

Ottov i Dieselov kružni proces

Marušić, Alen

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:974382>

Rights / Prava: [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-24**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Preddiplomski sveučilišni studij strojarstva

Završni rad

OTTOV I DIESELOV KRUŽNI PROCES

Rijeka, rujan 2022.

Alen Marušić

0035202725

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Preddiplomski sveučilišni studij strojarstva

Završni rad

OTTOV I DIESELOV KRUŽNI PROCES

Mentor: Prof. dr. sc. Kristian Lenić

Rijeka, rujan 2022.

Alen Marušić

0035202725

Rijeka, 9. ožujka 2022.

Zavod: **Zavod za termodinamiku i energetiku**
Predmet: **Termodinamika I**
Grana: **2.11.02 procesno energetska strojarstvo**

ZADATAK ZA ZAVRŠNI RAD

Pristupnik: **Alen Marušić (0035202725)**
Studij: **Preddiplomski sveučilišni studij strojarstva**

Zadatak: **OTTOV I DIESELOV KRUŽNI PROCES / OTTO AND DIESEL
THERMODYMANIC CYCLES**

Opis zadatka:

Potrebno je općenito opisati termodinamički kružni proces pretvorbe toplinske u mehaničku energiju. Opisati Ottov i Dieselov kružni proces. Opisati postupak proračuna karakterističnih termodinamičkih veličina oba kružna procesa. Za zadane ulazne parametre izvršiti termodinamičku analizu procesa te usporediti procese. Rad mora obuhvatiti: uvod s opisom termodinamičkog procesa pretvorbe toplinske u mehaničku energiju, opis Ottovog i Dieselovog kružnog procesa, termodinamički proračun karakterističnih fizikalnih veličina u kružnim procesima, prikaz i analizu dobivenih rezultata, zaključak, popis oznaka, popis korištene literature te sažetak i ključne riječi na hrvatskom i engleskom jeziku.

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

Alen Marušić

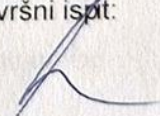
Zadatak uručen pristupniku: 21. ožujka 2022.

Mentor:



Prof. dr. sc. Kristian Lenić

Predsjednik povjerenstva za
završni ispit:



Prof. dr. sc. Kristian Lenić

IZJAVA

Sukladno članku 8. Pravilnika o završnom radu, završnom ispitu i završetku preddiplomskih sveučilišnih studija Tehničkog fakulteta Sveučilišta u Rijeci, iz siječnja 2020. godine, ja, Alen Marušić, student preddiplomskog sveučilišnog studija strojarstva, izjavljujem da sam samostalno izradio završni rad na temu „OTTOV I DIESELOV KRUŽNI PROCES“, pod vodstvom mentora prof. dr. sc. Kristiana Lenića.

Alen Marušić

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentoru Prof.dr.sc. Kristianu Leniću na razumijevanju, savjetima i pruženoj pomoći tijekom pisanja rada, te prihvaćanju mentorstva u tako kratkom roku.

Puno hvala majci Zlati te ocu Tomislavu, kao i sestri Ivi na beskrajnoj podršci usprkos svim pretekama, motivaciji da pronađem svoje interese te bezuvjetnoj ljubavi tijekom svih ovih godina.

Vaš Alen!

