

# Utjecaj turbo-puhala na rad glavnog motora

---

Načinović, Tino

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:187:867721>

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

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



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

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U RIJECI  
POMORSKI FAKULTET

**TINO NAČINOVIĆ**

**UTJECAJ TURBO-PUHALA NA RAD GLAVNOG MOTORA  
ZAVRŠNI RAD**

RIJEKA, 2022.

SVEUČILIŠTE U RIJECI  
POMORSKI FAKULTET

**UTJECAJ TURBO-PUHALA NA RAD GLAVNOG MOTORA**  
**INFLUENCE OF TURBO-BLOWER ON MAIN ENGINE**  
**OPERATION**

**ZAVRŠNI RAD**

Kolegij: Rad na simulatoru 1

Mentor: Izv. prof. dr. sc. Dean Bernečić

Student: Tino Načinović

Studijski program: Brodostrojarstvo

JMBAG: 0112079882

**Rijeka, Lipanj 2022.**

Student: Tino Načinović

Studijski program: Brodostrojarstvo

JMBAG: 0112079882

### **IZJAVA**

Kojom izjavljujem da sam završni rad s naslovom „Utjecaj turbo-puhala na rad glavnog motora“ izradio samostalno pod mentorstvom izv. prof. dr. sc. Deana Bernečića.

U radu sam primijenio metodologiju znanstvenoistraživačkog rada i koristio literaturu koja je navedena na kraju završnog rada. Tuđe spoznaje, stavove, zaključke, teorije i zakonitosti koje sam izravno ili parafrazirajući naveo u završnom radu na uobičajen, standardan način citirao sam i povezo s fusnotama i korištenim bibliografskim jedinicama. Rad je pisan u duhu hrvatskoga jezika.

Suglasan sam s objavom završnog rada na službenim stranicama Fakulteta.

Student



Student: Tino Načinović

Studijski program: Brodostrojarstvo

JMBAG: 0112079882

**IZJAVA STUDENTA – AUTORA**  
**O JAVNOJ OBJAVI OBRANJENOG ZAVRŠNOG RADA**

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

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

Student - autor



## **Sažetak/Summary**

U radu je opisano turbo-puhalo (TP), princip rada TP te utjecajem na rad dvotaktnog sporookretnog dizelskog brodskog motora. Opisana je fizička konstrukcija samog turbo-puhala te način na koji njegov rad doprinosi radu glavnog motora. Također je pojašnjena pojava pumpanja turbo-puhala. Objasnjeno je indikatorski dijagram kao vrlo važan segment današnje dijagnostike kvarova te praćenja rada brodskog motora

Ključne riječi: glavni motor, turbo-puhalo, zaprljanje

In this paper the turbo blower is described as well as working principle and its effects to the two-stroke slow-speed marine diesel engine. Physical construction of a turbo blower is described and the effect of its performance on the performance of the main engine, also the phenomenon of the turbo-blower surge is described. Indicator diagram is presented as well because of its importance in today's malfunction diagnostics and monitoring of the marine engine.

Key words: main engine, performance, turbo blower

# SADRŽAJ

<b>1. UVOD .....</b>	<b>1</b>
<b>2. ULOGA TURBO-PUHALA NA RAD MOTORA S UNUTARNJIM IZGARANJEM.....</b>	<b>2</b>
<b>2.1 Tehnička izvedba .....</b>	<b>2</b>
<b>2.2 Princip rada.....</b>	<b>4</b>
<b>3. UTJECAJ TURBO-PUHALA NA RAD GLAVNOG MOTORA.....</b>	<b>8</b>
<b>3.1. Zaprljanje turbo-puhala .....</b>	<b>9</b>
3.1.1. Zaprljanje zračne strane turbo-puhala.....	10
3.1.2. Zaprljanje turbinske strane turbo-puhala .....	12
3.1.3. Zaprljanje filtra turbo-puhala.....	14
3.1.4. Rad glavnog motora bez jednog turbo-puhala.....	15
3.1.5. Indikatorski dijagram.....	17
<b>3.2. Dijagrami izvedeni na temelju tablica zaprljanja.....</b>	<b>19</b>
<b>4. PUMPANJE .....</b>	<b>26</b>
<b>5. ZAKLJUČAK .....</b>	<b>28</b>
<b>POPIS LITERATURE .....</b>	<b>29</b>
<b>POPIS SLIKA .....</b>	<b>30</b>
<b>POPIS TABLICA .....</b>	<b>31</b>

## 1. UVOD

Ovaj rad bavit će se opisivanjem turbo-puhala, njegovim principom rada te utjecajem na rad dvotaktnog sporookretnog dizelskog brodskog motora. Opisana će biti fizička konstrukcija samog turbo-puhala te način na koji njegov rad doprinosi radu glavnog motora. Također biti će pojašnjena pojava pumpanja turbo-puhala. Biti će objašnjen i indikatorski dijagram kao vrlo važan segment dijagnostike kvarova te praćenja rada brodskog motora.

Turbo-puhalo je dio sustava ispirnog zraka glavnog motora te je neophodan za njegov rad. Veći brodski pogoni imaju po dva turbo-puhala na glavnom motoru te oba istovremeno dobavljaju zrak za izgaranje.

Simulacijski dio rada vršit će se na Kongsberg-ovom simulatoru brodske strojarnice i pogona gdje će se mijenjati parametri zaprljanja turbo-puhala i snimati rezultati promjena.

Glavni cilj ovog rada je analizirati kako promjena pojedinih parametara turbo-puhala utječe na rad glavnog motora te prikupiti podatke koristeći simulacijski program. Podaci će biti selektirani i analizirani kako bi se izveli odgovarajući zaključci.



## 2. ULOGA TURBO-PUHALA NA RAD MOTORA S UNUTARNJIM IZGARANJEM

### 2.1 Tehnička izvedba

Turbo-puhalo se sastoji od dvije glavne komponente:

- Turbine,
- Kompresora.

Turbina i kompresor smješteni su na istoj osovini.



*Slika 1 Brodsko turbo-puhalo [1]*

Ukoliko plin ulazi u kolo rotora paralelno s osovinom te nakon izlaska iz rotora mijenja smjer onda je riječ o radijalnoj izvedbi turbo-puhala, a ukoliko nakon izlaska iz kompresora zrak nastavlja strujati paralelno s osovinom onda se radi o aksijalnom turbo-puhalu.

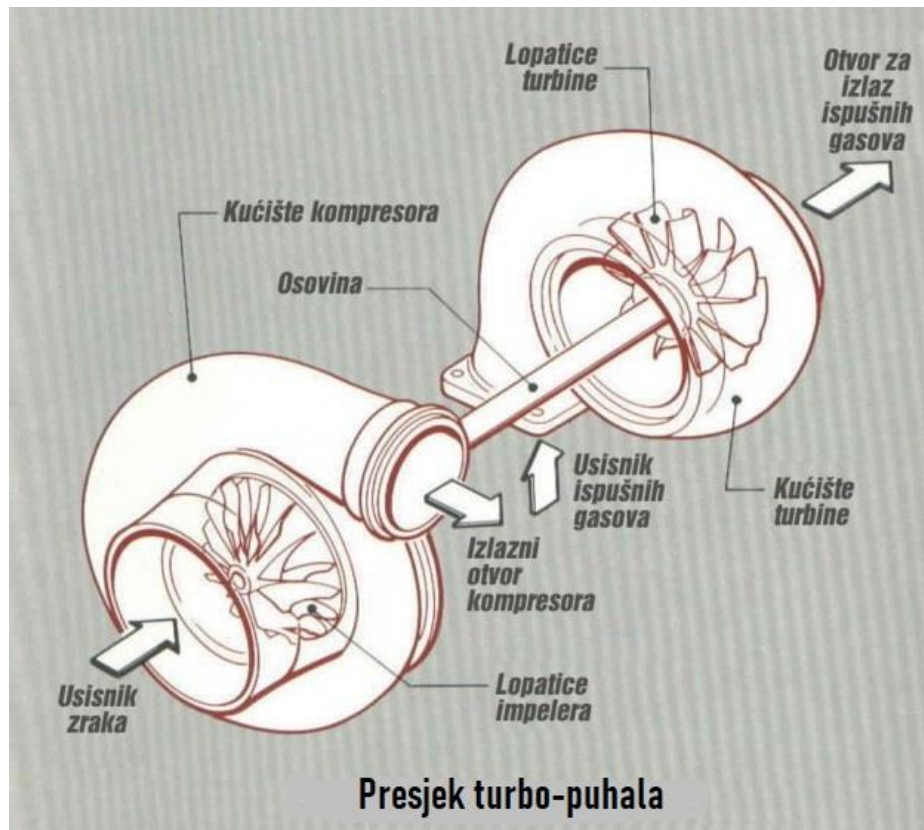
Hlađenje manjih turbo-puhala kao primjerice onih koji se koriste u automobilske industriji izvedeno je najčešće s protokom zraka izvana te uljem koje ujedno služi i za podmazivanje ležajeva. Moderne naprednije izvedbe turbo-puhala kao što su linije „GT“ i „GTX“

proizvođača „Garrett“ uz ulje za hlađenje također koriste i rashladnu vodu kako bi se poboljšalo hlađenje te dugotrajnost samog turbo-puhala [2].

Uloga prednabijanja kod motora s unutarnjim izgaranjem je povećanje mase zraka koja ulazi u cilindar i time postizanje veće snage u odnosu na motore bez prednabijanja.

