubnja, protoku napojne vode nakon napojnih pumpi i razine vode u samom parnom bubnju vrši upravljačku funkciju odnosno otvaranje ili zatvaranje regulacijskih napojnih ventila. Obije napojne linije na spoju s parnim bubnjem imaju izvedene nepovratne ventile odnosno tako zvane „napojne glave“⁴ (16) [1] [2].

U sklopu sustava pare izveden je sustav cirkulacije kojim se povezuju dva generatora pare. Cirkulacijskim sustavom su povezani vodeni bubanj (13) loženog generatora pare, isparivač (14) generatora pare na ispušne plinove te parni bubanj (11) loženog generatora pare. Protok kroz cirkulacijski krug vrši se uz pomoć dvije

⁴ Napojna glava predstavlja spoj jednog nepovratnog i jednog ručnog zapornog ventila.

cirkulacijske pumpe (15) izvedene u paraleli od kojih je jedna u radu, a druga je u stanju pripravnosti. Da bi se spriječilo povratno strujanje vode u slučaju da pumpe izgube pogon iste su opremljene nepovratnim ventilima na tlačnoj strani te zapornim ventilima na usisnoj. Cirkulacijska linija je također opremljena ventilima, jednim na izlazu iz vodenog bubnja te jednim na ulazu u parni bubanj („cirkulacijska glava“). Ovakvom izvedbom se omogućuje izolacija cirkulacijske linije u slučaju da se na istoj žele izvoditi radnje održavanja. Uloga cirkulacijskog kruga jest napajanje isparivača generatora pare na ispušne plinove vodom za proizvodnju pare te zaštita istoimenog generatora pare od požara i oštećenja njegova isparivača i zagrijača. Požar te posljedično oštećenje može biti izazvano nakupljanjem čađe po cijevima generatora pare. Stoga je u svakom generatoru pare izveden sustav za propuhivanje čađe [1] [2].

Loženi generator pare izveden je s dva bubnja od kojih je jedan vodeni (13), a drugi parni (11). Između dva bubnja te okruženo ekranskim cijevima, se nalazi ložište generatora pare. Cirkulacija vode između dva bubnja je izvedena s isparivačkim i silaznim cijevima te ekranskim i membranskim cijevima, ovisno o kakvom se tipu generatora pare radi. Membranskim i ekranskim cijevima se nastoji dodatno iskoristiti toplina izgorenog goriva za proizvodnju pare. Prirodna cirkulacija vode između bubnjeva generatora pare se postiže položajem cijevi u odnosu na ložište. Odnosno isparivačke cijevi će biti postavljene bliže izvoru topline dok će se silazne cijevi nalaziti dalje od izvora topline i biti će hladnije. Princip cirkulacije vode se stoga zasniva na razlici gustoće između toplije vode u isparivačkim cijevima i hladnije vode u silaznim cijevima [1] [2].

Toplina za proizvodnju pare se dobiva iz dva gorača koja se nalaze u ložištu. Na parnom bubnju se osim dvije napojne glave (16) i jedne cirkulacijske glave (17) nalaze dva sigurnosna ventila (18), odzračni ventil (19), dva nivokazna stakla, ventili za ispuš vode (20) te ventil za ispuš pjene (21). Uz cirkulacijsku i napojnu liniju na parnom bubnju su izvedene linije za ispuš vode te za ispuš pjene. Linija ispusta vode iz vodenog bubnja je spojena na liniju za ispuš pjene iz parnog bubnja te preko zajedničkog nepovratnog oplatnog ventila vode van broda. Proizvedena para iz parnog bubnja ide do pregrijača (22) gdje se pretvara u pregrijanu te joj se povećava toplinska energija. Pored podizanja toplinske energije pregrijavanjem pare se smanjuje mogućnost kondenzacije pare unutar radnih strojeva. Pregrijač pare izveden je s odzračnim ventilom (23) koji se upotrebljava pri upućivanju pogona kako bi se pregrijač zaštitio od oštećenja te sigurnosnim ventilom (24). Izlazna linija pare iz pregrijača se odvaja u dva dijela. Jednom

linijom pregrijana pare ide na potrošnju prema turbo strojevima dok drugom linijom pregrijana pare prolazi kroz izmjenjivač topline koji se nalazi unutar parnog bubnja. Smjer kretanja pregrijane pare određuje se uz pomoć glavnog izlaznih ventila pregrijane pare (25) i glavnog izlaznog ventila iz parnog bubnja (26). Izmjenjivačem topline se nastoji zagrijati napojna voda unutar bubnja dok se pregrijanoj pari spušta temperatura. Para koja napušta izmjenjivač topline više nije u pregrijanom već suhozasićenom stanju. Para takvog stanja se preko glavnog izlaznog ventila iz parnog bubnja vodi kroz zagrijače raznih tankova ili se usmjerava kroz pregrijač (27) generatora pare na ispušne plinovi i zatim šalje prema turbo-generatoru (28). Obije linije pregijane i suhozasićene pare su opremljene sigurnosnim ventilima (24) (29) dok je linija suhozasićene pare opremljena i drenažnim ventilom (30) za izbacivanje kondenzirane pare tijekom upućivanja sustava [1] [2].

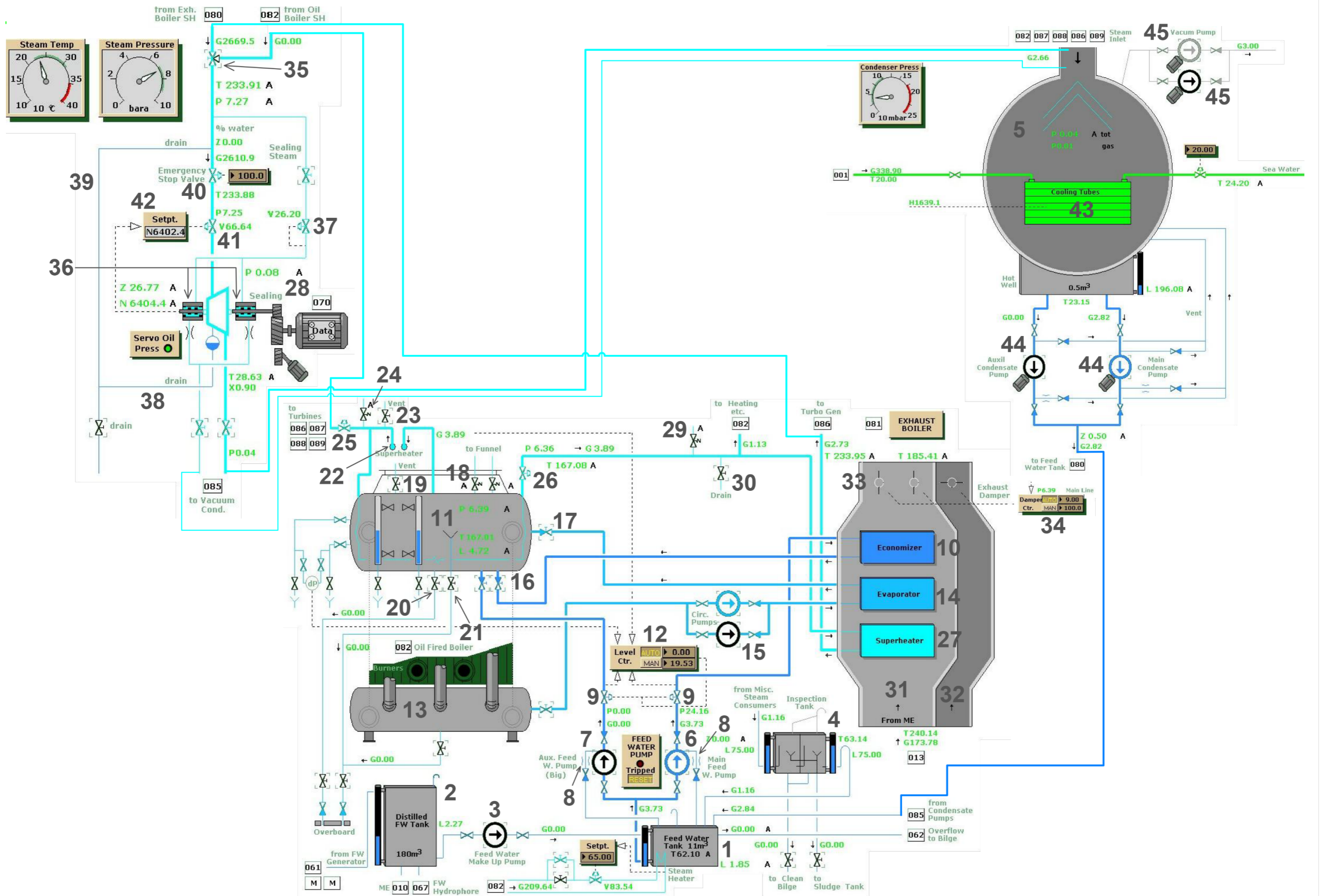
Generator pare na ispušne plinove koristi toplinu ispušnih plinova za potrebe proizvodnje pare. Ispušni plinovi se kroz generator usmjeravaju uz pomoć dva kanala, glavnog (31) i mimovodnog (32). Unutar glavnog kanala se nalaze tri izmjenjivača topline kojima se vrši zagrijavanje napojne vode, isparavanje vode te pregrijavanje pare. Položaj izmjenjivača topline određen je potrebama istih za toplinom. Stoga ispušni plinovi prvo dolaze u kontakt sa pregrijačem pare (27) jer je istom potrebna najveća količina topline. Nakon što se određeni dio topline ispušnih plinova predao pregrijanoj pari u pregrijaču, ispušni plinovi putuju dalje prema isparivaču (14). Unutar dvodijelnog isparivača se vrši daljnja predaja topline ispušnih plinova napojnoj vodi s ciljem proizvodnje pare koja se zatim šalje u parni bubanj. Naposljetku ispušni plinovi dolaze u kontakt sa zagrijačem napojne vode (10). Uloga zagrijača napojne vode jest iskoristiti ostatak topline ispušnih plinova kako bi se zagrijala napojna voda te posljedično smanjila količina goriva potrebna za proces isparavanja. Svaka linija koja vodi do pojedinog izmjenjivača opremljena je sigurnosnim ventilom te zapornim ventilima na ulazu i izlazu. Linija pregrijača također je opremljena drenažnim odnosno odzračnim ventilom. Kako su spomenuti izmjenjivači topline neprestano u kontaktu s ispušnim plinovima glavnog motora da bi se spriječila mogućnost požara ili oštećenja uslijed taloženja čađe, generator pare je opremljen sustavom za propuhivanje. Sustav propuhivanja u ovom generatoru koristi servisni zrak kao radni medij za otklanjanje naslaga čađe. Količina ispušnih plinova koja će prolaziti određenim kanalom ovisit će o položaju zaklopki (33) koje se nalaze u tim kanalima. Kontrola položaja zaklopki se vrši uz pomoć pripadajućeg