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. OPĆENITO O KRUŽNIM PROCESIMA	2
2.1. Pretvorba toplinske u mehaničku energiju.....	3
2.2. Elementarni kružni procesi.....	5
2.2.1. Carnotov kružni proces.....	6
3. OTTOV KRUŽNI PROCES	9
3.1. Faze Ottovog kružnog procesa.....	9
3.2. Toplinski stupanj djelovanja Ottovog procesa.....	10
3.3. Primjena Ottovog procesa u tehničkoj praksi.....	12
3.4. Kompresijski omjer.....	13
3.5. Usporedba idealnog i stvarnog Ottovog procesa.....	14
4. DIESELOV KRUŽNI PROCES	16
4.1. Faze Dieselovog kružnog procesa.....	17
4.2. Toplinski stupanj djelovanja Dieselovog procesa.....	18
4.3. Primjena Dieselovog procesa u tehničkoj praksi.....	19
4.4. Usporedba idealnog i stvarnog Dieselovog procesa.....	20
5. PRORAČUN KARAKTERISTIČNIH VELIČINA OTTOVOG I DIESELOVOG PROCESA	21
5.1. Ottov kružni proces.....	21
5.1.1. Karakteristične točke kružnog procesa (p, V, T).....	21
5.1.2. Dovedena i odvedena toplina.....	24
5.1.3. Izvršeni rad.....	25
5.1.4. Toplinski stupanj djelovanja.....	26
5.2. Dieselov kružni proces.....	27
5.2.1. Proračun karakterističnih točki kružnog procesa za isti kompresijski omjer (p, V, T).....	27
5.2.3. Izvršeni rad.....	31

5.2.4. Toplinski stupanj djelovanja.....	31
5.2.5. Proračun karakterističnih točki kružnog procesa za isti maksimalni tlak (p, V, T)	32
5.2.6. Dovedena i odvedena toplina.....	35
5.2.7. Izvršeni rad	36
5.2.4. Toplinski stupanj djelovanja.....	36
5.3. Analiza dobivenih rezultata.....	37
6. ZAKLJUČAK.....	41
7. LITERATURA	42
8. POPIS SLIKA.....	43
9. POPIS OZNAKA.....	44
10. SAŽETAK I KLJUČNE RIJEČI.....	45
10.1. Sažetak	45
10.2. Summary	45

1. UVOD

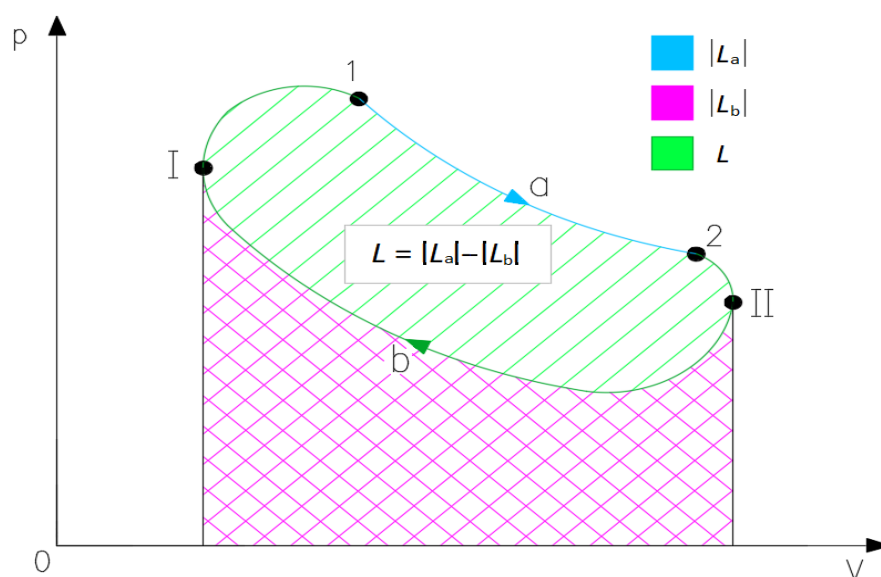
Diljem svijeta, najčešće korišteni način prijevoza putnika su automobili, a slijede ih autobusi, koji koriste benzinske, dizelske ili u novije vrijeme električne motore. Zadatak ovog završnog rada je opisati i usporediti razlike između Otto i Diesel kružnih procesa. Otto i Diesel su kružni procesi s unutarnjim izgaranjem, kod kojih gorivo izgara u radnom prostoru gdje se kemijska energija goriva pretvara u toplinsku, a potom iz toplinske energije u mehanički rad. U ovom radu prvo su objašnjeni kružni procesi i način dobivanja mehaničkog rada pretvorbom energije. Nadalje, opisane su faze Ottovog i Dizel kružnog procesa, primjena kod motora te na koji način kompresijski omjer utječe na toplinski stupanj djelovanja. Također, definirane su razlike idealnih i realnih kružnih procesa. Zadani su identični ulazni parametri, no proračunom je potrebno u prvom slučaju usporediti procese s identičnim kompresijskim omjerima, te u drugom s identičnim maksimalnim tlakom. Na kraju slijede osvrt i zaključak, literatura, popis slika i popis oznaka.