Neke od prednosti prednabijanja su:

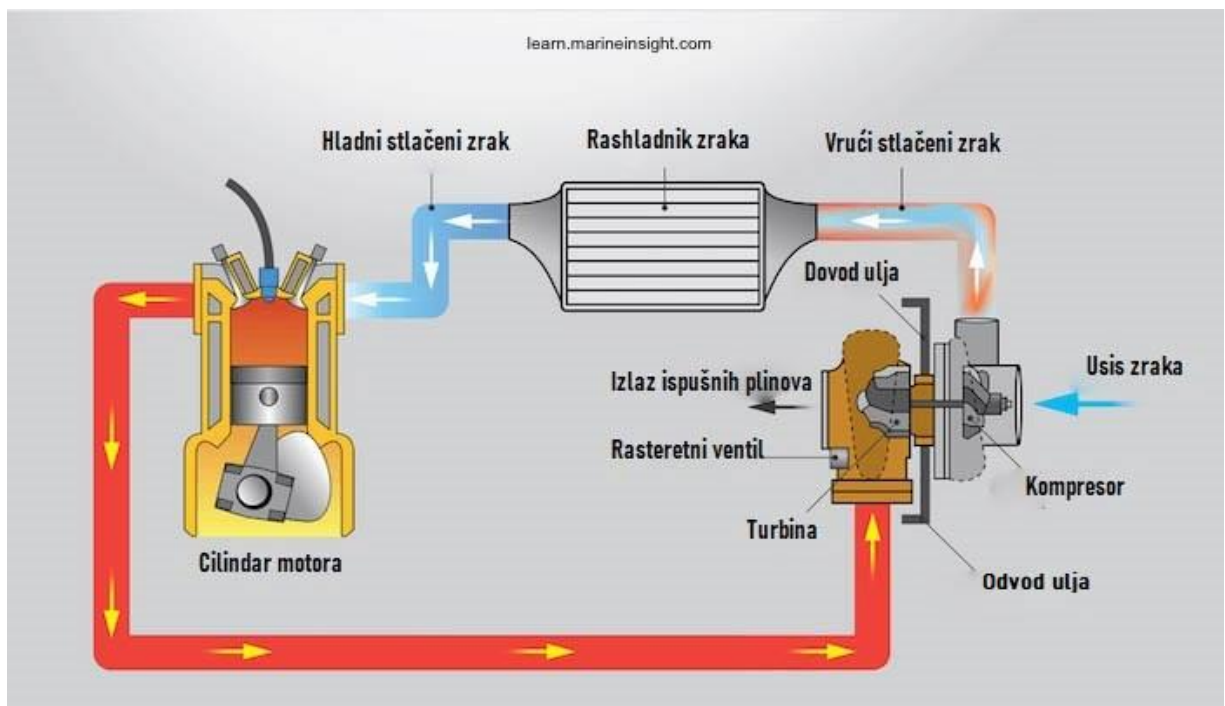
- veća efikasnost (smanjena potrošnja goriva),
- ušteda prostora za istu jediničnu snagu,
- veća specifična snaga.



Slika 2. Presjek turbo-puhala [3]

## 2.2 Princip rada

Rotor turbine je smješten na ispušnoj grani motora te se zakreće ispušnim plinovima motora, zakrećući istovremeno kompresor povezan s usisnom granom motora. Kompresor uvlači i tlači usisani zrak pod tlakom većim od atmosferskog kako bi veća količina mogla stati u komoru za izgaranje. Kompresor tlači zrak kroz hladnjak ("intercooler") te nakon njega ulazi u cilindar gdje izgara.



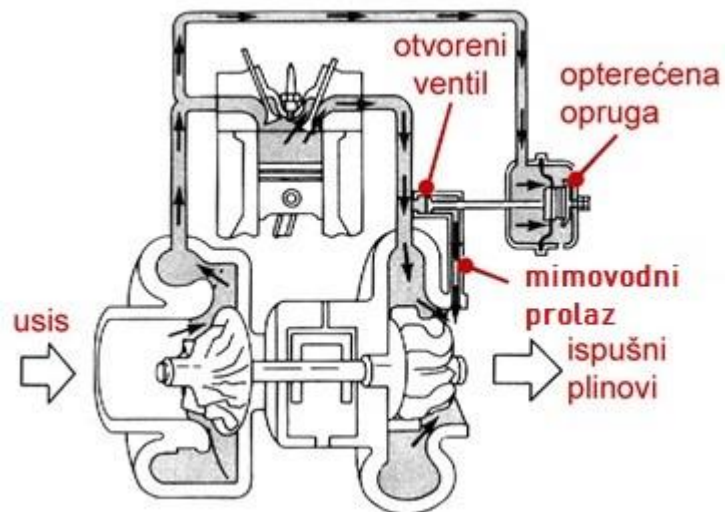
Slika 3 Sustav motora s turbo-puhalom [4]

Zrak se radijalnim lopaticama uvlači aksijalno u središte rotora kompresora i gura se radijalno po Bernulijevom principu. Rotacija rotora ubrzava brzinu zraka (kinetičku energiju) i tjera ga da prođe kroz difuzore i spiralno kućište. Ovdje se kinetička energija pretvara u potencijalnu energiju tlaka usporavajući brzinu zraka. Energija brzine se pretvara u energiju tlaka prema Bernoullijevom principu.



Slika 4 Lopatice kompresorske strane [5]

Tlak ispirnog zraka kod malih četverotaktnih motora regulira se sigurnosnim rasteretnim ventilom (eng. „*waste gate*“). Uloga ovog ventila je da propusti višak plinova izgaranja u atmosferu i time smanjuje tlak usisa. Rasteretni ventili su u većini slučajeva regulirani pneumatski pomoću membrane koja je pod direktnim pritiskom zraka iz puhala [6].



Slika 5 Prikaz protoka zraka kroz TP [7]

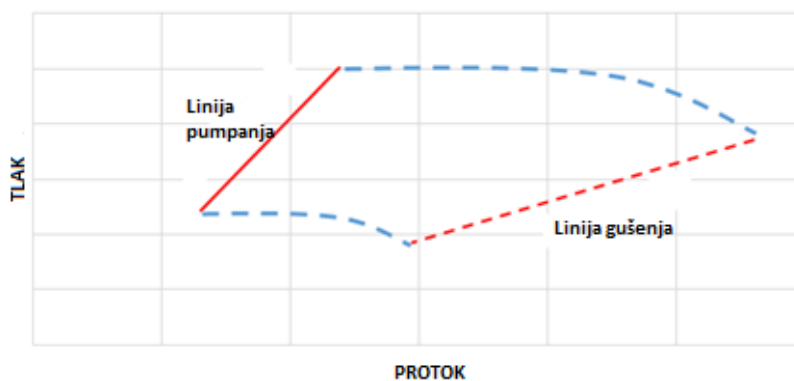


*Slika 6 Brodsko turbo-puhalo u strojarnici [5]*

Optimalni rad turbo-puhala postiže se kada puhalo radi unutar određenog raspona protoka zraka. Maksimalna učinkovitost za turbo-puhala proizvod je tlaka i protoka zraka, a ograničen je pumpanjem (eng. „surge“) i gušenjem (eng. „choke“).

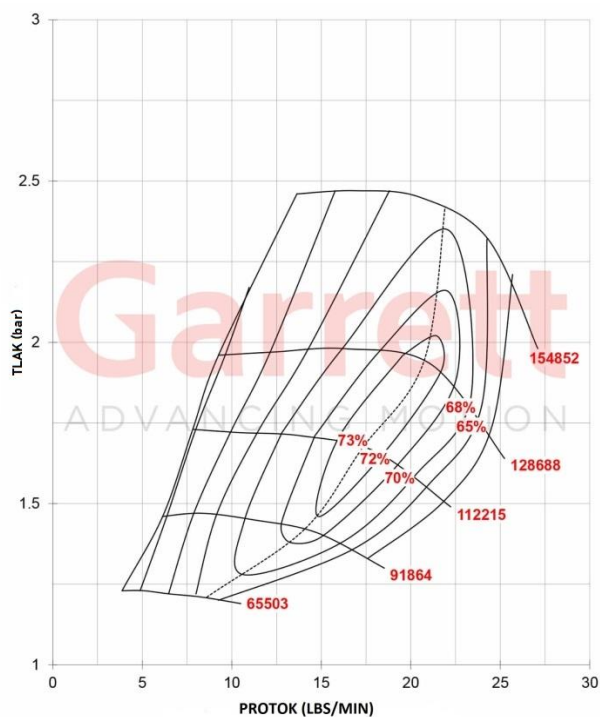
Udar je preokret protoka unutar dinamičkog procesa kompresije. Događa se kada se kapacitet smanji do točke u kojoj se stvara nedovoljan tlak za održavanje protoka. To znači da kako protok putuje kroz kompresor, tlak je dosegao maksimalnu granicu rotora kompresora. Budući da kompresor ne može prevladati tlak, protok zraka vraća se unatrag umjesto da se gura u sustav. To dovodi do udara što potencijalno može oštetiti unutarnje komponente.

Do gušenja protoka dolazi kada zrak dosegne brzinu zvuka na nekom dijelu turbine. Kako se puhalo koje radi konstantnom brzinom približava točki gušenja, proizvedeni tlak će pasti kako se protok približava brzini zvuka. Nakon točke gušenja se ne može proizvesti dodatni protok. Točke gušenja u različitim brzinama vrtnje definiraju liniju prigušnice, koja će biti maksimalno ograničenje korisnog radnog raspona puhala [8].



Slika 7 Dijagram pumpanje/gušenje [9]

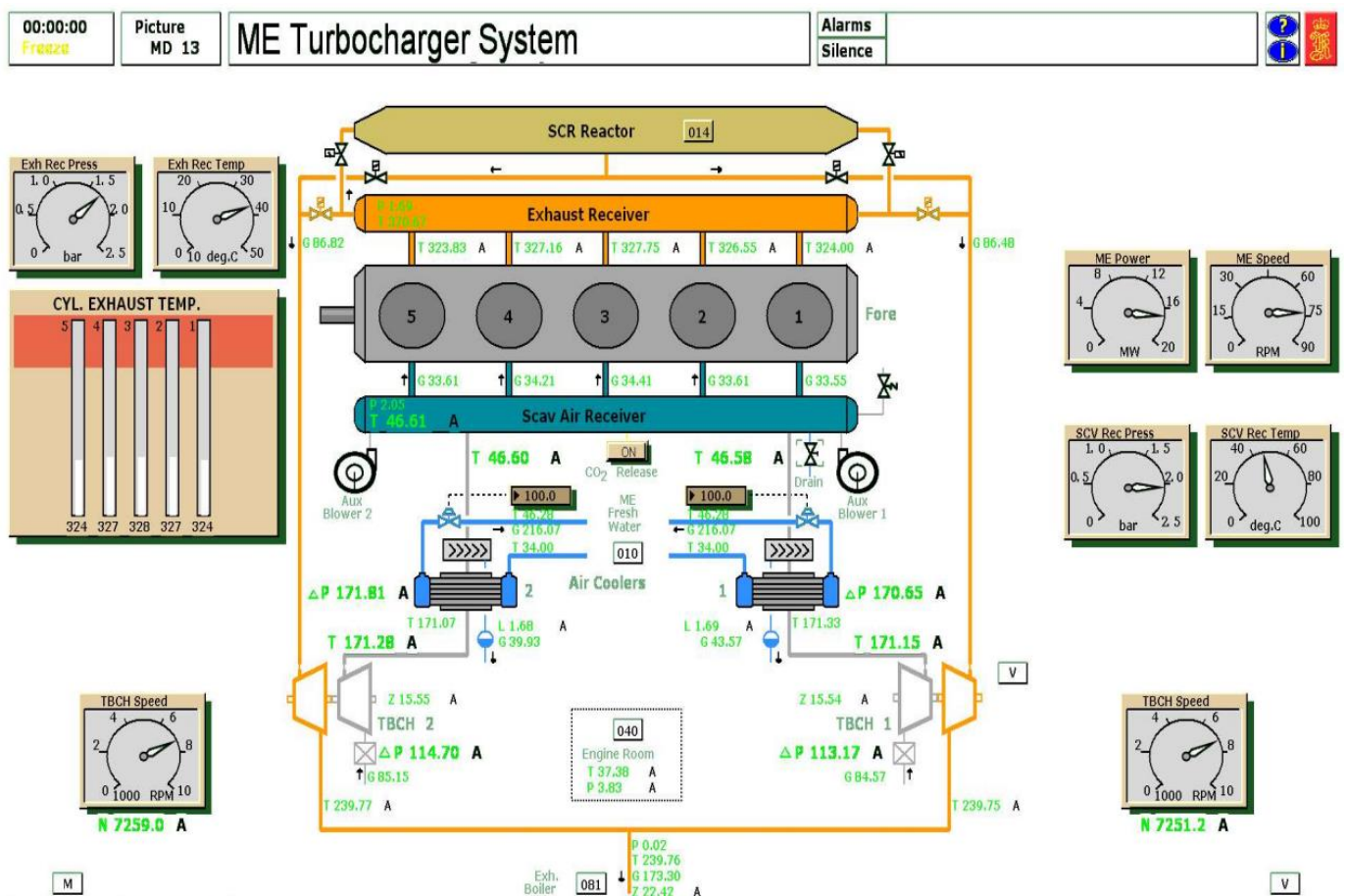
Pri odabiru kompresora turbo-puhala važno je paziti da krivulje tlaka nakon kompresora u ovisnosti o protoku zraka budu unutar radnog područja kompresora za cijelo područje rada motora. Iz dijagrama rada turbo-puhala (slika 8.) možemo vidjeti da je on omeđen s tri linije; s lijeve strane omeđen je linijom udara (eng. „Surge line“), s gornje strane maksimalnom dopuštenom brzinom vrtnje turbo puhala, te s desne strane linijom gušenja (eng. „Choke line“).