kontrolera (34) koji na osnovu tlaka pare unutar parnog bubnja loženog generatora vrši zakret zaklopki samim time kontrolirajući količinu ispušnih plinova koja prolazi kroz određeni kanal. U slučaju kada je tlak u parnom bubnju niži od postavljenog kontroler zakreta zaklopki (34) će otvoriti prolaz ispušnim plinovima kroz glavni kanal (31) dok će mimovodni (32) biti prigušen. Kada se postigao zadani tlak kontroler će djelomičnim otvaranjem mimovodnog i djelomičnim zatvaranjem glavnog kanala nastojati zadržati tlak pare u zadanoj vrijednosti. Ako se dogodi da je tlak pare u parnom bubnju loženog generatora prevelik kontroler će zatvoriti prolaz ispušnim plinovima kroz glavni kanal te usmjeriti svu količinu u mimovodni [1] [2].

Pregrijana para se do turbo-generatora može opskrbljivati linijom pregrijane pare iz loženog generatora pare ili generatora pare na ispušne plinove. Stoga se troputnim ventilom (35) na ulazu u sustav turbo-generatora bira izvor opskrbe. Linija napajanja pregrijanom parom izvedena je s odvojkom kojim se dio pregrijane pare koristi za brtvljenje turbine odnosno labirintnih brtvi (36). Brtvljenjem se sprječava gubitak radne pare. Osim sprječavanja gubitka pare brtvenom parom se omogućuje postizanje podtlaka u vakuumskom kondenzatoru (5) kako bi se turbini povećala učinkovitost. Da bi se tlak brtvene pare održao konstantnim na liniji brtvene pare postavljen je ventil konstantnog tlaka (37). Osim ventila konstantnog tlaka tu je također ugrađen zaporni ventil. Nakon što brtvena para izvrši svoj zadatak napušta labirintne brtve te se usmjerava preko zapornog ventila u vakuumski kondenzator (5). Osim linije brtvene pare, glavna napojna linija pregrijane pare izvedena je s drenažnom linijom kojom se nastoji izbaciti zaostali kondenzat koji se može nakupiti u napojnoj liniji dok turbo-generator nije bio u radu. Drenažna linija turbine (38) te drenažna linija napojnog cjevovoda pregrijane pare (39) spojene su na zajednički odvod koji vodi u kaljužu strojarnice. Para prije nego što uđe u turbinu prolazi kroz glavni zaporni ventil pare (40) te regulacijski ventil protoka pare (41). Upravljanje regulacijskim ventilom protoka pare je izvedeno preko regulatora broja okretaja (42) koji senzorom dobiva informaciju o broju okretaja turbine te na osnovu iste vrši prigušivanje ili otvaranje ventila [1] [2].

Nakon što je pregrijana para izvršila rad unutar turbo-generatora dolazi u vakuumski kondenzator (5). Osim turbo-generatora povrat pare u kondenzator se vrši s ostalih turbo strojeva kao i s rasteretnog ventila unutar sustava manje bitnih potrošača pare. Osnovna svrha vakuumske kondenzatora je ukapljivanje iskorištene pare. Ukapljivanje je omogućeno uz pomoć izmjenjivača topline (43) kroz kojega prolazi

morska voda. Para dolaskom u kontakt s izmjenjivačem topline predaje toplinu morskoj vodi te se na taj način ukapljuje. Nastali kondenzat se nakuplja na dnu vakuumskog kondenzatora te se pumpama odvodi u mlaki zdenac, odnosno inspekcijski tank ili direktno u napojni tank kao što je slučaj na ovom brodu. Sustav je opremljen s dvije pumpe kondenzata (44) od kojih je za vrijeme normalnog rada jedna u pogonu dok je druga u stanju pripravnosti. Svaka pumpa je također opremljena zapornim ventilima na usisnoj i tlačnoj strani te odzračnom linijom koja se spaja na kondenzator. Osim primarne uloge ukapljivanja, vakuumskim kondenzatorom se također povećava iskoristivost turbo-generatora. Vakuumom odnosno podtlakom unutar kondenzatora omogućuje se veći toplinski pad unutar turbine turbo-generatora što rezultira većom iskoristivosti. Za ostvarivanje vakuuma unutar kondenzatora u sustav su ugrađene dvije paralelno postavljene centrifugalne, elektromotorom pogonjene vakuumske pumpe (45). Tijekom normalnog rada kondenzatora jedna pumpa radi dok je druga u stanju pripravnosti [1] [2].



Slika 2 - Prikaz sustava pare

4. ANALIZA UKUPNE POTROŠNJE GORIVA I OSTALIH PARAMETARA GLAVNOG MOTORA

Analiza je rađena na Kongsberg-ovom K-Sim simulatoru brodske strojarne. Brod je tanker za prijevoz sirove nafte s jednim glavnim sporookretnim motorom tipa MAN B&W serije MC 90, dva dizelska generatora, jednim turbo i jednim osovinskim generatorom. Brod ima ugrađen pomoćni loženi generator pare te utilizator. Početni uvjeti mjerenja su „full ahead loaded“ odnosno brod nakrcan te ide punom brzinom. Za potrebe analize parametri su se pratili kroz razdoblje od 12 sati.

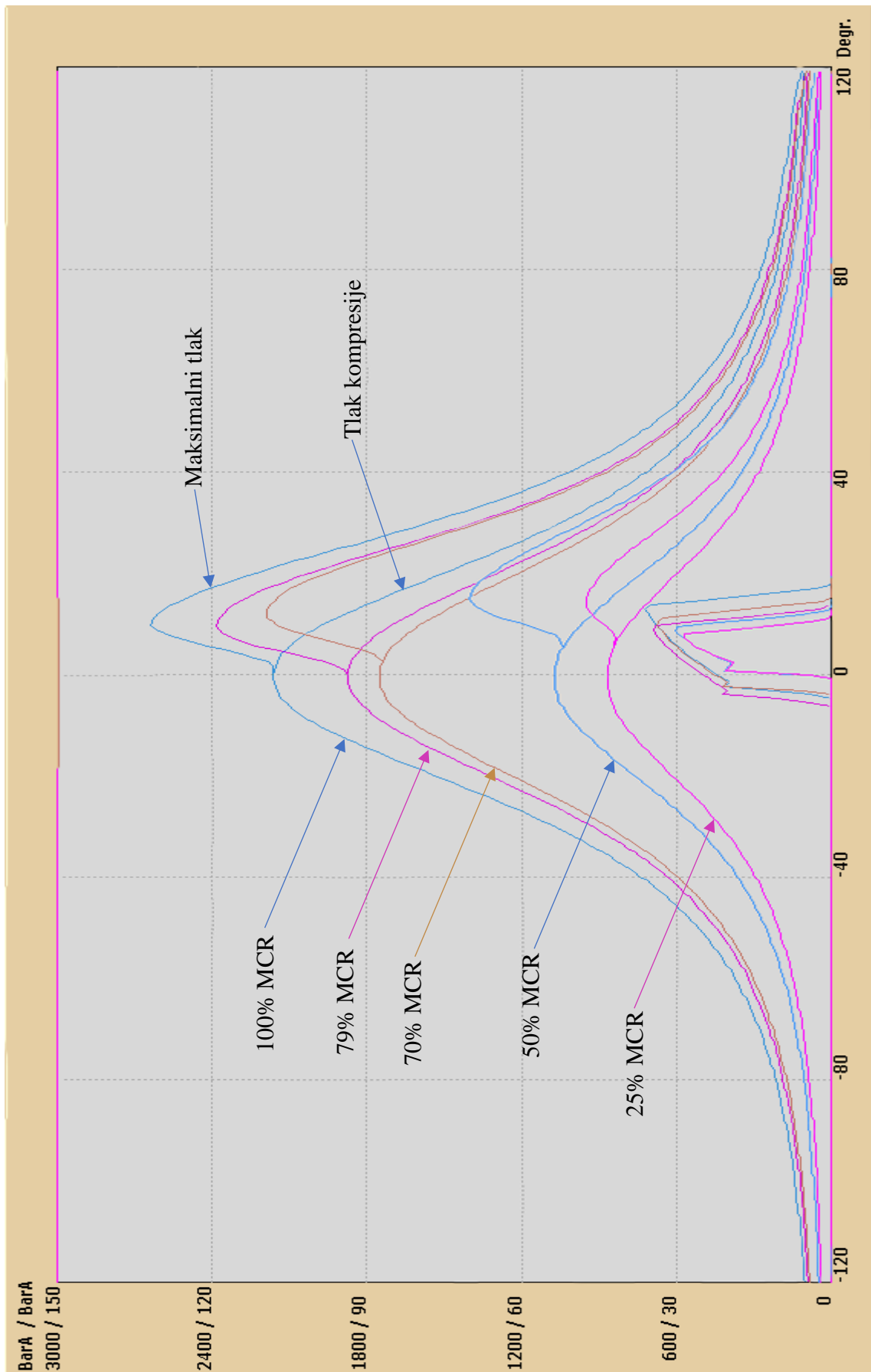
4.1. Analiza parametara indikatorskih dijagrama