2. OPĆENITO O KRUŽNIM PROCESIMA

Termodinamika je znanost koja se bavi proučavanjem, prijenosom, pretvorbom i skladištenjem energije. Cilj ovdje će biti predstaviti termodinamiku kao znanost o pretvorbi energije. Trenutačno je fosilno gorivo još uvijek dominantan izvor energije u svijetu, ali izgaranjem fosilnih goriva stvara se samo toplinska energija. Stoga se ovi primarni izvori energije moraju pretvoriti u sekundarne izvore energije kao što su električna energija i mehanički rad. Za pretvaranje toplinske u drugi oblik energije potrebni su toplinski strojevi koji mnogi rade na principu kružnog procesa, dodajući energiju u obliku topline u jednom dijelu ciklusa i koristeći tu energiju za obavljanje korisnog rada u drugom dijelu procesa.

Proces koji na kraju vraća radnu tvar u početno stanje naziva se kružni proces. Na kraju procesa sva svojstva imaju istu vrijednost koju su imala i na početku. Tipični kružni proces sastoji se od niza promjena stanja pri kojima se izmjenjuje toplina i izvršava rad dok se mijenjaju veličine stanja radne tvari, na kraju vraćajući sustav u njegovo početno stanje.

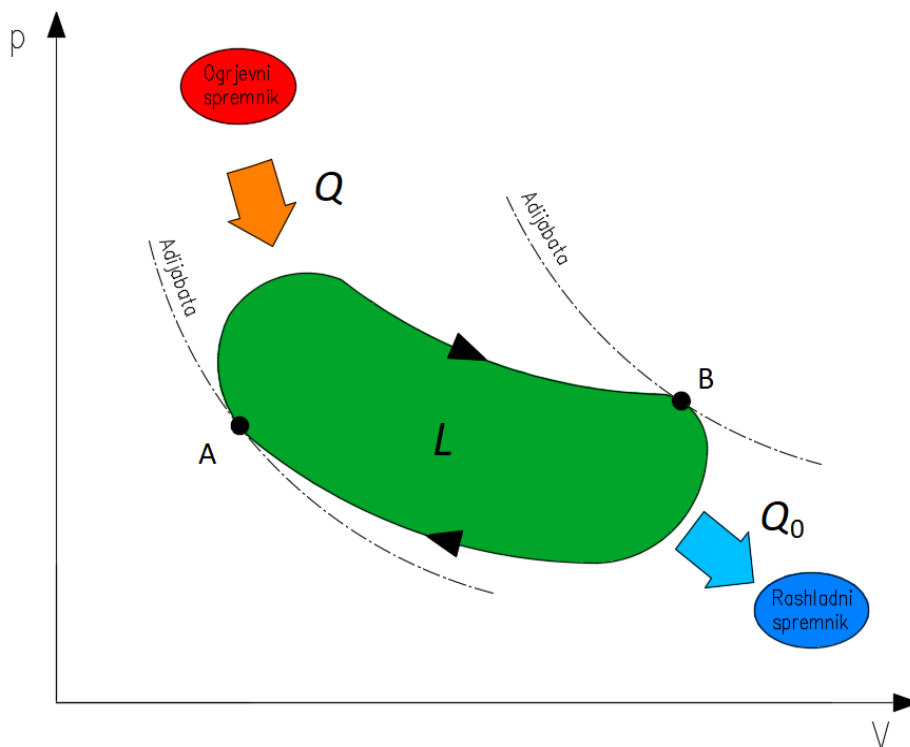
Na slici 2.1. prikazan je jednostavan realan kružni proces. Ekspanzijom radne tvari od stanja I do stanja II po putu a dobivamo rad L_a . S obzirom da je u kružnom procesu potrebno ponavljati proces, radnu tvar moramo vratiti u početno stanje. Da bi to učinili, potrebno je utrošiti rad L_b za kompresiju radne tvari po putu b. Rad ekspanzije L_a veći je od rada kompresije L_b . Razlika tih dvaju radova je pozitivan rad L koji je prikazan kao površina između promjene stanja a i promjene stanja b.