Slika 8 Dijagram rada TP [10]

### 3. UTJECAJ TURBO-PUHALA NA RAD GLAVNOG MOTORA

U ovom poglavlju raditi će se analiza na simulatoru tipa „Kongsberg K-Sim Engine MAN B&W 5L90MC VLCC L11-V“. Model simulira VLCC brod pogonjen pet cilindarskim MAN B&W sporookretnim dvotaktnim dizelskim motorom s dva turbo-punjača. Promjer cilindra je 900 mm, a hod klipa 2900 mm. Snaga glavnog motora iznosi 17400 kW pri 76 okr/min. Dužina broda preko svega je 305m, a širina 47m. Nosivost iznosi 187 997 tona [11].



Slika 9 Shema sustava prednabijanja GM [5]

Na slici 9 prikazana je shema sustava prednabijanja glavnog motora. Vidljiva su dva turbo-puhala, dva rashladnika zraka, usisni i ispušni kolektor te cilindri glavnog motora. Shema prikazuje stanje pogona kada je brod u navigaciji, potpuno nakrcan te plovi svom snagom naprijed („eng. Full Ahead“).

U normalnom radu oba turbo-puhala su u pogonu te usisavaju zrak iz strojarnice preko filtra zraka, nakon kojeg se zrak komprimira u kompresoru koji je pogonjen ispušnim plinovima glavnog motora. Uloga rashladnika zraka je da spusti temperaturu zraka s okvirnih 170 °C na približno 45 °C kako bi veća količina zraka mogla ući u usisni kolektor. Zrak je u rashladnicima hlađen nisko-temperaturnim krugom slatke vode. Na usisni kolektor spojena su dva pomoćna turbo-puhala pogonjena elektromotorom, a njihova uloga je dobava ispirnog zraka pri pokretanju glavnog motora kada još nema dovoljno ispušnih plinova za pogon glavnih turbo-puhala. Iz usisnog kolektora zrak ulazi u cilindre motora gdje se miješa s gorivom te izgara stvarajući ispušne plinove koji se odvede u ispušni kolektor, a zatim ponovo koriste za pogon turbine u TP. Prije ulaska u TP ispušni plinovi ulaze u sustav za selektivnu katalitičku redukciju (SCR) gdje se pročišćavaju. Nakon toga se ispušni plinovi vode u generator pare na ispušne plinove (eng „EGB“) gdje se dodatno iskorištava njihova zaostala toplinska energija za proizvodnju pare. Na kraju izlaze u atmosferu kroz ispušni dimovod.

### **3.1. Zaprljanje turbo-puhala**

Turbo-puhalo podložno je zaprljanju zračne i turbinske strane, te usisnog filtra. U nastavku su prikazane tablice snimljenih podataka za određenu vrijednost zaprljanja mogućih komponenti pojedinog te oba turbo-puhala te kakav je to utjecaj imalo na vrijednosti ostalih praćenih parametara. Također, simulirana je i situacija kada jedno turbo-puhalo nije u pogonu.

Simulacija se odvija pri punom opterećenju glavnog motora, ručica gasa na 100%, brod je potpuno nakrcan teretom te je u navigaciji po moru.



### 3.1.1. Zaprljanje zračne strane turbo-puhala

Tablica 1 Zaprljanje zračne strane TP br.1 [5]

ZAPRLJANJE ZRAČNE STRANE br.1	0%	10%	20%	30%	40%	50%	MJERNE JEDINICE
TEMPERATURA STROJARNICE	37,39	37,12	36,77	36,44	36,28	36,03	°C
BROJ OKRETAJA TURBO-PUHALA	7258	7114	6936	6740	6400 - 6900	6200 - 6900	okr/min
TEMP. ZRAKA NAKON TURBO-PUHALA	171,61	180,6	190,86	202,24	215,31	232,41	°C
TEMP. ZRAKA NAKON COOLERA	46,64	45,87	44,86	43,63	42,28	40,93	°C
TEMP. ZRAKA U RECIEVERU	46,63	45,98	45,11	44,13	43,23	42,36	°C
TLAK U RECIEVERU	2,05	1,95	1,83	1,72	1,61	1,52	bar
SREDNJA TEMP. ISPUHA	326	345	368	395	423	456	°C
TEMP. U ISPUŠNOM RECIEVERU	370,88	385,58	404,57	427,34	451,9	478,28	°C
TLAK U ISPUŠNOM RECIEVERU	1,69	1,61	1,52	1,43	1,35	1,27	bar
TEMP. ISPUŠNIH PLINOVA NAKON TURBINE	239,96	252,25	268,96	289,54	312,5	338,98	°C
ΔP FILTERA TURBINE	114,26	91,84	72,16	55,24	41,63	31,54	mmWC
ΔP HLADANJAKA ZRAKA	171,69	137,59	108,24	82,08	63,38	46,91	mmWC
KOLIČINA KONDENZATA	40	58	78	95	118	144	kg/h
EFEKTIVNA SNAGA G.M.	16,76	16,77	16,75	16,79	16,76	16,77	MW
EKONOMIČNOST GORIVA	205,36	205,59	205,49	205,58	206,58	208,81	kg/nm
BROJ OKRETAJA GLAVNOG MOTORA	74	74	74	74	74	74	okr/min

Postepenim zaprljanjem može se uočiti pad broja okretaja turbo-puhala zbog manje količine ispušnih plinova koji pogone turbinsko kolo. Također se može uočiti da pri većim postocima zaprljanja okretaji počinju oscilirati tj. turbo-puhalo uđe u područje rada poznato pod nazivom „pumpanje“ koje je dodatno objašnjeno u nastavku rada. Temperatura zraka nakon turbo-puhala raste, te na 50% - tnom zaprljanju ulazi u alarm (označeno crvenom bojom na tablici). Temperatura zraka nakon rashladnika zraka („coolera“) pada jer manje zraka prolazi kroz njega te se time brže i više ohladi. Proporcionalno tome pada i tlak zraka u ispirnom kolektoru. Srednje temperature ispušnih plinova rastu zbog više temperature i manje količine ispirnog zraka, a na 50% - tnom zaprljanju ulaze u alarm. Efektivna snaga glavnog motora ostaje konstantna jer se za to brine regulator broja okretaja koji da bi zadržao isti broj okretaja glavnog motora povećava količinu goriva koje se troši po nautičkoj milji (vidljivo u tablicama 1 i 2).

Na 60% - tnom zaprljanju sigurnosni sustav zaštite glavnog motora prebacuje motor u „*slowdown*“ režim rada zbog previsokih temperatura ispušnih plinova.

Tablica 2 Zaprljanje zračne strane turbo-puhala br.1 i br.2 [5]

ZAPRLJANJE ZRAČNE STRANE br.1 i br.2	0%	10%	20%	30%	40%	50%	MJERNE JEDINICE
TEMPERATURA STROJARNICE	37,39	36,74	36,33				°C
BROJ OKRETAJA TURBO-PUHALA	7258	6961	6606				okr/min
TEMP. ZRAKA NAKON TURBO-PUHALA	171,61	176,13	179,21				°C
TEMP. ZRAKA NAKON COOLERA	46,64	45,16	43,52				°C
TEMP. ZRAKA U RECIEVERU	46,63	45,15	43,53				°C
TLAK U RECIEVERU	2,05	1,83	1,63				bar
SREDNJA TEMP. ISPUHA	326	367	418				°C
TEMP. U ISPUŠNOM RECIEVERU	370,88	403,06	446,16				°C
TLAK U ISPUŠNOM RECIEVERU	1,69	1,52	1,37				bar
TEMP. ISPUŠNIH PLINOVA NAKON TURBINE	239,96	267,23	308				°C
ΔP FILTERA TURBINE	114,26	88,03	66,42				mmWC
ΔP HLADANJAKA ZRAKA	171,69	132,14	99,68				mmWC
KOLIČINA KONDENZATA	40	58	73				kg/h
EFEKTIVNA SNAGA G.M.	16,76	16,75	16,75				MW
EKONOMIČNOST GORIVA	205,36	205,31	205,81				kg/nm
BROJ OKRETAJA GLAVNOG MOTORA	74	74	74				okr/min

U slučaju kada se zaprljanje odnosi na oba turbo-puhala može se uočiti isti trend no već na 30% - tnom zaprljanju automatska zaštita glavnog motora gasi glavni motor („*shutdown*“) zbog previsokih temperatura ispušnih plinova.

Ovom usporedbom jasno je vidljivo koliko brodski sustav kompenzira probleme na jednoj od komponenti tako da drugu komponentu više optereti no kada su obje komponente u kvaru vrlo brzo proradi sigurnosna zaštita glavnog motora.