Indikatorski dijagram je dijagram koji se snima za vrijeme rada broskog motora te se upotrebljava u dijagnostičke svrhe. Snimanjem dijagrama dobiva se uvid u stanje i rad broskog motora. Iako postoji više vrsta indikatorskih dijagrama najčešći su otvoreni i zatvoreni [3].

Tablica 1 - Izmjereni parametri indikatorskog dijagrama za različite režime rada

Opterećenje	25%	25%	50%	75%	79%	100%
Parametri indikatorskog dijagrama:						
SPEED (o/min)	29,60	29,6	49,21	67,14	69,66	74
INDEKS (%)	22,78	22,22	27,81	45,21	48,39	56,81
MIP (bar)	3,54	3,37	7,08	13,07	14,09	16,02
IKW (kW)	324,23	308,42	1077,20	2714,40	3036,40	3665
TIGN (dgr - stupnjevi)	7,99	8	8	4,45	2,05	3,3
PMAX (bar)	48,13	47,43	70,10	109,32	119,70	132,30
TMAX (dgr - stupnjevi)	15,13	15,3	16	12,05	10,15	10,95
PCOMPR (bar)	43,74	43,55	53,82	87,41	93,83	108,94
PINJO (bar)	408	408	413,30	430,70	418,80	420
PINJM (bar)	580,05	577,88	612,78	681,50	692,60	718,6
TINJO (dgr - stupnjevi)	2	2	2	-1,47	-3,60	-1,72
Zakasnjelo paljenje (dgr - stupnjevi)	6,0	6,0	6,0	5,9	5,7	5,0

Tijekom snimanja indikatorskog dijagrama izvršeno je praćenje dodatnih parametara s kojima se lakše može razumjeti istoimeni dijagram. „SPEED“ predstavlja brzinu odnosno parametar kojim se dobiva informacija o broju okretaja glavnog motora. „INDEKS“ je parametar izražen u postotku te se odnosi na stupanj zakrenutosti klipa „plungera“ unutar kućišta visokotlačne pumpe goriva. Stupanj zakrenutost klipa visokotlačne pumpe goriva dobivamo preko digitalnog indikatora položaja baždarene poluge kojom se vrši zakret klipa ili se očita direktno sa skale na polužju pumpe. Položaj klipa unutar kućišta direktno djeluje na količinu goriva koja će se dovesti u cilindar za izgaranje. „MIP“ odnosno „mean indicated pressure“ predstavlja srednji indicirani tlak. Ovaj parametar je teoretske prirode te predstavlja zamišljenu vrijednost srednjeg tlaka tijekom cijelog procesa koji za cijelo vrijeme jednog okretaja djeluje na klip [4]. „IKW“ predstavlja dobivenu indiciranu snagu jednog cilindra izraženu u kW (na kojem je izvršeno mjerenje). „TIGN“ odnosno „time of ignition“ predstavlja trenutak početka izgaranja te se prikazuje uz pomoć kuta koljeničastog vratila. „P_{MAX}“ odnosno „maximum pressure“ je maksimalni tlak koji se postigne za vrijeme izgaranja goriva. „T_{MAX}“ predstavlja trenutak u kojem se dogodi maksimalni tlak unutar cilindra te se izražava uz pomoć kuta koljeničaste osovine. „P_{COMP}“ odnosno tlak kompresije je tlak kojeg zrak za izgaranje dosegne na kraju kompresijskog takta. „P_{INJO}“ je tlak pri kojem se otvara igla rasprskavača te se izražava u barima. „P_{INJM}“ predstavlja maksimalni tlak ubrizgavanja te je također izražen u barima. „T_{INJO}“ je parametar koji predstavlja trenutak u kojem se podigla igla rasprskavača odnosno trenutak u kojem se rasprskavač otvorio.



Slika 3 - Prikaz otvorenih indikatorskih dijagrama – usporedba različitih režima

Usporedbom otvorenih indikatorskih dijagrama za različite režime rada mogu se uočiti određene promjene. Najuočljivije promjene se mogu vidjeti u tlaku kompresije te maksimalnom tlak.

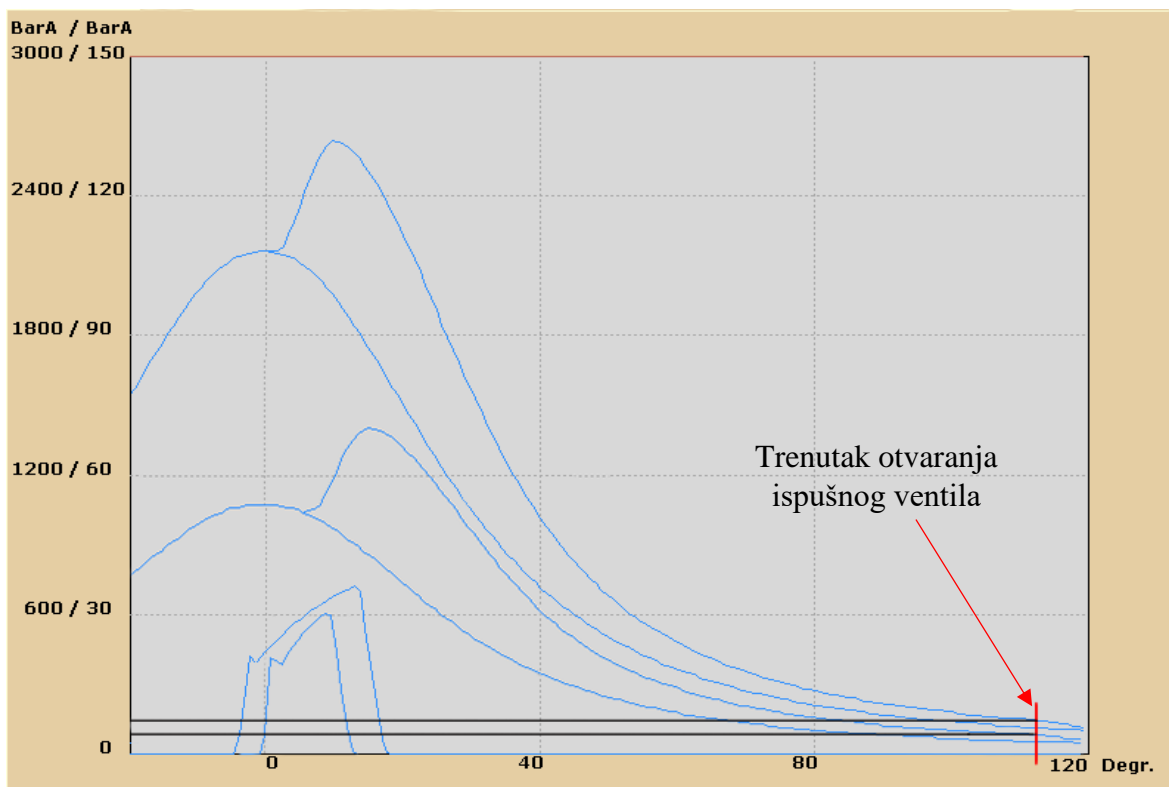
Tlak kompresije je tlak kojega klip stvori svojom kretnjom od donje mrtve točke do gornje mrtve točke. Klip na tom putu komprimira zrak koji će se upotrijebiti za izgaranje goriva. Za potpuno izgaranje goriva omjer goriva i zraka mora biti zadovoljavajući. Danas se na sporookretnim motorima u motor dovodi i do tri puta veća količina zraka od idealno potrebne. Ako se dogodi da je zraka premalo, motor nema potpuno izgaranje, dimi i ne može razviti projektiranu snagu. Iz ove pretpostavke se može zaključiti da u slučaju kada je potrebna veća snaga broskog motora istom je potrebna veća količina zraka kao i goriva da bi se zadovoljio omjer goriva i zraka. Prema tome, ovisno o smanjenju ili povećanju opterećenja dolaziti će do promjene tlaka kompresije. Iz dijagrama se može uočiti da smanjenjem opterećenja, samim time i snage motora, dolazi do smanjenja tlaka kompresije. Kod povećanja opterećenja se događa obrnuta promjena.