Slika 2.1. Realni kružni proces

2.1. Pretvorba toplinske u mehaničku energiju

U kružnom procesu dobiveni rad L jednak je razlici dovedene i odvedene topline. Da bi doveli i odveli toplinu u procesu potrebni su nam ogrjevni (za dovođenje topline) i rashladni (za odvođenje topline) spremnici. Također potrebna je i radna tvar u obliku plina ili plinske smjese koja služi kao radni posrednik.



Slika 2.2. Dovođenje i odvođenje topline u procesu

Prema prvom zakonu termodinamike, povećanje unutarnje energije zatvorenog sustava jednaka je predanoj toplini u sustav umanjenoj za rad koji on izvrši. To je princip očuvanja energije, što znači da se energija ne može niti stvoriti niti uništiti, već transformirati u različite oblike.

$$\Delta U = Q - L \quad (2.1)$$

Početno toplinsko stanje radne tvari u kružnom procesu jednako je kao i krajnje toplinsko stanje što znači da je promjena unutarnje energije jednaka nuli:

$$\Delta U = 0 \quad (2.2)$$

Uklanjanjem varijable unutarnje energije iz početne jednadžbe dobivamo da je dobiveni rad L jednak toplini predanoj radnoj tvari Q :

$$L = Q \quad (2.3)$$

Toplina predana radnoj tvari je razlika između dovedene i odvedene topline u kružnom procesu:

$$Q = |Q| - |Q_0| \quad (2.4)$$

Zaključuje se da se dobiveni rad L može izračunati iz razlike dovedene i odvedene topline:

$$L = |Q| - |Q_0| \quad (2.5)$$

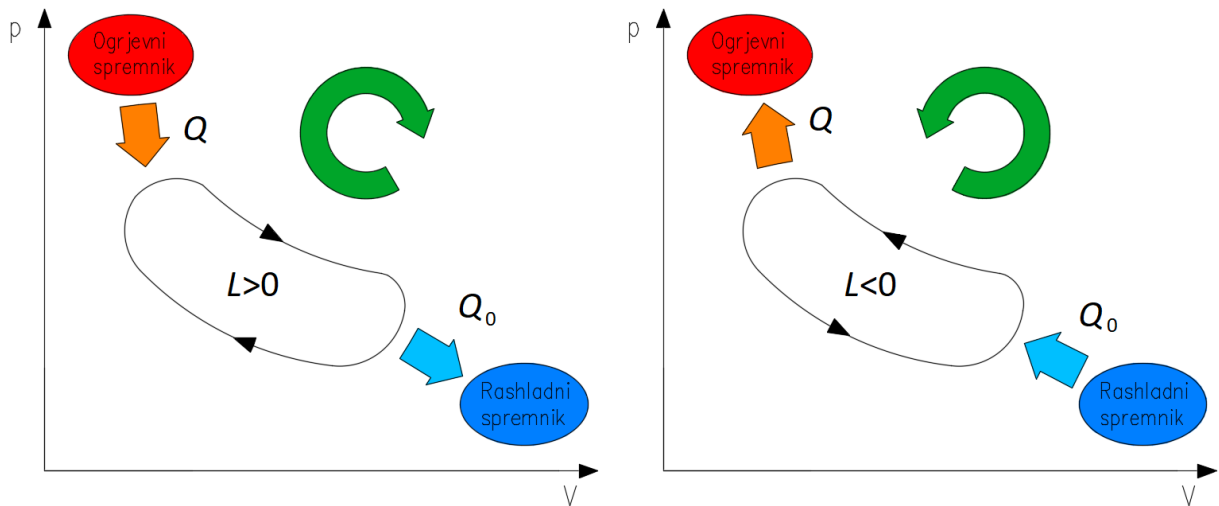
Toplinski stupanj djelovanja η je pokazatelj iskoristivosti procesa koji se računa pomoću omjera dobivenog rada L i dovedene topline Q :