### 3.1.2. Zaprljanje turbinske strane turbo-puhala

Do zaprljanja turbinske strane turbo-puhala dolazi zbog prolaska prljavih ispušnih plinova preko lopatica turbinske strane te se na njima počinje nakupljati čađa. Čađa dovodi do problema s vibracijama i smanjuje učinkovitost lopatica.

Tablica 3 Zaprljanje turbinske strane turbo-puhala br.1 [5]

ZAPRLJANJE TURBINSKE STRANE br.1	0%	10%	20%	30%	40%	50%	60%
TEMPERATURA STROJARNICE	37,39	37,19	36,96	36,77	36,57	36,42	36,31
BROJ OKRETAJA TURBO-PUHALA	7258	7130	6981	6823	6653	6542	6456
TEMP. ZRAKA NAKON TURBO-PUHALA	171,61	173,45	177,56	181,12	187,06	195,13	207,84
TEMP. ZRAKA NAKON COOLERA	46,64	45,68	44,7	43,63	42,51	41,47	40,43
TEMP. ZRAKA U RECIEVERU	46,63	46,06	45,49	44,95	44,43	44,06	43,91
TLAK U RECIEVERU	2,05	2	1,95	1,9	1,84	1,81	1,79
SREDNJA TEMP. ISPUHA	326	337	352	367	385	406	429
TEMP. U ISPUŠNOM RECIEVERU	370,88	379,76	391,72	403,15	418,18	436,39	456,74
TLAK U ISPUŠNOM RECIEVERU	1,69	1,66	1,62	1,59	1,55	1,53	1,52
TEMP. ISPUŠNIH PLINOVA NAKON TURBINE	239,96	250,17	263,32	276,49	292,83	311,69	331,67
$\Delta P$ FILTERA TURBINE	114,26	97,28	81,05	66,65	52,55	42,63	33,25
$\Delta P$ HLADANJAKA ZRAKA	171,69	146,59	121,53	99,98	79,03	63,96	50,6
KOLIČINA KONDENZATA	40	99	148	180	205	228	245
EFEKTIVNA SNAGA G.M.	16,76	16,75	16,75	16,76	16,76	16,76	16,76
EKONOMIČNOST GORIVA	205,32	205,98	207,28	208,49	209,23	212,84	216,85
BROJ OKRETAJA GLAVNOG MOTORA	74	74	74	74	74	74	74

Ako usporedimo tablicu 2 i 3 mogu se uočiti slične promjene parametara, no kod zaprljanja turbinske strane te su promjene manje izražene. Na 60% zaprljanja javlja se alarm visoke temperature rashladne vode košuljica, a na 70% zaprljanja automatska zaštita gasi glavni motor.

Tablica 4 Zaprljanje turbinske strane br.1 i br..2 [5]

ZAPRLJANJE TURBINSKE STRANE br.1 i br.2	0%	10%	20%	30%	40%	50%	MJERNE JEDINICE
TEMPERATURA STROJARNICE	37,39	37,04	36,69	36,34	36,13		°C
BROJ OKRETAJA TURBO-PUHALA	7258	7092	6884	6692	6560		okr/min
TEMP. ZRAKA NAKON TURBO-PUHALA	171,61	171,51	172,31	172,95	174,53		°C
TEMP. ZRAKA NAKON COOLERA	46,64	45,54	44,45	43,38	42,64		°C
TEMP. ZRAKA U RECIEVERU	46,63	45,54	44,45	43,38	42,64		°C
TLAK U RECIEVERU	2,05	1,97	1,87	1,79	1,74		bar
SREDNJA TEMP. ISPUHA	326	350	379	408	445		°C
TEMP. U ISPUŠNOM RECIEVERU	370,88	389,96	412,96	437,53	469,48		°C
TLAK U ISPUŠNOM RECIEVERU	1,69	1,64	1,57	1,51	1,49		bar
TEMP. ISPUŠNIH PLINOVA NAKON TURBINE	239,96	258,39	281,24	305,57	336,16		°C
ΔP FILTERA TURBINE	114,26	98,51	82,73	70,35	61,21		mmWC
ΔP HLADANJAKA ZRAKA	171,69	147,32	124,12	105,56	91,63		mmWC
KOLIČINA KONDENZATA	40	73	113	135	158		kg/h
EFEKTIVNA SNAGA G.M.	16,76	16,75	16,74	16,75	16,74		MW
EKONOMIČNOST GORIVA	205,36	207,46	208,12	209,05	213,36		kg/nm
BROJ OKRETAJA GLAVNOG MOTORA	74	74	74	74	74		okr/min

Kod slučaja kada postoji zaprljanje turbinske strane oba turbo-puhala, alarm visoke temperature rashladne vode košuljice se javlja već na 40% - tnom zaprljanju, što se kao i u prijašnjim slučajevima može objasniti nemogućnošću sustava da kompenzira jedan problem većim opterećenjem druge komponente. Automatska zaštita prebacuje glavni motor u režim smanjenog opterećenja rada na 50% - tnom zaprljanju.

### 3.1.3. Zaprljanje filtra turbo-puhala

Tablica 5 Zaprljanje filtra turbo-puhala [5]

ZAPRLJANJE FILTRA TURBINE br.1	0%	10%	20%	30%	40%	50%	MJERNE JEDINICE
TEMPERATURA STROJARNICE	37,39	37,35	37,29	27,24	37,19	37,12	°C
BROJ OKRETAJA TURBO-PUHALA	7258	7250 - 7340	7200 - 7350	7150 - 7400	7100 - 7600	7000 - 7700	okr/min
TEMP. ZRAKA NAKON TURBO-PUHALA	171,61	172,34	174,19	175,3	176,72	178,5	°C
TEMP. ZRAKA NAKON COOLERA	46,64	46,62	46,45	46,29	46,17	46,02	°C
TEMP. ZRAKA U RECIEVERU	46,63	46,49	46,39	46,28	46,19	46,05	°C
TLAK U RECIEVERU	2,05	2,03	2,02	2	1,99	1,96	bar
SREDNJA TEMP. ISPUHA	326	328	331	334	337	341	°C
TEMP. U ISPUŠNOM RECIEVERU	370,88	372,54	375,14	377,34	379,56	382,63	°C
TLAK U ISPUŠNOM RECIEVERU	1,69	1,69	1,67	1,66	1,64	1,62	bar
TEMP. ISPUŠNIH PLINOVA NAKON TURBINE	239,96	242,14	243,91	245,28	274,33	249,47	°C
ΔP FILTERA TURBINE	114,26	122,07	131,32	141,29	155,79	171,51	mmWC
ΔP HLADANJAKA ZRAKA	171,69	167,98	161,12	156,25	152,1	144,54	mmWC
KOLIČINA KONDENZATA	40	45	48	51	52	55	kg/h
EFEKTIVNA SNAGA G.M.	16,76	16,87	16,83	16,83	16,75	16,76	MW
EKONOMIČNOST GORIVA	205,36	206,34	206,01	206,13	204,85	204,78	kg/nm
BROJ OKRETAJA GLAVNOG MOTORA	74	74	74	74	74	74	okr/min

Kod zaprljanja usisnog filtra turbo-puhala može se uočiti da već kod 10% - tnog zaprljanja jednog filtra dolazi do pojave pumpanja zbog pada tlaka na usisu. Problem pumpanja postaje sve očitiji kako se zaprljanje povećava, da bi na 50% - tnom zaprljanju okretaji turbo-puhala varirali u rasponu od 700 okretaja po minuti. Ostale vrijednosti se ne mijenjaju toliko izraženo kao kod prethodnih slučajeva zaprljanja turbinske ili zračne strane. Također se uočava da se potrošnja goriva nije znatno promijenila. Ovaj način rada turbo-puhala u području pumpanja svakako treba izbjegavati i što prije ukloniti problem. U protivnom može doći do udaraca, prekomjernih vibracija i nagle promjene broja okretaja što nikako nije dobro za komponente turbo-puhala.

Tablica 6 Zaprljanje filtra turbo-puhala br.1 i br.2 [5]

ZAPRLJANJE FILTRA TURBINE br.1 i br.2	0%	10%	20%	30%	40%	50%	MJERNE JEDINICE
TEMPERATURA STROJARNICE	37,39	37,29	37,23	37,17	37,04	36,87	°C
BROJ OKRETAJA TURBO-PUHALA	7258	7301	7100 - 7400	7000 - 7500	7000 - 7500	6900 - 7500	okr/min
TEMP. ZRAKA NAKON TURBO-PUHALA	171,61	171,56	172,98	173,52	174,73	175,01	°C
TEMP. ZRAKA NAKON COOLERA	46,64	46,39	46,2	45,91	45,77	45,45	°C
TEMP. ZRAKA U RECIEVERU	46,63	46,39	46,2	45,98	45,75	45,46	°C
TLAK U RECIEVERU	2,05	2,02	1,99	1,95	1,92	1,87	bar
SREDNJA TEMP. ISPUHA	326	331	336	343	348	358	°C
TEMP. U ISPUŠNOM RECIEVERU	370,88	374,58	379,59	383,73	389,76	396,46	°C
TLAK U ISPUŠNOM RECIEVERU	1,69	1,67	1,64	1,62	1,6	1,56	bar
TEMP. ISPUŠNIH PLINOVA NAKON TURBINE	239,96	243,25	247,42	250,85	256,23	261,68	°C
ΔP FILTERA TURBINE	114,26	120,25	128,13	138,18	150,39	164,25	mmWC
ΔP HLADANJAKA ZRAKA	171,69	164,84	158,61	153,16	146,68	138,43	mmWC
KOLIČINA KONDENZATA	40	45	47	50	53	57	kg/h
EFEKTIVNA SNAGA G.M.	16,76	16,74	16,7	16,74	16,73	16,77	MW
EKONOMIČNOST GORIVA	205,36	204,87	204,93	204,6	205,09	204,78	kg/nm
BROJ OKRETAJA GLAVNOG MOTORA	74	74	74	74	74	74	okr/min

U slučaju zaprljanja oba filtra nema izražene razlike kao u prethodnim slučajevima.

#### 3.1.4. Rad glavnog motora bez jednog turbo-puhala

Kada se simulira situacija rada glavnog motora bez jednog turbo-puhala, u rasponu rada motora od „*navigation full*“ do „*half*“ zaštita motora najprije smanji opterećenje motora no ubrzo nakon toga potpuno gasi glavni motor zbog i dalje prevelikih temperatura ispušnih plinova.