Maksimalni tlak je tlak koji se postiže izgaranjem goriva. Ovaj parametar predstavlja najveći tlak koji nastaje uslijed izgaranja unutar cilindra glavnog motora. Tlak kompresije i maksimalni tlak su usko povezani što se također može vidjeti iz dijagrama. U situaciji kada je potrebno smanjiti opterećenje glavnog motora imamo manji zahtjev za snagom, stoga će se izgarati manja količina goriva. Odnosno biti će nam potrebna manja količina zraka za izgaranje. Iz otvorenog indikatorskog dijagrama se može uočiti opisana zavisnost maksimalnog tlaka i tlaka kompresije kroz različite režime rada.⁵

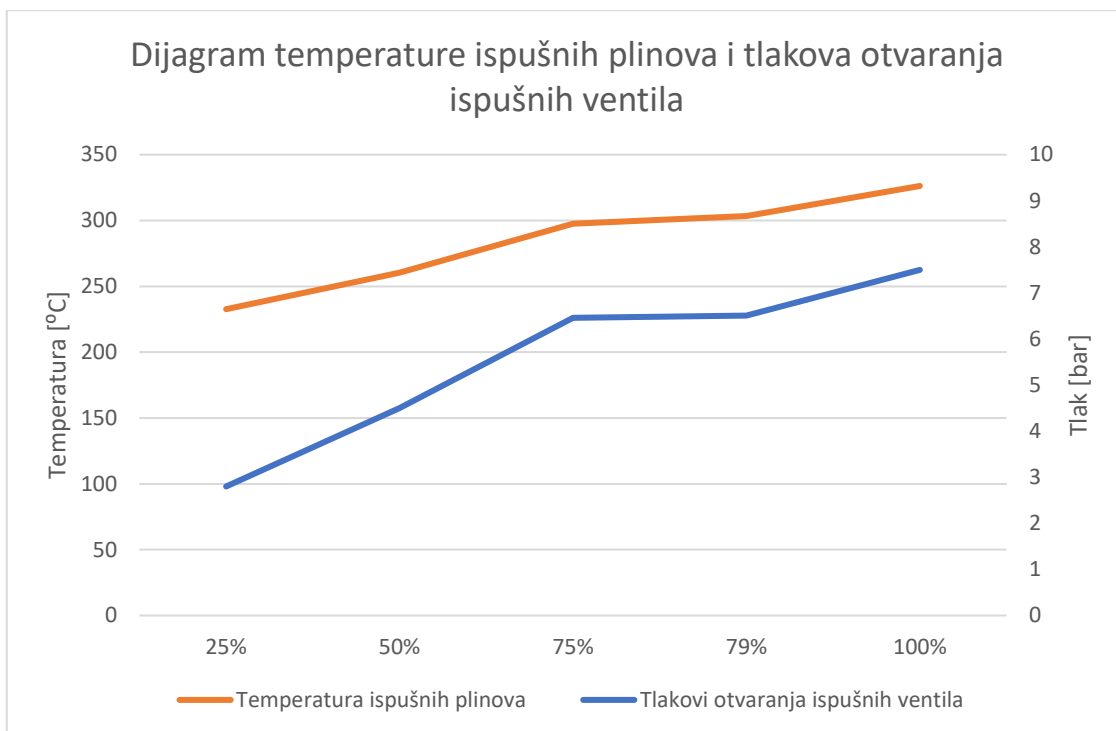
Uslijed izgaranja goriva unutar cilindra nastaju plinovi visoke temperature i tlaka. Takvi plinovi zatim potiskuju klip prema donjoj mrtvoj točki. Kretnja klipa prema donjoj mrtvoj točki izaziva povećanje volumena unutar cilindra što rezultira padom tlaka i temperature. Navedeni pad traje do trenutka kada se otvori ispušni ventil na približno 115° KV (koljeničastog vratila). Iz indikatorskog dijagrama je vidljiv utjecaj pozicije

⁵ Omjer P_{max}/P_{comp} daje bezdimenzionalni koeficijent koji nam pokazuje koliki je porast tlaka nakon kompresije. Taj koeficijent na određenom režimu rada mora tijekom cijelog eksploatacijskog vijeka motora ostati približno isti, odnosno ako se tijekom vremena zbog istrošenosti pojedinih dijelova smanji tlak kompresije te se za vrijednost tog koeficijenta smanji maksimalni tlak, to je pokazatelj da su svi dijelovi sustava ubrizgavanja u dobrom stanju. Ako se omjer poremeti u odnosu na vrijednost s probne vožnje, to je pokazatelj problema na sustavu ubrizgavanja.

maksimalnog tlaka na tlak u trenutku otvaranja ispušnog ventila. Odnosno veći tlak na ispušnom ventilu rezultirati će i većom temperaturom ispušnih plinova na izlazu iz glavnog motora. U slučaju smanjenja opterećenja doći će do pada maksimalnog tlaka što će rezultirati manjim tlakom na ispušnom ventilu kao i manjom temperatura ispušnih plinova. Variranjem odnosno promjenom početka ubrizgavanja mijenja se pozicija maksimalnog tlaka. Ranijim ubrizgavanjem pomiče se kut maksimalnog tlaka prema gornjoj mrtvoj točki te se povećava njegova vrijednost. Time se dobiva veća iskoristivost, ali zbog više temperature povećav se emisija NOx-a. Takav postupak ima i svoju granicu kada porast tlaka za 1° KV (koljениčastog vratila) prelazi 8 bara te mogu nastati detonacije koje mogu ozbiljno oštetiti stapni mehanizam zbog povećanih sila na isti.

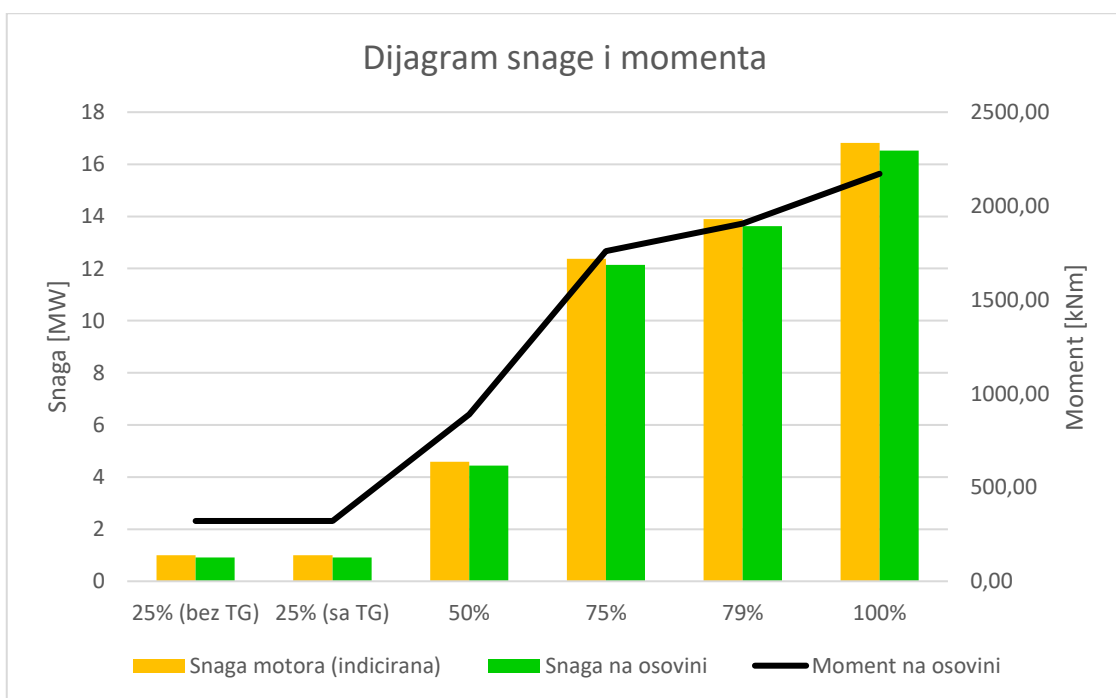


Slika 4 - Prikaz trenutka otvaranja ispušnih ventila te razlike tlakova u trenutku otvaranja ispušnog ventila



Slika 5 - Prikaz ovisnosti temperature ispušnih plinova i tlakova otvaranja ispušnih ventila

4.2. Analiza snage i momenta



Slika 6 - Prikaz snage i momenta glavnog motora, osovine

Dijagram snage i momenta nastoji vizualizirati odnos ova dva važna parametra glavnoga motora. Na dijagramu su prikazane dvije snage odnosno indicirana snaga