$$\eta = \frac{\text{dobiveni rad}}{\text{dovedena toplina}} \quad (2.6)$$

$$\eta = \frac{L}{Q} = \frac{|Q| - |Q_0|}{|Q|} = 1 - \frac{|Q_0|}{|Q|} < 1 \quad (2.7)$$

Toplinski stupanj djelovanja uvijek će biti manji od 1 iz razloga što se u kružnom procesu pri pretvorbi toplinske energije u mehanički rad izgubi dio toplinske energije, tj. preda rashladnom spremniku. Teži se što većem stupnju djelovanja kako bi pretvorili što više toplinske energije u mehanički rad, a iskoristivost bila što veća.

Do sada opisani kružni procesi su desnokretni kod kojih se promjena stanja u pV dijagramu odvija u smjeru kazaljke na satu i sveukupni dobiveni rad L pozitivne je vrijednosti. Desnokretni procesi su osnova za rad motora s unutarnjim izgaranjem. Postoje također ljevokretni procesi kod kojih se promjena stanja u pV dijagramu odvija suprotno od smjera kazaljke na satu i sveukupni dobiveni rad je negativan tj. potrebno je utrošiti rad. Primjenu ljevokretnog procesa možemo naći u rashladnim uređajima.

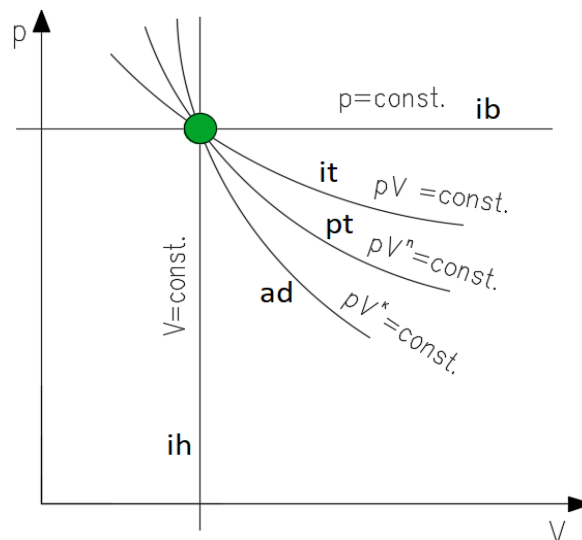


Slika 2.3. Desnokretni i lijevokretni kružni procesi

2.2. Elementarni kružni procesi

U praksi se jednostavni idealni kružni procesi obično sastoje od četiri termodinamičke promjene stanja. Osnovne promjene stanja idealnih plinova jesu:

- izohora (konstantan volumen, $V = \text{const.}$),
- izobara (konstantan tlak, $p = \text{const.}$),
- izoterma (konstantna temperatura, $T = \text{const.}$, $p \cdot V = \text{const.}$),
- adijabata (nema promjene topline, $Q = 0$, $p \cdot V^\kappa = \text{const.}$) i
- politropa ($p \cdot V^n = \text{const.}$).



Slika 2.4. Promjene stanja idealnih plinova

Elementarni kružni procesi su procesi koji su sastavljeni od dva para istovrsnih promjena stanja.