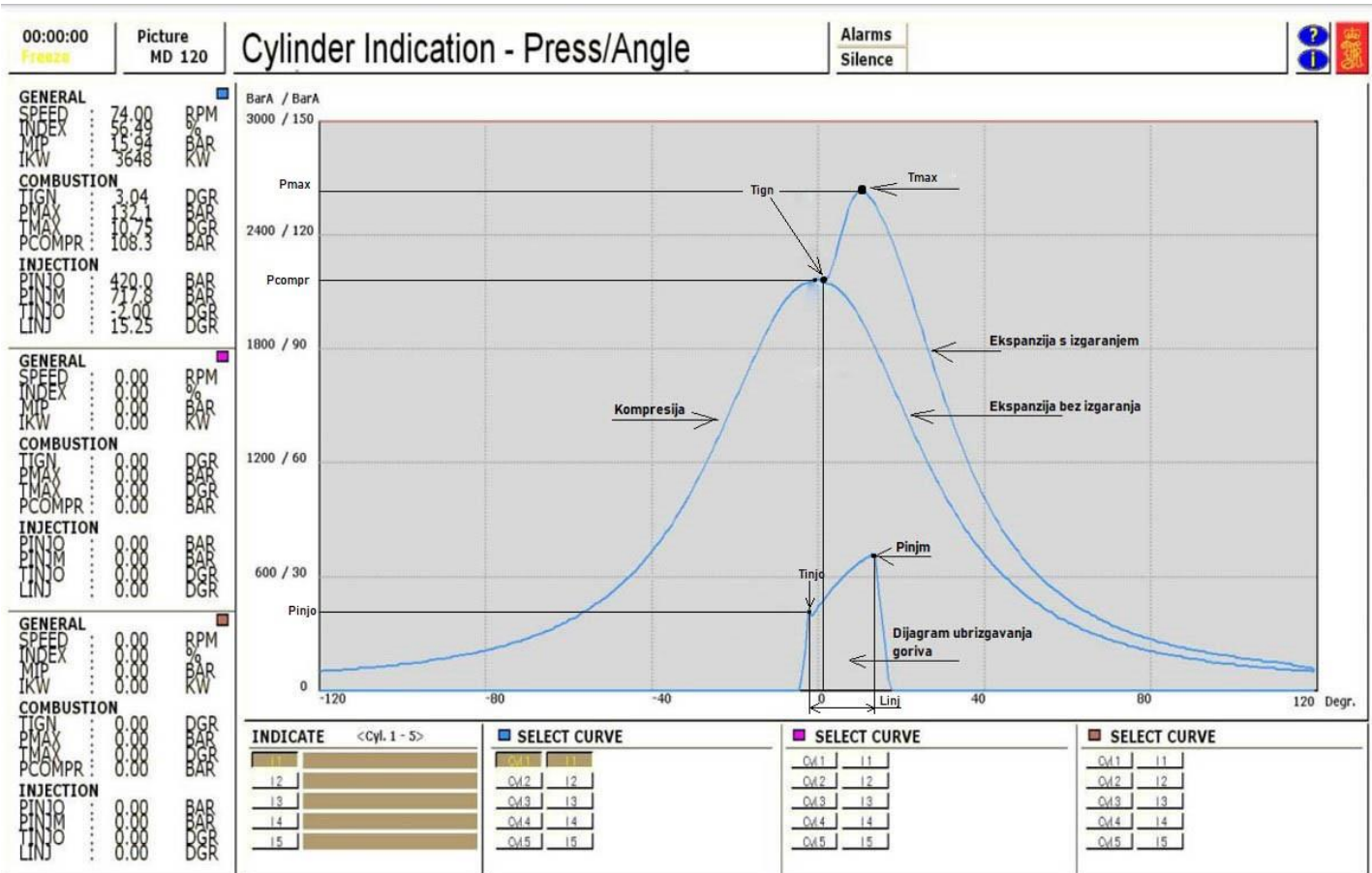
Kada se ručica goriva postavi u poziciju „*slow*“ motor radi s 42 okr/min uz poprilično visoke temperature ispušnih plinova te dolazi do izbacivanja turbo-generatora s mreže.

Kada se ručica goriva prebaci na „*dead slow*“ motor radi s 20 okr/min, parametri su u normalnom radnom području, no zbog premalog broja okretaja dolazi do izbacivanja osovinskog generatora s mreže jer nije moguće održati zadanu frekvenciju.

Tablica 7 Rad glavnog motora bez jednog turbo-puhala [5]

RAD G.M. BEZ JEDNOG TP	0%	SLOW	DEAD SLOW	MJERNE JEDINICE
TEMPERATURA STROJARNICE	37,39	32,15	31,23	°C
BROJ OKRETAJA TURBO-PUHALA	7258	2060	1376	okr/min
TEMP. ZRAKA NAKON TURBO-PUHALA	171,61	44,76	36	°C
TEMP. ZRAKA NAKON COOLERA	46,64	34	34	°C
TEMP. ZRAKA U RECIEVERU	46,63	34	34	°C
TLAK U RECIEVERU	2,05	0,17	0,09	bar
SREDNJA TEMP. ISPUHA	326	403	276	°C
TEMP. U ISPUŠNOM RECIEVERU	370,88	407,5	285	°C
TLAK U ISPUŠNOM RECIEVERU	1,69	0,16	0,08	bar
TEMP. ISPUŠNIH PLINOVA NAKON TURBINE	239,96	384,44	274,65	°C
$\Delta P$ FILTERA TURBINE	114,26	7,64	3,54	mmWC
$\Delta P$ HLADANJAKA ZRAKA	171,69	11,43	5,33	mmWC
KOLIČINA KONDENZATA	40	0	0	kg/h
EFEKTIVNA SNAGA G.M.	16,76	2,8	0,68	MW
EKONOMIČNOST GORIVA	205,36	116,22	100,19	kg/nm
BROJ OKRETAJA GLAVNOG MOTORA	74	42	25,9	okr/min

### 3.1.5. Indikatorski dijagram



Slika 10 Indikatorski dijagram [5]

Indikatorski dijagram prikazuje odnos tlaka u cilindru ovisno o kutu koljeničastog vratila. Dijagram daje uvid u podatke koji uvelike olakšavaju dijagnostiku kvarova i rješavanje problema.

Nekada se je indikatorski dijagram snimao ručno tako da bi se mjerni uređaj s crtačom iglom spojio na indikatorski pipac motora te bi tlak koji se nalazi u cilindru preko mjeha pomicao iglu koja bi ocrtavala graf na indikatorskom papiru. Ovaj postupak bio je podložan greškama te je danas on potpuno digitaliziran i indikatorski dijagram dobiva se u kontrolnoj kabini strojarne na ekranu računala.

Na y-osi prikazane su dvije skale izražene u bar-ima, lijevi stupac odnosi se na dijagram ubrizgavanja goriva, a desni stupac odnosi se na tlakove u cilindru. Na x-osi prikazan je

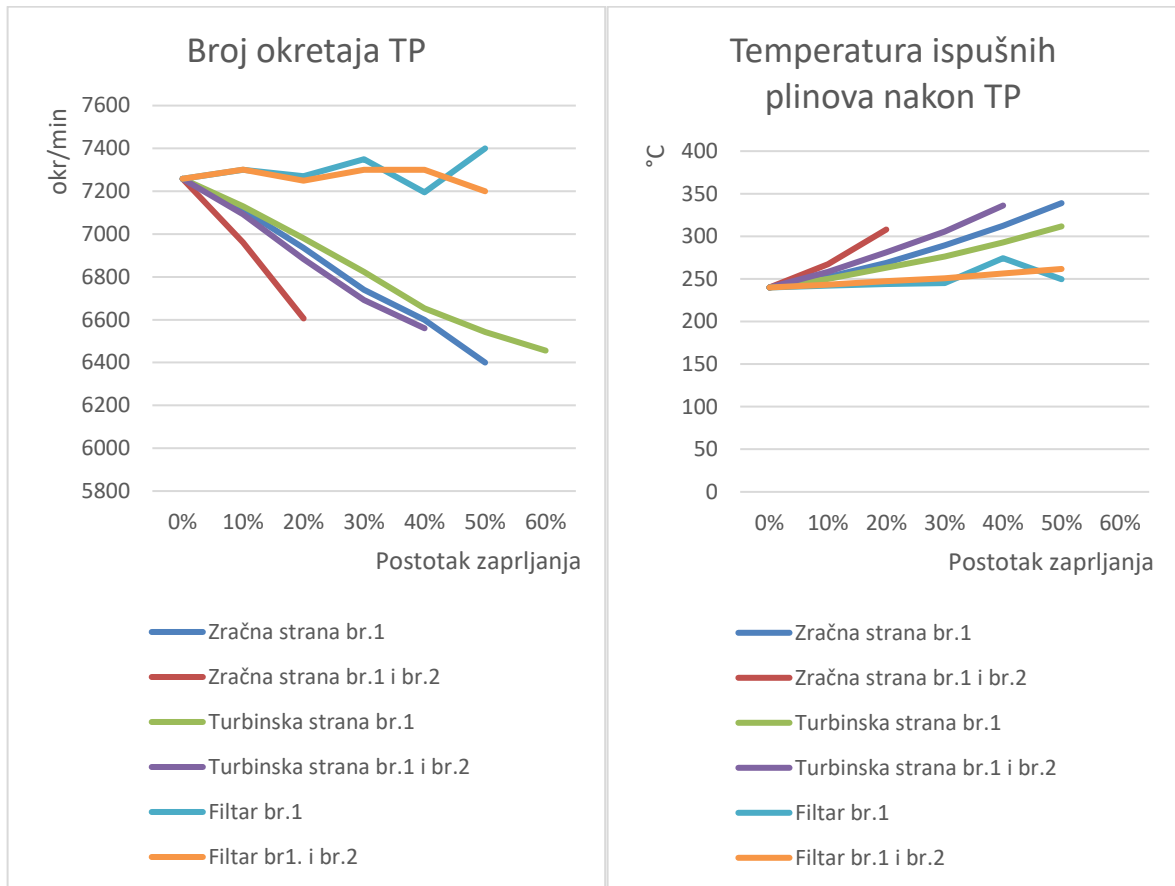


kut koljениčastog vratila,  $0^\circ$  predstavlja gornju mrtvu točku (GMT). Na dijagramu se očitavaju tlakovi u rasponu od  $\pm 120^\circ$  budući da je to područje od interesa.