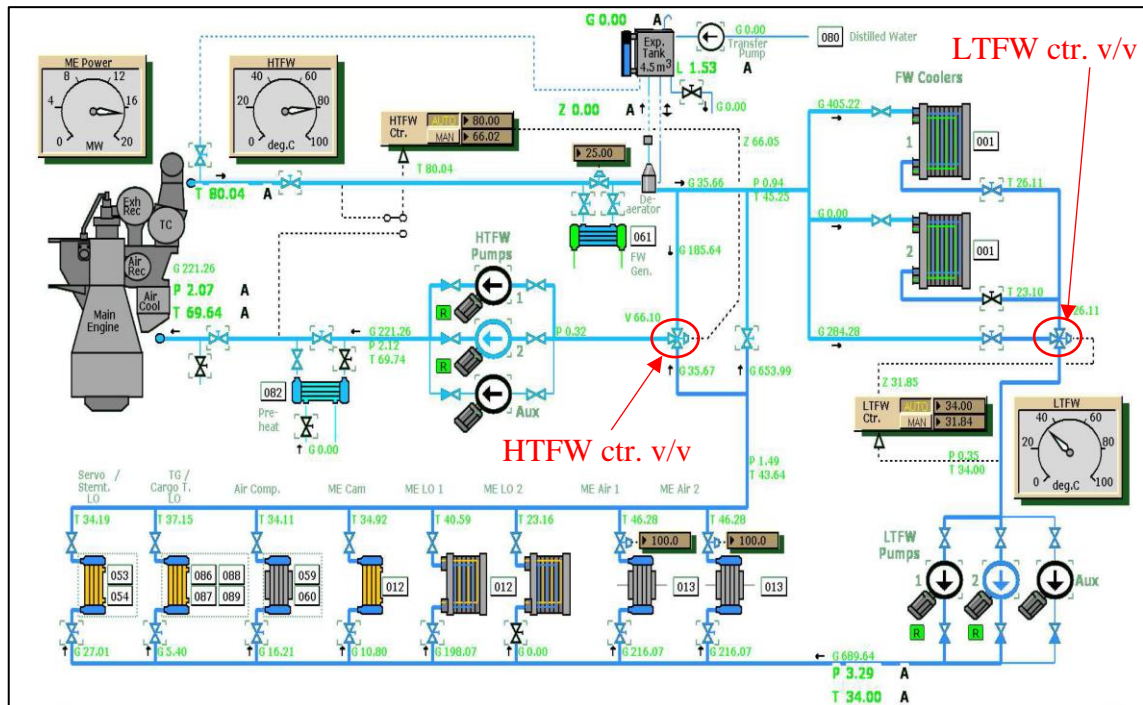
glavnog motora i snaga na osovini propelera. Prema razlici dvije snage može se uvidjeti koliki su mehanički gubici u prijenosu snage s glavnog motora na osovinu propelera. Osim snage na dijagramu se nalazi krivulja momenta na osovini kojom se nastoji predočiti veličinu generirane sile koja se koristi za potisak odnosno pogon broda.

Pri niskom opterećenju glavni motor stvara malu snagu od svega 1 megawat te je okretni moment također nizak. Daljnjim povećanjem opterećenja na 50% dolazi do strmijeg skoka u snazi s 1 MW na približno 4,5 MW te se u sličnom omjeru povećao i moment sa 300 kNm na približno 900 kNm. Na prijelazu opterećenja s 50% na 75% događa se najstrmiji porast momenta i snage što je vidljivo iz dijagrama. Snaga se povećala s 4,5 MW na približno 12 MW dok se moment povećao sa 900 kNm na približno 1700 kNm. Kako se nastavlja povećavati opterećenje glavnoga motora vrijednosti snage i momenta sporije rastu. Iz dijagrama se može uočiti kako je razlika u snazi između opterećenja od 75% do 100% nešto iznad 4 MW dok razlika u momentu iznosi približno 450 kNm.

Prema prikazanim podacima se može zaključiti kako bi optimalna snaga glavnog motora i moment na osovini bili pri opterećenju glavnog motora od 75%. Odnosno daljnjim povećanjem opterećenja se ne dobiva znatno veća snaga ili moment s obzirom na količinu goriva koju je potrebno izgorjeti da bi se isti postigli. Smanjenjem opterećenja ćemo izgarati manju količinu goriva, ali ćemo izgubiti gotovo 60% snage te 50% momenta na osovini.

4.3. Opis kontrolnih ventila rashladnog sustava slatke vode

Sustav rashladne slatke vode iznimno je bitan u normalnom radu brodskog pogona. Sustavom slatke vode se hlade svi pomoćni brodski uređaji te glavni motor. Isti se dijeli na visoko-temperaturni i nisko-temperaturni krug. U slučaju da je temperatura vode u visoko-temperaturnom krugu veća od zadane, kontrolni ventil visoko-temperaturnog kruga će otvoriti dovod vode iz nisko-temperaturnog kruga toliko da postigne zadanu temperaturu. Kada je temperatura niska, kontrolni ventil zatvoriti će dovod nisko-temperaturne vode kako bi se rashladna voda recirkulacijom zagrijala na zadanu vrijednost. Nisko-temperaturni krug također ima svoj kontrolni ventil temperature koji će u slučaju da je temperatura nisko-temperaturnog kruga veća od zadane usmjeriti protok slatke vode kroz rashladnike. Ako je temperatura rashladne vode niža od zadane ventil će protok usmjeriti kroz zaobilaznu „by pass“ liniju.

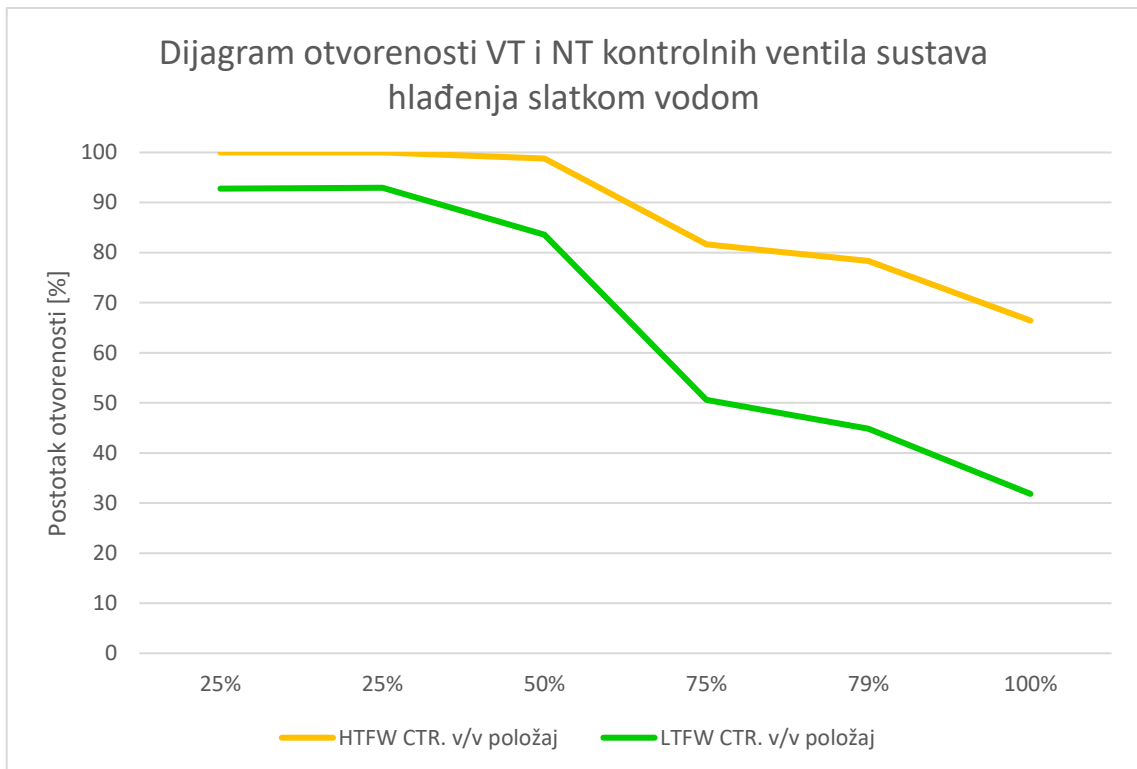


Slika 7 - Rashladni sustav slatke vode (NT i VT regulacijski ventili)[1]

Kontrolni ventili koji se nalaze u sustavu rashladne vode su troputnog tipa što znači da se između krajnjih pozicija može postaviti beskonačan broj položaja, a sve u cilju zadržavanja zadane temperature. Kada se kontrolni ventil visoko-temperaturnog kruga (eng. „HTFW ctr. v/v“) nalazi u položaju 100% otvoren to znači da je kontrolni ventil prekinuo dovod vode iz nisko-temperaturnog kruga. Odnosno temperatura visko-temperaturnog kruga je niža od zadane te u tom slučaju sustav nastoji recirkulirati vodu koja kruži kroz glavni motor nastojeći je zagrijati i tako postići zadanu temperaturu. Kada se ventil krene zatvarati doći će do miješanja nisko-temperaturne vode s visoko-temperaturnom.

Kada se kontrolni ventil nisko-temperaturnog kruga (eng. „LTFW ctr. v/v“) nalazi u položaju 100% otvoren to znači da sav protok rashladne vode prolazi kroz zaobilaznu „by pass“ liniju odnosno temperatura rashladne vode je niža od zadane. Sustav će nastojati recirkulacijom postići zadanu temperaturu. Kada dođe do zatvaranja ventila određeni dio rashladne vode će prolaziti kroz pripadajuće rashladnike. Važno je naglasiti da se ventili u normalnom načinu rada nalaze u međupoložajima odnosno nisu 100% otvoreni ili 100% zatvoreni. Osim u slučajevima vrlo visokih temperatura morske vode kada bez obzira na 100% protok kroz rashladnik nije moguće ohladiti nisko-temperaturni