U elementarne kružne procese spadaju:

- Ericssonov kružni proces koji se sastoji od 2 izobare i 2 izoterme
- Cayleyev kružni proces koji se sastoji od 2 izobare i 2 politrope
- Jouleov kružni proces koji se sastoji od 2 izobare i 2 adijabate
- Papinov kružni proces koji se sastoji od 2 izobare i 2 izohore
- Reitlingerov kružni proces koji se sastoji od 2 izoterme i 2 politrope
- Carnotov kružni proces koji se sastoji od 2 izoterme i 2 adijabate
- Stirlingov kružni proces koji se sastoji od 2 izoterme i 2 izohore
- Lorenzov kružni proces koji se sastoji od 2 politrope i 2 adijabate
- Crossleyev kružni proces koji se sastoji od 2 politrope i 2 izohore
- Ottov kružni proces koji se sastoji od 2 adijabate i 2 izohore

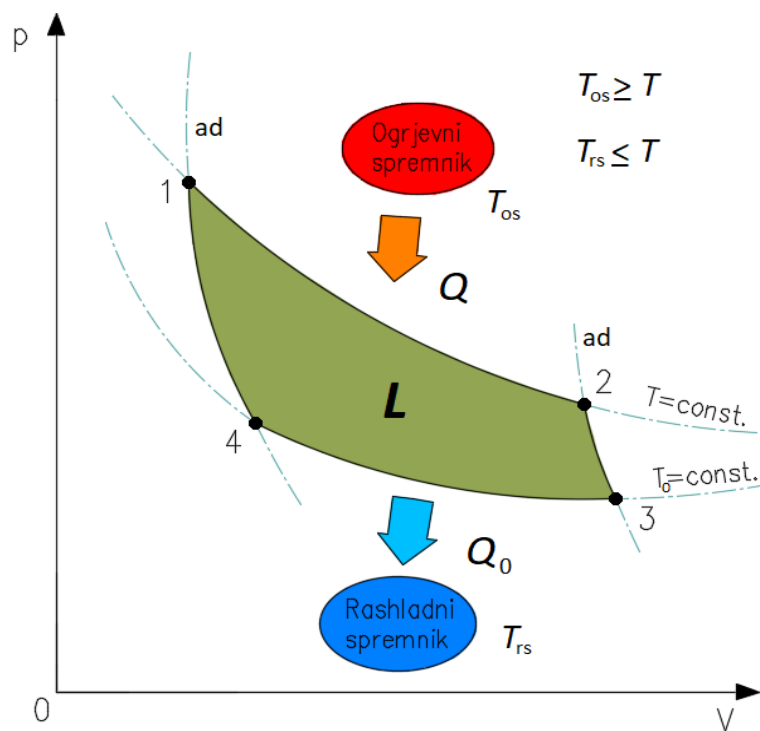
Uz Ottov kružni proces kojeg ćemo poslije opisati, bitno je još istaknuti Carnotov kružni proces.

2.2.1. Carnotov kružni proces

Drugi zakon termodinamike postavlja ograničenja na smjer prijenosa topline i postavlja gornju granicu učinkovitosti pretvorbe topline u rad u toplinskim strojevima. Francuski inženjer i fizičar, Nicolas Léonard Sadi Carnot, unaprijedio je proučavanje drugog zakona formiranjem principa (nazvanog Carnotov princip) koji specificira ograničenja maksimalne učinkovitosti koji bilo koji toplinski stroj može postići. Ukratko, ovo načelo kaže da učinkovitost termodinamičkog ciklusa ovisi isključivo o razlici između temperatura ogrjevnog i rashladnog spremnika.

Kako je već spomenuto, Carnotov kružni proces se sastoji od 2 izoterme i 2 adijabate. Često se crta u tlak-volumen (pV dijagram) i temperaturno-entalpijskom (Ts dijagram) dijagramu. Kada se crta na pV dijagramu, izotermni procesi slijede linije izoterme plina, adijabatski procesi kreću se između izotermi, a područje ograničeno cijelim procesom predstavlja ukupni rad koji se može izvršiti tijekom jednog ciklusa.

Carnotov kružni proces predstavlja najvažniji proces jer ima najveći toplinski stupanj djelovanja za zadanu temperaturu ogrjevnog i rashladnog spremnika i kao takav koristi se u svrhu ocjenjivanja ostalih kružnih procesa.