Parametri koji se očitavaju:

- SPEED – broj okretaja koljениčastog vratila [okr/min],
- INDEX – pozicija letve goriva [%].
- MIP- srednji indicirani tlak („*mean indicated pressure*“)
- IKW- snaga na određenom cilindru („*indicated power of the cylinder*“),
- TIGN- vrijeme paljenja smjese [ $^\circ$ KV] (stupnjevi koljениčastog vratila),
- PMAX- najveći tlak prilikom radnog ciklusa [bar],
- TMAX- maksimalna temperatura tijekom radnog ciklusa [ $^\circ$ KV],
- PCOMPR- tlak kompresije [bar],
- PINJO- tlak goriva prilikom ubrizgavanja u cilindar [bar],
- TINJO- početak ubrizgavanja goriva [ $^\circ$ KV],
- LINJ- duljina perioda ubrizgavanja goriva u cilindar [ $^\circ$ KV].

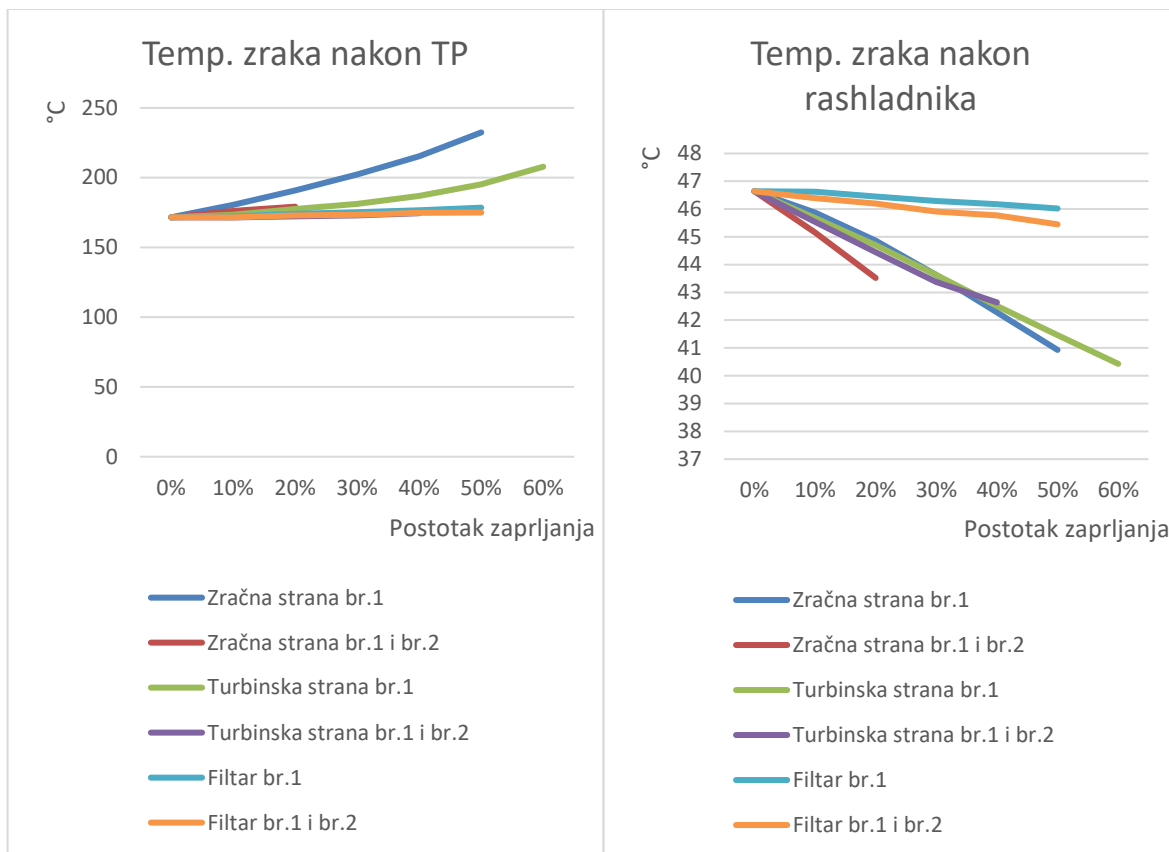
### 3.2. Dijagrami izvedeni na temelju tablica zaprljanja



Slika 11 Broj okretaja turbo-puhala

Slika 12 Temp. ispušnih plinova nakon TP

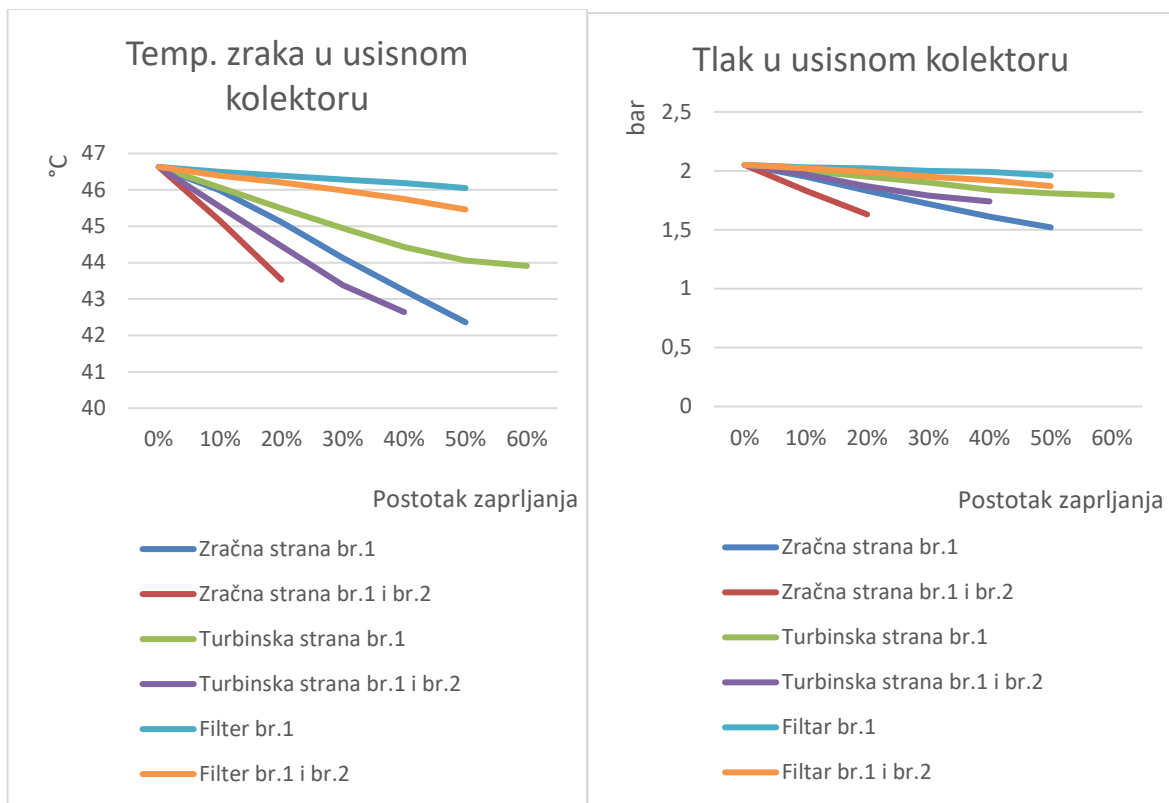
Iz slike 11, u kojoj se prikazuje broj okretaja turbo-puhala, može se uočiti da se postepenim povećanjem zaprljanja broj okretaja smanjuje osim u slučaju zaprljanja filtra gdje dolazi do pojave pumpanja turbo-puhala. Na slici 12 temperature ispušnih plinova rastu s povećanjem zaprljanja što se može objasniti činjenicom da u prostor izgaranja dolazi manja količina svježeg zraka više temperature i zbog toga temperatura ispušnih plinova raste. Manji porast temperature ispušnih plinova vidljiv je kod zaprljanja filtra jer tada turbo-puhalo povremeno daje i više zraka nego što bi trebalo zbog pojave pumpanja.



Slika 13 Temp. zraka nakon TP

Slika 14 Temp. zraka nakon rashladnika

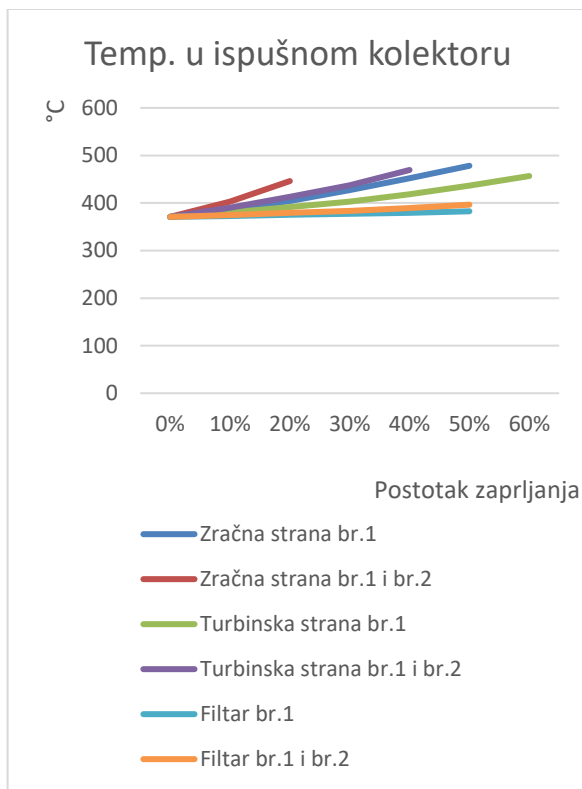
Iz slike 13 vidi se povećanje temperature zraka nakon turbo-puhala s povećanjem postotka zaprljanja. Uzrok tome je nakupljanje prljavštine na lopaticama te manji protok zraka kroz turbo-puhalo. Uočljivo je da zaprljanje filtra zraka ne utječe znatno na temperaturu zraka nakon turbo-puhala. Na slici 14 prikazana je temperatura zraka nakon rashladnika zraka te se vidi da temperatura pada s povećanjem zaprljanja iz razloga što manje zraka prolazi kroz rashladnik te se na taj način lakše ohladi. Ovdje se također kao i na slici 13 može vidjeti da zaprljanje filtra nema značajni utjecaj na temperaturu zraka nakon rashladnika.