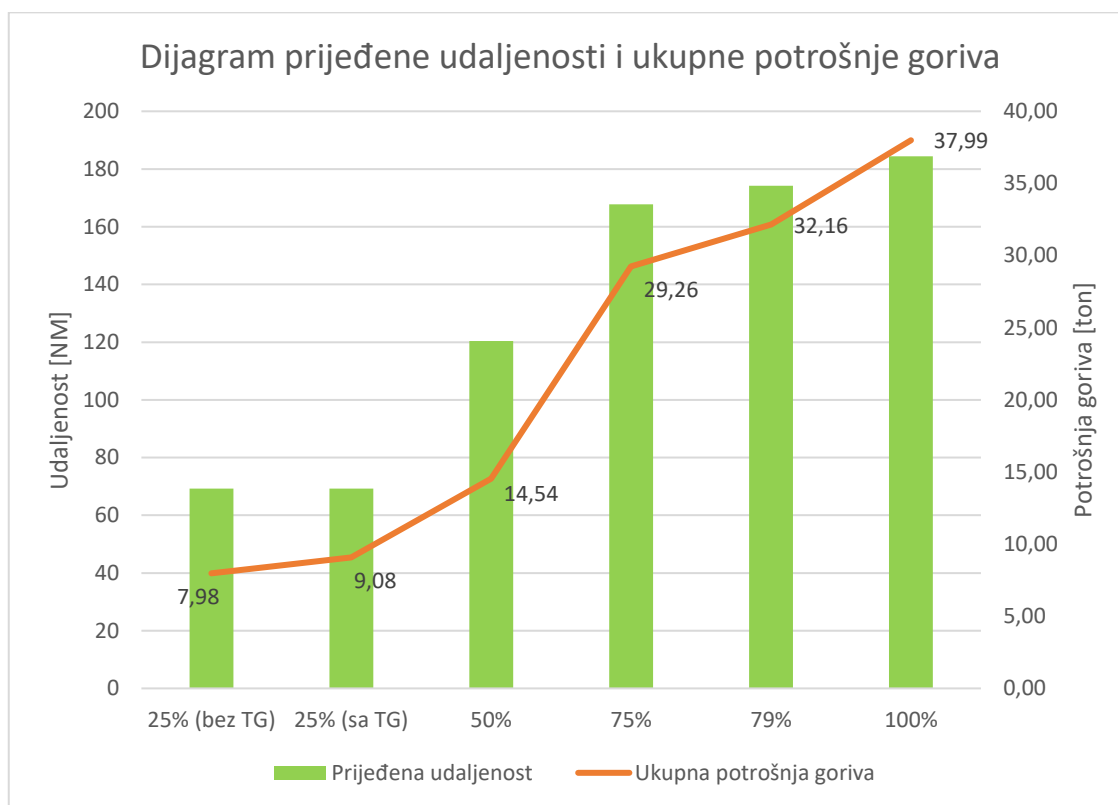
krug ispod 34°C. Ponekad temperature mora prelaze 34°C pa niti upotreba oba rashladnika nije dovoljna.



Slika 8 - Prikaz otvorenosti kontrolnih ventila ovisno o opterećenju

Dijagram prikazuje postotak otvorenosti visoko-temperaturnog i nisko-temperaturnog kontrolnog ventila u odnosu na opterećenje glavnog motora, a samim time i ostatka pogona (broda kao cjeline). Iz prikazanih podataka može se uočiti da pri niskim opterećenjima, pogon nije u stanju stvoriti veliku količinu topline stoga je visoko-temperaturni kontrolni ventil otvoren 100% dok je nisko-temperaturni kontrolni ventil otvoren oko 92%. Kako se povećava opterećenje, pogon počinje generirati veću količinu topline koju treba odvesti rashladnom vodom odnosno morem. Sukladno tome kontrolni ventili se počinju zatvarati. Zatvaranjem kontrolnih ventila se omogućuje hlađenje visoko-temperaturne vode s nisko-temperaturnom vodom te prolaz nisko-temperaturne vode kroz pripadajuće rashladnike.

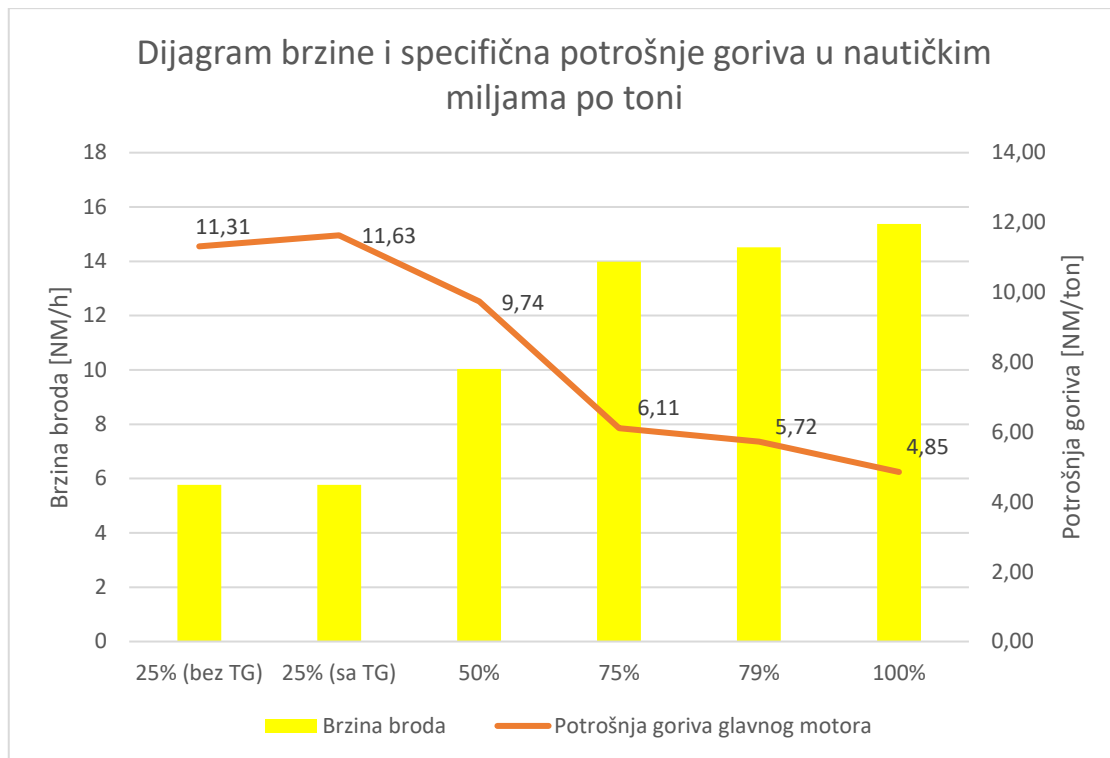
4.4. Analiza prijeđene udaljenosti i ukupne potrošnje goriva



Slika 9 - Prikaz prijeđene udaljenosti i ukupne potrošnje goriva

Grafički izraženim podacima u dijagramu nastoji se predočiti veza između prijeđene udaljenosti broda i ukupne potrošnje goriva. Pri niskim opterećenjima glavnoga motora može se uočiti kako je prijeđena udaljenost svega 70 nautičkih milja iako je ukupna potrošnja goriva svega 7,98 tona. Razlika između dva mjerenja opterećenja od 25% se ogleda kroz dodatnu potrošnju generatora pare. Prilikom prijelaza s 25% na 50% opterećenja glavnoga motora može se uočiti kako se ukupna potrošnja povećala za 5,5 tona te se prijeđena udaljenost povećala za 50 nautičkih milja. Povećanjem opterećenja na 75% ukupna potrošnja naglo raste odnosno povećava se za približno 14,5 tona dok se za navedenu količinu goriva prešlo svega 45 nautičkih milja. Iako se daljnjim povećanjem opterećenja smanjuje stopa rasta ukupne potrošnje goriva iz dijagrama je vidljivo koliko je mala razlika između prijeđene udaljenosti na 75% opterećenja i 100% opterećenja.

Prikazani podaci ukazuju da je pri najmanjem opterećenju najmanja potrošnja što je i očekivano. Iz dijagrama je jasno vidljivo kako je najveći porast brzine s obzirom na ukupnu potrošnju goriva na 50% MCR-a. Povećanje brzine utječe na brži dolazak broda u luku te smanjenje ukupnih troškova broda, stoga se taj režim može uzeti kao optimalan, ali to nije predmet istraživanja u ovom radu jer zahtijeva vrlo opsežnu analizu svih troškova broda po danu.



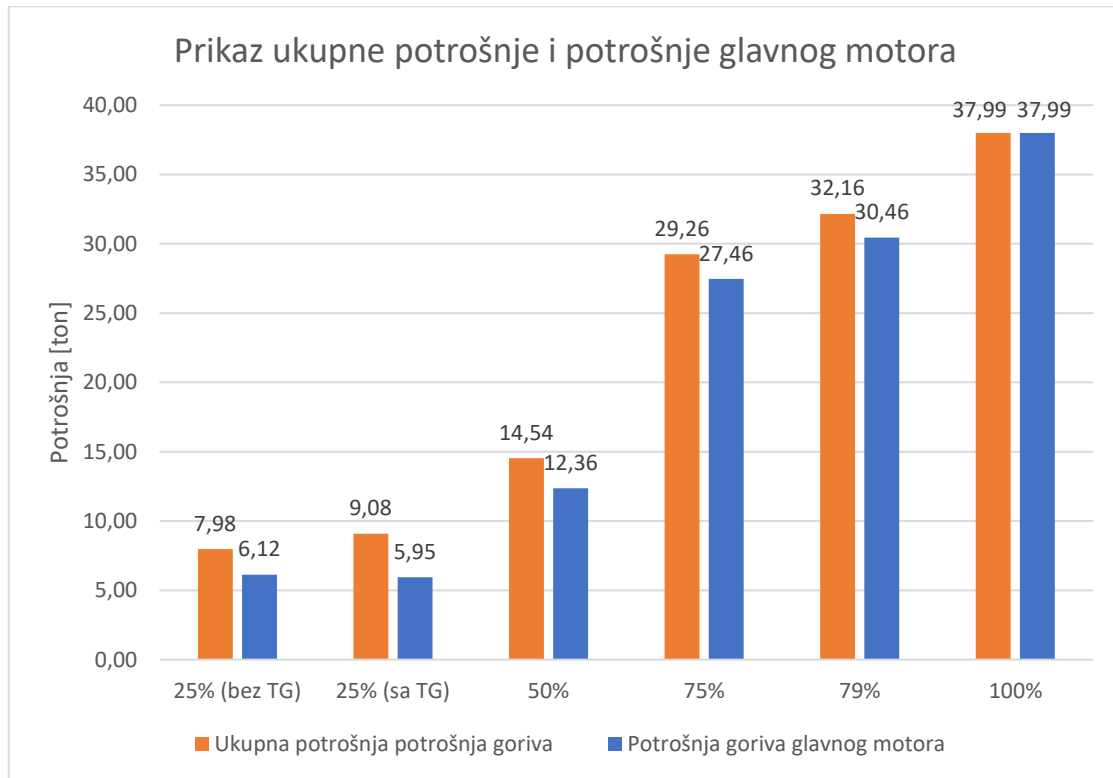
Slika 10 - Prikaz brzine i specifične potrošnje goriva