Slika 2.5. Carnotov kružni proces u pV dijagramu

Na slici 2.5. jasno su vidljive četiri promjene stanja:

- 1-2 izotermna ekspanzija plina uz dovođenje topline iz ogrjevnog spremnika,
- 2-3 adijabatska ekspanzija plina,
- 3-4 izotermna kompresija plina uz odvođenje topline u rashladni spremnik i
- 4-1 adijabatska kompresija plina.

Temperatura ogrjevnog spremnika koja je viša od maksimalne temperature procesa T označena je s T_{0s} , a temperatura rashladnog spremnika koja je manja od najniže temperature procesa T_0 označena je s T_{rs} .

Izvršeni rad u kružnom procesu je zbroj svih radova za svaku promjenu stanja:

$$L = L_{12} + L_{23} + L_{34} + L_{41} \quad (2.8)$$

$$L = |L_{it}|_{12} + |L_{ad}|_{23} - |L_{it}|_{34} - |L_{ad}|_{41} \quad (2.9)$$

Najveći mehanički rad moguće je ostvariti na način da temperatura radne tvari pri kojoj se toplina dovodi bude jednaka temperaturi ogrjevnog spremnika te da temperatura radne tvari pri kojoj se toplina odvodi bude jednaka temperaturi rashladnog spremnika. U tom bi graničnom slučaju kružni proces bio potpuno povrativ.

Toplinski stupanj djelovanja Carnotovog kružnog procesa je omjer rada L i dovedene topline Q :

$$\eta_c = \frac{L}{Q} = \frac{|Q| - |Q_0|}{|Q|} = 1 - \frac{|Q_0|}{|Q|} \quad (2.10)$$

Uvrštavanjem jednadžbi za dovedenu i odvedenu toplinu i daljnjim uređivanjem formule (2.10) dobivena je formula:

$$\eta_c = \frac{|T| - |T_0|}{|T|} = 1 - \frac{|T_0|}{|T|} \quad (2.11)$$

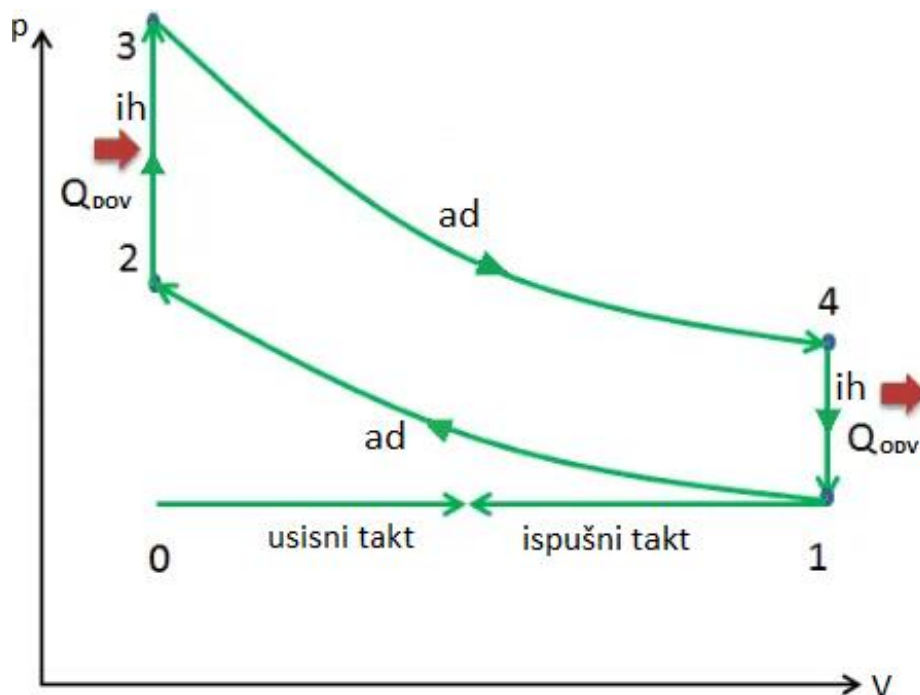
Zaključak je da će toplinski stupanj djelovanja biti veći što je temperatura radne tvari pri kojoj se toplina dovodi viša i što je temperatura radne tvari pri kojoj se toplina odvodi niža. Iz toga slijedi da toplinski stupanj djelovanja ovisi samo o temperaturama radne tvari pri dovođenju i odvođenju topline, a ne ovisi o vrsti radne tvari.