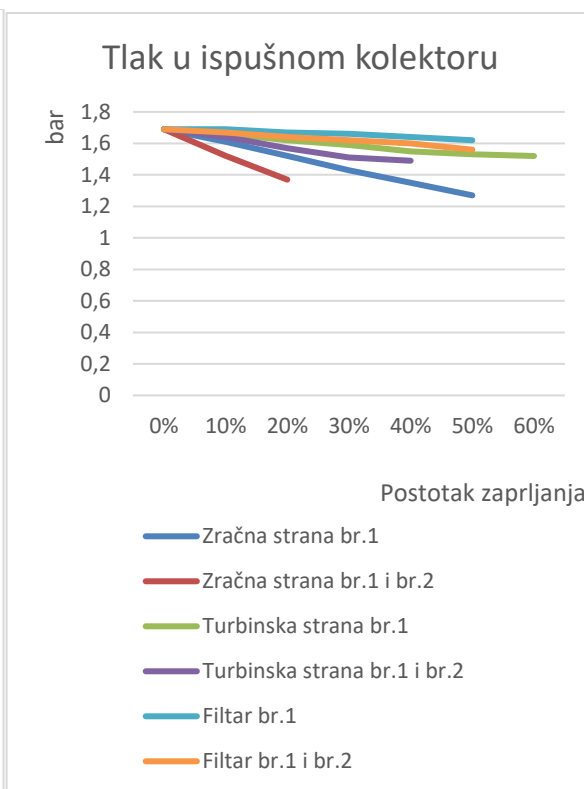
Slika 15 Temp. zraka u usisnom kolektoru

Slika 16 Tlak u usisnom kolektoru

Usisni kolektor se nalazi odmah nakon rashladnika zraka pa su i vrijednosti približno iste kao i vrijednosti na slici 14. Na slici 16 prikazan je tlak u usisnom kolektoru te se vidi da on blago pada. To se može objasniti činjenicom da je ispirni zrak manje temperature, a time i pod manjim tlakom. Protok ispirnog zraka je također manji što rezultira manjim tlakom u usisnom kolektoru.



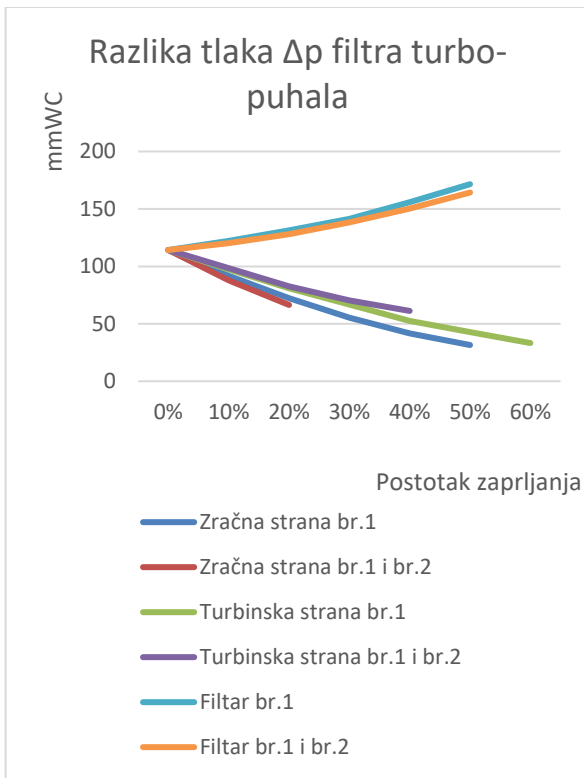
Slika 17 Temp. u ispušnom kolektoru



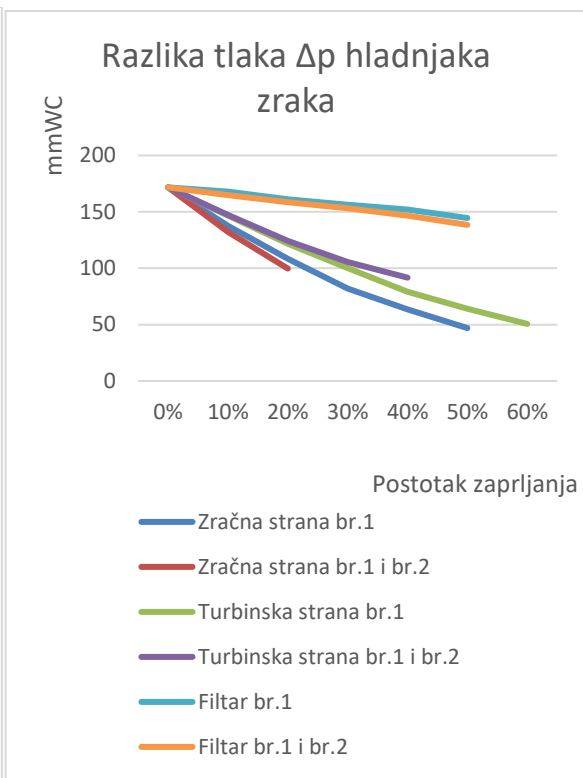
Slika 18 Tlak u ispušnom kolektoru

Na slici 17 prikazana je temperatura u ispušnom kolektoru te se vidi da ona raste s povećanjem zaprljanja zbog manjka zraka za ispiranje cilindara i samim time veću temperaturu na izlazu iz cilindara i u ispušnom kolektoru. Zaprljanje filtra manje utječe na temperaturu u odnosu na ostale oblike zaprljanja.

Tlak u ispušnom kolektoru prikazan je na slici 18 gdje je uočljivo da on pada zbog manje količine ispušnih plinova izgaranja pa je i tlak ispušnih plinova manji, također i ovdje se vidi da zaprljanje filtra manje utječe na parametre od ostalih oblika zaprljanja.

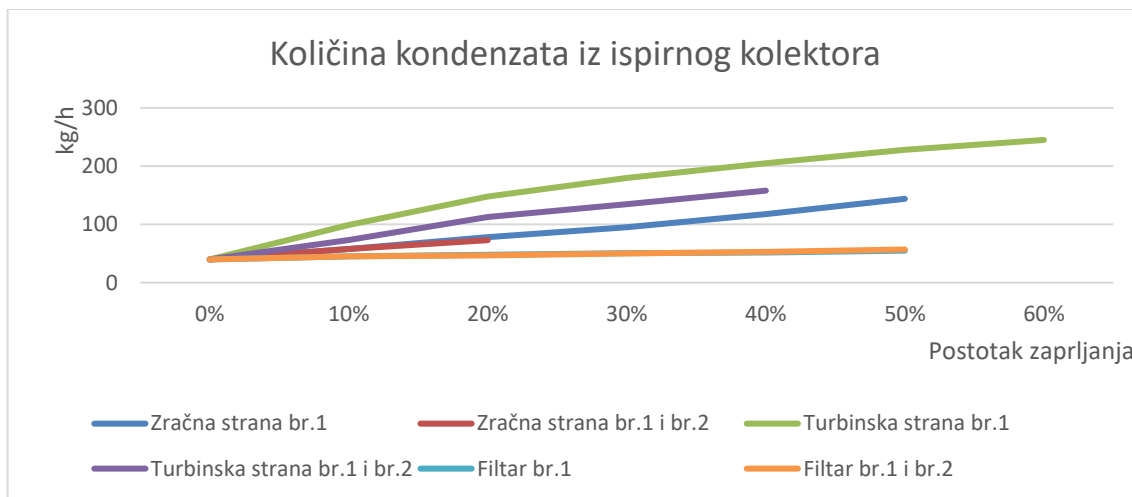


Slika 19 Razlika tlaka filtra TP



Slika 20 Razlika tlaka hladnjaka zraka

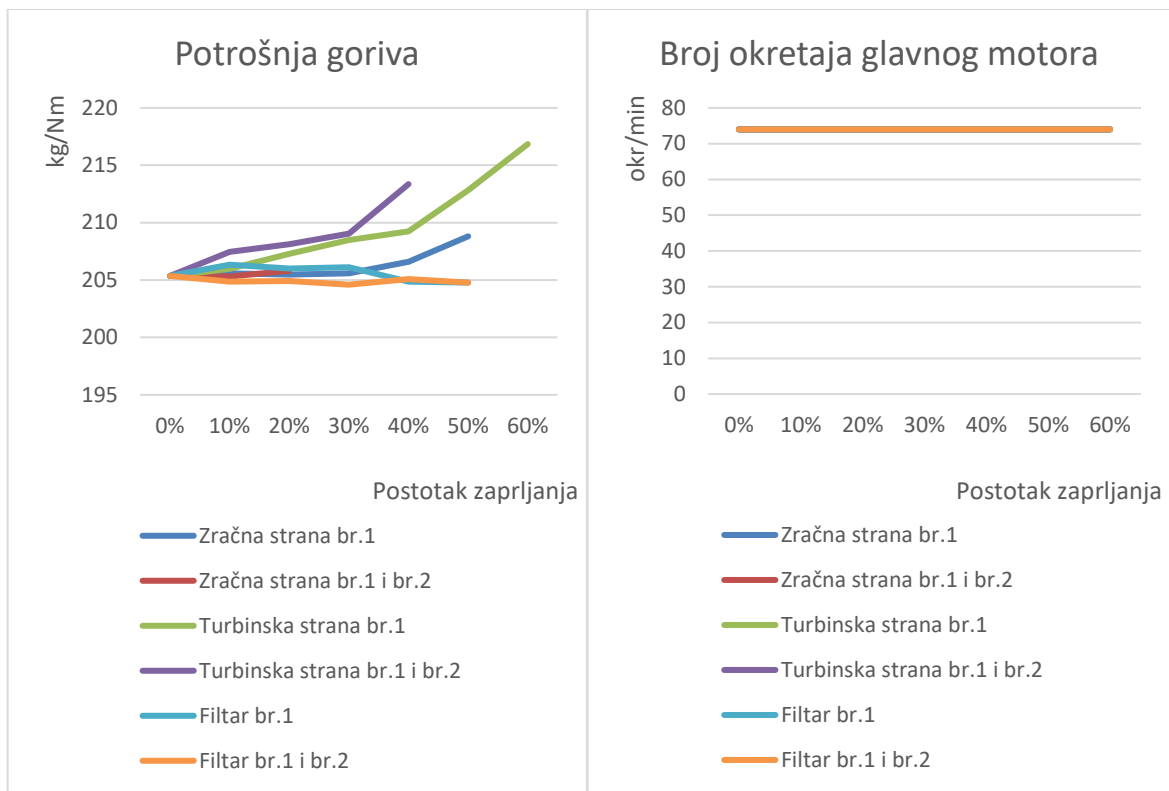
Na slikama 19 i 20 vidi se da ako dođe do zaprljanja filtra TP dolazi i do povećanja razlike tlaka. Ako se smanjuje protok zraka kroz TP zbog zaprljanja turbinske ili zračne strane, a filter je čist, vidljivo je da se razlika tlakova smanjuje.



*Slika 21 Količina kondenzata*

Na slici 21 može se uočiti da povećanjem zaprljanja količina kondenzata uvijek raste, a porast je najizraženiji kod zaprljanja turbinske strane jednog turbo-puhala.