Priloženi dijagram nadopunjuje opis dijagrama prijeđene udaljenosti i ukupne potrošnje tako što prikazuje brzine za svako radno opterećenje te pripadnu specifičnu potrošnju. Specifična potrošnja prikazana je kao omjer nautičkih milja po toni odnosno koliko je nautičkih milja moguće prijeći uz potrošnju jedne tone goriva.

Iz dijagrama brzine i specifične potrošnje je vidljivo kako se opterećenje glavnog motora od 25% može smatrati optimalnom vrijednosti ako se kao glavni cilj uzme pređena udaljenost po toni goriva, ne uzimajući u obzir ostale troškove broda.

4.5. Analiza utjecaja opterećenja na potrošnju pomoćnih uređaja

Ukupna potrošnja goriva je pojam kojim se nastoji predočiti potrošnja goriva svih potrošača tj. glavnog motora te svih ostalih pomoćnih strojeva. Potrošnja goriva je vrlo bitan parametar jer se na osnovu iste proračunava potrebna količina goriva za putovanje broda i radi financijska bilanca isplativosti broda.



Slika 11 - Prikaz ukupne potrošnje goriva i potrošnje goriva glavnoga motora

Dijagram prikazuje odnos potrošnje goriva glavnog motora i ukupne potrošnje goriva. Pod pojmom ukupne potrošnje se ubrajaju potrošnja glavnog motora i potrošnja pomoćnih strojeva. Potrošnja pomoćnih strojeva obuhvaća potrošnju dizelskih generatora i generatora pare. Parametri su praćeni za radna opterećenja glavnog motora od 25%, 50%, 75%, 79% i 100%. Kod opterećenja od 25% izvedeno je mjerenje kada je turbogenerator spojen na mrežu te kada nije spojen na mrežu.

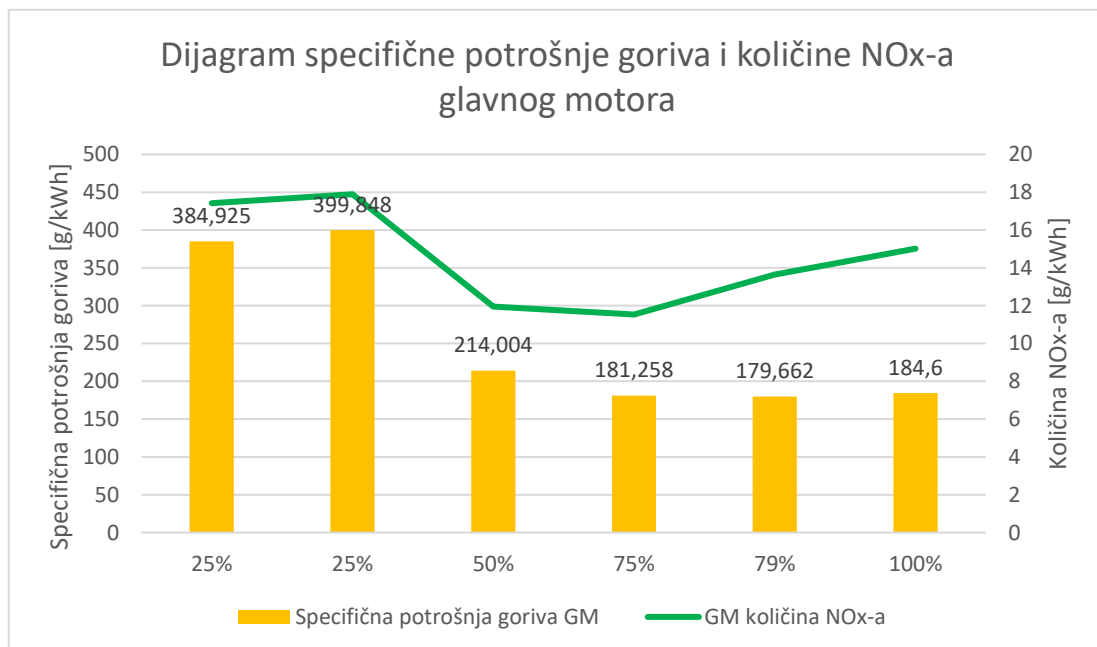
Pri radnom opterećenju glavnog motora od 25% može se uočiti kako je ukupna potrošnja veća od potrošnje glavnoga motora. Razlika u potrošnji se očituje kroz rad dizelskih generatora kao i generatora pare. Razlika između dva mjerena opterećenja na 25% odnosi na potrošnju generatora pare. Kada se na mreži nalazi turbo-generator za isti je potrebna para. Para se pri većim opterećenjima proizvodi uz pomoć topline ispušnih plinova koje stvara glavni motora. Pošto je glavni motor na niskom opterećenju dolazi do

smanjenja količine ispušnih plinova koji su također niže temperature. Uslijed nedostatka topline za proizvodnju pare upućuje se loženi generator pare kako bi nadomjestio nedostatak pare za pogon turbo-generatora. Opisana razlika se može uočiti uz pomoć dijagrama.

Glavni motor pri opterećenju od 50% proizvodi veću količinu ispušnih plinova koji su veće temperature nego pri opterećenju od 25%. Većom temperaturom ispušnih plinova se osigurava dostatna toplina za proizvodnju pare unutar generatora pare na ispušne plinove. Povećana količina pare koja se dovodi za pogon turbo-generatora omogućuje turbo-generatoru preuzimanje većeg opterećenje električne mreže. Prijelaz opterećenja s dizelskih generatora na turbo-generator izaziva njihovo zaustavljanje što znači da pri radnom opterećenju glavnog motora od 50% samo generator pare troši gorivo jer električnu energiju proizvode osovinski i turbo-generator.

Daljnjim porastom opterećenja dolazi do daljnjeg povećanja količine ispušnih plinova koji se koriste za proizvodnju pare te se potrošnja pomoćnih strojeva sve više i više smanjuje. Potrošnja pomoćnih strojeva doći će na minimum odnosno nulu kada motor radi pri opterećenju od 100%.

4.6. Analiza količine NO_x-a i specifične potrošnje goriva glavnog motora



Slika 12 - Prikaz specifične potrošnje goriva i količine NO_x-a glavnog motora

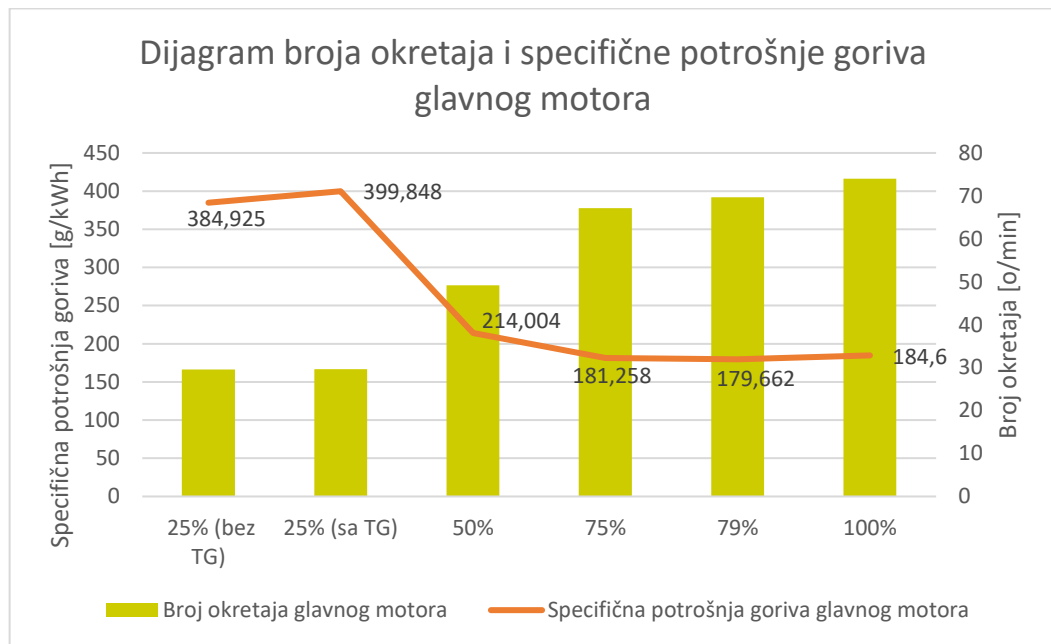
Tijekom procesa izgaranja goriva javljaju se mnogi nusprodukti. Kao jedan od takvih su dušični oksidi. Kako je zrak neophodan za izgaranje goriva, a isti se sastoji od 21% kisika te 78% dušika tijekom procesa izgaranja dolazi do spajanja određenog dijela dušika s kisikom. Da bi proces spajanja dušika i kisika bio uspješan potrebni su određeni radni uvjeti. Stvaranje dušičnih oksida može biti izazvano visokim temperaturama i tlakovima za vrijeme izgaranja, prevelikim opterećenjem motora, nepravilnim omjerom goriva i zraka te lošom kvalitetom goriva [6].