Količina kondenzata ovisi o vlažnosti, temperaturi te tlaku zraka koji se tlači u turbo-puhalu. Kondenzat nastaje kod hlađenja ispirnog zraka u hladnjaku zraka. S manjim protokom zraka te manjim tlakom zraka (čemu je uzrok zaprljanje pojedinih komponenti turbo-puhala) dolazi do pojačanog stvaranja kondenzata. Kondenzat iz ispirnog kolektora je potrebno drenirati. Drenaža se vrši ili automatski pomoću plovka koji služi za mjerenje nivoa kondenzata ili pomoću ručnog ventila. Ako drenaža nije zadovoljavajuća određena količina vode može ući u cilindre što smanjuje iskoristivost (povećava potrošnju) jer se dio topline unesen s gorivom troši na isparavanje te iste vode. Također, voda može dovesti do pojačanog trošenja košuljica, glava, čela klipa, klipnih prstenova te ostalih elemenata unutar prostora izgaranja.



Slika 22 Potrošnja goriva

Slika 23 Broj okretaja glavnog motora

Unatoč svim zaprljanjima automatika glavnog motora zadržava broj okretaja konstantnim , a to radi tako da utječe na količinu goriva koja se ubrizgava u cilindar što se očituje na potrošnji goriva.

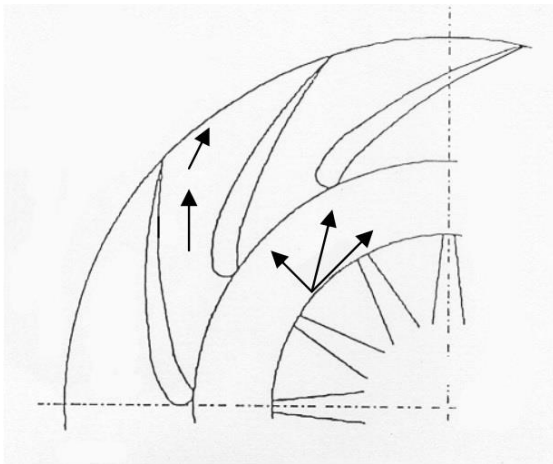
Iz slike 22 vidljivo je da najveći porast potrošnje goriva nastaje kod zaprljanja turbinske strane turbo-puhala iz čega se može zaključiti da je izuzetno važno za ekonomičnost broda da je turbinska strana turbo-puhala što čišća.



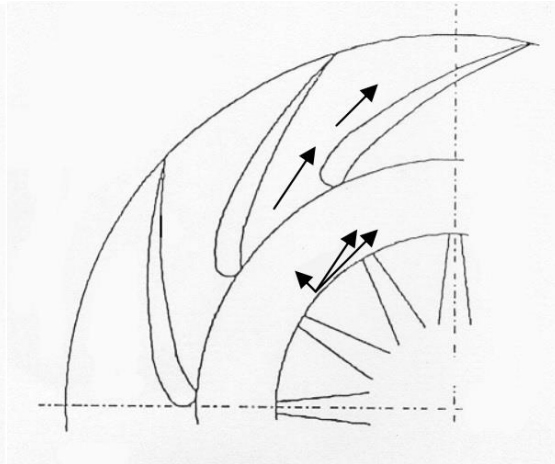
## 4. PUMPANJE

Pumpanje je pojava koja nastaje kod turbo-puhala zbog poremećaja tlakova između rotora kompresora i statora. Manifestira se vrlo glasnim zvukovima nalik onima na pucanj ili slično zbog vrlo velikih varijacija okretaja i tlakova kao i smjera strujanja zraka u vrlo kratkom vremenskom periodu. Ova pojava najviše šteti rotoru no može prouzročiti probleme i na statoru, ležajevima, labirintnim brtvenica i ostalim komponentama turbo-puhala.

Na slici 24 prikazane su brzine u difuzoru i brzine na izlazu iz kompresora kod normalnog rada dok su na slici 25 prikazane brzine kod pojave pumpanja.

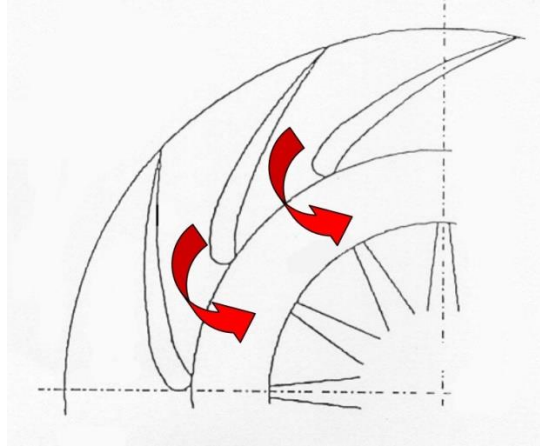


Slika 24 Vektori brzina u normalnom radu [12]



Slika 25 Vektori brzina kod pumpanja [12]

Zrak iz rotora ulazi u difuzor te prolaskom kroz njega, uslijed povećanja presjeka, smanjuje mu se brzina, a tlak se povećava (pretvorba kinetičke energije u potencijalnu). Uslijed smanjenja protoka zraka kroz difuzor (u slučajevima neke prepreke na tlačnoj strani poput zaprljanja rashladnika ispirnog zraka i sl.), nastaje poremećaj u brzini te komponente brzine dobivaju pogrešan smjer protoka što stvara vrtloženje te se tako difuzor počinje ponašati kao prepreka zraku. U trenutku kada u difuzoru naraste tlak do određene vrijednosti, dolazi do naglog povratnog strujanja zraka u rotor što je prikazano na slici 26.



*Slika 26 Povrat zraka u rotor [12]*

Nakon povrata tlaka u rotor kompresora proces se ponavlja i tu pojavu nazivamo „pumpanje“ turbo-puhala.

Neki od uzroka mogu biti:

- prljav rashladnih zraka,
- prljav usisni filter zraka,
- prljave kompresorske lopatice ili difuzor,
- nedovoljan pad tlaka nakon turbine.

## 5. ZAKLJUČAK

Analiza simuliranih rezultata u ovome radu pokazala je da bilo kakav oblik zaprljanja dijelova turbo-puhala ili filtra zraka turbo-puhala negativno utječe na rad glavnog motora te može ozbiljno utjecati na sigurnost plovidbe broda.

Osim većeg opterećenja pojedinih komponenti turbo-puhala zbog samog zaprljanja dolazi i do neželjene pojave pumpanja. Također vidljiva je i povećana potrošnja goriva što je svakako potrebno izbjeći kako s gledišta ekonomije tako i s gledišta ekologije.

Ovom simulacijom potvrđena je važnost održavanja te su zabilježene neželjene posljedice do kojih dolazi ako se isto ne provodi. Iz tablica podataka vidljivo je da zaprljanje zračne strane turbo-puhala najbrže dovodi do zaustavljanja ili usporavanja glavnog motora, zaprljanje usisnog filtra dovodi do pojave pumpanja te je također vidljivo koliko je važno imati oba turbo-puhala u pogonu na motoru koji je predviđen za rad s dva turbo-puhala.

## POPIS LITERATURE

- [1] <https://www.quora.com/Do-ship-engines-have-turbocharger>
- [2] <https://www.garrettmotion.com/racing-and-performance/choosing-a-turbocharger/water-cooling-for-your-turbo/>
- [3] <https://proauto.ba/savjeti-servisiranje-turbopunjaca/>
- [4] <https://www.marineinsight.com/main-engine/what-is-turbocharger-surgeing/>
- [5] Vlastiti izvor
- [6] <https://www.aet-turbos.co.uk/turbo-tech-101-what-is-a-turbo-wastegate-and-how-does-it-work/>
- [7] <https://www.autonet.hr/arhiva-clanaka/prednabijanje-i>
- [8] <https://www.brighthubengineering.com/marine-engines-machinery/41370-turbochargers-what-is-surgeing/>
- [9] <https://pgjonline.com/magazine/2012/march-2012-vol-239-no-3/features/protecting-a-centrifugal-compressor-from-surge>
- [10] <https://bofiracing.co.uk/blog/how-do-you-know-when-youre-all-out-of-turbo/>
- [11] <https://www.kongsberg.com/digital/models-and-examples/k-sim-engine-models/man-bw-5l90mc-vlcc/>
- [12] [https://www.pfri.uniri.hr/web/dokumenti/uploads\\_nastava/20191216\\_102720\\_bernecic\\_PumpanjeTP.pdf](https://www.pfri.uniri.hr/web/dokumenti/uploads_nastava/20191216_102720_bernecic_PumpanjeTP.pdf)

## POPIS SLIKA

Slika 1 Brodsko turbo-puhalo [1] .....	2
Slika 2 Presjek turbo-puhala [3].....	3
Slika 3 Sustav motora s turbo-puhalom [4] .....	4
Slika 4 Lopatice kompresorske strane [5] .....	5
Slika 6 Brodsko turbo-puhalo u strojarnici [5].....	6
Slika 7 Dijagram pumpanje/gušenje [9].....	7
Slika 8 Dijagram rada TP [10].....	7
Slika 9 Shema sustava prednabijanja GM [5] .....	8
Slika 10 Indikatorski dijagram [5] .....	17
Slika 11 Broj okretaja turbo-puhala.....	19
Slika 12 Temp. ispušnih plinova nakon TP .....	19
Slika 13 Temp. zraka nakon TP.....	20
Slika 14 Temp. zraka nakon rashladnika .....	20
Slika 15 Temp. zraka u usisnom kolektoru.....	21
Slika 16 Tlak u usisnom kolektoru.....	21
Slika 17 Temp. u ispušnom kolektoru.....	22
Slika 18 Tlak u ispušnom kolektoru .....	22
Slika 19 Razlika tlaka filtra TP.....	23
Slika 20 Razlika tlaka hladnjaka zraka .....	23
Slika 21 Količina kondenzata.....	24
Slika 22 Potrošnja goriva.....	25
Slika 23 Broj okretaja glavnog motora.....	25
Slika 24 Vektori brzina u normalnom radu [12].....	26
Slika 25 Vektori brzina kod pumpanja [12].....	26
Slika 26 Povrat zraka u rotor [12] .....	27

## **POPIS TABLICA**

Tablica 1 Zaprljanje zračne strane TP br.1 [5].....	10
Tablica 2 Zaprljanje zračne strane turbo-puhala br.1 i br.2 [5] .....	11
Tablica 3 Zaprljanje turbinske strane turbo-puhala br.1 [5].....	12
Tablica 4 Zaprljanje turbinske strane br.1 i br..2 [5].....	13
Tablica 5 Zaprljanje filtra turbo-puhala [5].....	14
Tablica 6 Zaprljanje filtra turbo-puhala br.1 i br .2 [5] .....	15
Tablica 7 Rad glavnog motora bez jednog turbo-puhala [5] .....	16