Utjecaj dušičnih oksida na prirodu se očituje kroz smanjenje prinosa, oštećenje listova biljaka kao i povećanje osjetljivosti biljaka na razne bolesti te niske temperature. Svojim prisustvom u atmosferi također pridonose formiranju kiselih kiša. Dušični oksidi su posebno pogodni za stvaranje efekta staklenika zato što su 300 puta efikasniji od ugljikovog dioksida u zarobljavanju topline u atmosferi. Brodarska industrija se smatra odgovornom za 18 do 30% globalne emisije dušičnih oksida te se raznim propisima i dizajnima pogona ta količina nastoji smanjiti [5] [7].

Specifična potrošnja goriva je parametar kojim se nastoji predočiti kolika je količina goriva potrebna za proizvodnju jednog kilowata snage u periodu od jednog sata. Ovako prikazana potrošnja goriva daje nam uvid pri kojem opterećenju pogona se gorivo najbolje iskorištava odnosno na kojem je opterećenju pogon najefikasniji. Treba napomenuti kako na specifičnu potrošnju goriva utječu razni čimbenici poput uronjenosti broda (gaz), vjetar, valovi, obraštanje trupa i sl.

Povezivanjem podataka specifične potrošnje goriva i količine dušičnih oksida može se odrediti ekološki i ekonomski najefikasnije područje rada. Prema dijagramu najmanja potrošnja goriva bi se odvijala pri radnom opterećenju od 79% iako je tada nešto veća specifična količina proizvedenih dušičnih oksida. Pri radnom opterećenju od 75% dolazi do potrošnje koja je za par grama veća, ali zato imamo znatnije smanjenje specifične količine dušičnih oksida. Stoga se iz dijagrama može zaključiti kako bi najpoželjniji režim opterećenja s aspekta ekonomičnosti i ekologije bio režim na 75% radnog opterećenja.

4.7. Analiza broja okretaja i specifične potrošnje goriva glavnog motora



Slika 13 - Prikaz specifične potrošnje goriva i broja okretaja glavnog motora

Dijagram prikazuje odnos broja okretaja glavnog motora te specifične potrošnje goriva ovisno o opterećenju. Broj okretaja je vrlo važan parametar zato što njegova vrijednost uvelike utječe na iskoristivost broskog propelera kao i osovinskog („shaft“) generatora. Iako je osovinski („shaft“) generator spojen na glavni motor preko pripadnog reduktora (multiplikatora) isti zahtijeva minimalan broj okretaja koji mu je potreban za rad. Stoga glavni motor mora postići određeni broj okretaja potreban za funkcionalnost osovinskog („shaft“) generatora. Korištenjem osovinskog („shaft“) generatora se također pozitivno utječe na ukupnu potrošnju pogona⁶.

Iz dijagrama je vidljivo kako je broj okretaja glavnog motora vrlo nizak pri niskom opterećenju dok je specifična potrošnja iznimno visoka. Prilikom prijelaza opterećenja sa 25% na 50% dolazi do naglog pada specifične potrošnje te do naglog porasta broja okretaja glavnoga motora. Daljnjim povećanjem opterećenja na 75%, specifična potrošnja pada, ali znatno manjom stopom dok se broj okretaja povećao za gotovo 25. Kako se opterećenje povećava do 100% dolazi do sporijeg rasta broja okretaja odnosno razlika između broja okretaja na opterećenju glavnog motora pri 75% i 100% iznosi

⁶ Korištenjem osovinskog generatora troši se dio snage glavnog motora. Budući da glavni motor ima veću iskoristivost nego pomoćni motori znači da se troši manje goriva za proizvodnju električne energije. Dodatna prednost takvog načina eksploatacije pogona je štednja koja se ogleda u znatno manjim radnim satima pomoćnih motora čime se znatno manje troše dijelovi pomoćnih motora.

približno 7 okretaja u minuti. Nakon optimalne radne točke od 79% MCR-a specifična potrošnja opet raste.

Prema prikazanim podacima može se uočiti kako je najoptimalniji rad glavnoga motora uzevši u obzir broj okretaja i specifičnu potrošnju onaj pri 79% opterećenja.

5. ZAKLJUČAK

Iz završnog rada može se uočiti kako promjena opterećenja utječe na ukupnu potrošnju goriva te na ostale parametre glavnoga motora, odnosno na koji način sustav goriva i sustav pare djeluju jedan na drugog kada dođe do promjene opterećenja.

Analiza ukupne potrošnje goriva prikazuje kako je pri niskom opterećenju ukupna potrošnja goriva mala. Iako glavni motor pri niskom opterećenju troši manju apsolutnu količinu goriva, isti razvija manji broj okretaja te stvara malu količinu ispušnih plinova koji su pritom niske temperature. Stoga pomoćni motori te loženi generator pare nastoje nadomjestiti manjak energije. Iz ove činjenice se može zaključiti kako pri niskom opterećenju dolazi do povećanja ukupne potrošnje goriva pomoćnih strojeva, iako GM apsolutno troši manje, ali specifično troši više.

Povećanjem opterećenja raste temperatura i količina ispušnih plinova koji se koriste za proizvodnju pare za pogon turbo-generatora preko utilizatora. Također, porastom opterećenja dolazi do povećanja broja okretaja glavnog motora što je izrazito važno za uporabu osovinskog generatora. Povećanje broja okretaja te povećanje količine ispušnih plinova omogućuje upućivanje osovinskog i turbo-generatora koji zatim preuzimaju ukupno opterećenje električne mreže te dizelski generatori nisu više potrebni.

Analizom ostalih parametara glavnoga motora može se primijetiti kako većina njih raste s porastom opterećenja. Iz indikatorskih dijagrama vidljivo je kako porastom opterećenja dolazi do porasta maksimalnog tlaka, tlaka kompresije, maksimalne temperature i sl. Također uslijed porasta opterećenja dolazi do ranijeg trenutka početka izgaranja. Parametri glavnog motora intenzivno rastu do opterećenja od 75% nakon čega se daljnjim povećanjem opterećenja intenzitet porasta smanjuje, odnosno omjer dobivenog i uloženog izlazi iz okvira optimalnog.

Prema dobivenim rezultatima može se zaključiti kako se optimalno radno opterećenje nalazi u području od 75% do 79%, stoga dodatno povećanje opterećenja nije opravdano. Ako se smanji opterećenje doći će do smanjenja ukupne potrošnje goriva, ali će tada doći do znatnog smanjenja učinkovitosti pogona.

LITERATURA

- [1] Operator's Manual for ERS MAN B&W 5L90MC-L11
- [2] Kongsberg K-Sim ERS – Model 5L90MC
- [3] <https://www.marineinsight.com/main-engine/understanding-indicator-diagram-and-different-types-of-indicator-diagram-deficiencies/>
- [4] <https://x-engineer.org/automotive-engineering/internal-combustion-engines/ice-components-systems/mean-effective-pressure-mep/>
- [5] <https://theconversation.com/nitrogen-pollution-the-forgotten-element-of-climate-change-69348>
- [6] <https://www.marineinsight.com/maritime-law/what-is-nitrogen-oxides-or-nox-air-pollution-from-ships/>
- [7] <https://seanews.co.uk/features/shipping-industry-and-the-nox-emissions/>

POPIS SLIKA

Slika 1 - Prikaz sheme goriva glavnog i pomoćnih motora te loženog generatora pare... 8	8
Slika 2 - Prikaz sustava pare	15
Slika 3 - Prikaz otvorenih indikatorskih dijagrama – usporedba različitih režima.....	18
Slika 4 - Prikaz trenutka otvaranja ispušnih ventila te razlike tlakova u trenutku otvaranja ispušnog ventila	20
Slika 5 - Prikaz ovisnosti temperature ispušnih plinova i tlakova otvaranja ispušnih ventila.....	21
Slika 6 - Prikaz snage i momenta glavnog motora, osovine	21
Slika 7 - Rashladni sustav slatke vode (NT i VT regulacijski ventili)[1].....	23
Slika 8 - Prikaz otvorenosti kontrolnih ventila ovisno o opterećenju	24
Slika 9 - Prikaz prijeđene udaljenosti i ukupne potrošnje goriva	25
Slika 10 - Prikaz brzine i specifične potrošnje goriva	26
Slika 11 - Prikaz ukupne potrošnje goriva i potrošnje goriva glavnoga motora.....	27
Slika 12 - Prikaz specifične potrošnje goriva i količine NOx-a glavnog motora	28
Slika 13 - Prikaz specifične potrošnje goriva i broja okretaja glavnog motora	30

POPIS TABLICA

Tablica 1 - Izmjereni parametri indikatorskog dijagrama za različite režime rada	16
--	----