3. OTTOV KRUŽNI PROCES

Njemački inženjer Nikolaus August Otto, 1876. godine unaprijedio je proučavanje toplinskih motora izgradnjom prvog funkcionalnog četverotaktnog motora. Stacionarni motor koji za gorivo koristi mješavinu ugljenog plina i zraka. Wilhelm Maybach (1846.-1929.), jedan od najznačajnijih njemačkih inženjera, usavršio je konstrukciju koja se već krajem 1876. počela proizvoditi u velikim količinama. Ti su izumi brzo preoblikovali svijet u kojem su živjeli.

Ciklus Otto motora naziva se Ottov kružni proces. To je jedan od najčešćih kružnih procesa koji se nalaze u automobilskim motorima i opisuje funkcioniranje tipičnog klipnog motora s paljenjem svjećicom. Za razliku od Carnotovog kružnog procesa, Ottov proces ne izvršava izotermne procese jer se oni moraju odvijati vrlo sporo. U idealnom Ottovom procesu, sustav koji izvršava ciklus prolazi niz od četiri procesa: dva adijabatska procesa izmjenjuju se s dva izohorna procesa.

3.1. Faze Ottovog kružnog procesa



Slika 3.1. Idealni Ottov kružni proces u pV dijagramu

Faze procesa su:

- Usisavanje gorive smjese (goriva i zraka) u cilindar. (0-1)
- Smjesa goriva i zraka se komprimira adijabatski iz stanja 1 u stanje 2. Okolina djeluje na plin, povećavajući njegovu unutarnju energiju (temperaturu) i komprimirajući ga. S druge strane, entropija ostaje nepromijenjena. Volumen se mijenja, a omjer V_1/V_2 poznat je kao omjer kompresije. (1-2)
- Faza pri konstantnom volumenu. Tijekom ovog procesa dolazi do paljenja smjese goriva i zraka ubrizgane u komoru i naknadno brzo sagorijevanje. Tlak raste, a omjer P_3/P_2 poznat je kao stupanj povišenja tlaka. (2-3)
- Plin adijabatski ekspandira iz stanja 3 u stanje 4. Plin djeluje na okolinu i gubi količinu unutarnje energije jednaku radu koji napušta sustav. Entropija opet ostaje nepromijenjena. (3-4)
- Proces završava hlađenjem plinova izgaranja uz konstantan volumen. Tlak radnog plina pada od točke 4 do točke 1. Ispušni ventil se otvara u točki 4. (4-1)
- Ispuh plinovite smjese. (1-0)

Tijekom Ottovog procesa klip vrši rad na plinu za vrijeme adijabatske kompresije (1-2) te plin obavlja rad na klipu tijekom adijabatske ekspanzije (3-4). Razlika između rada plina i rada na samom plinu je površina koju zatvara krivulja procesa. Rad proizveden procesom pomnožen s brzinom procesa (ciklusa po sekundi) jednak je snazi koju proizvodi Ottov motor.

3.2. Toplinski stupanj djelovanja Ottovog procesa

Općenito, toplinski stupanj djelovanja bilo kojeg toplinskog motora definiran je kao omjer rada L koji obavlja i dovedene topline Q_{23} . Znamo da se rad može raspisati kao razlika između dovedene i odvedene topline u procesu. Stoga formula za toplinski stupanj djelovanja može se zapisati kao:

$$\eta_0 = \frac{L}{Q_{23}} = \frac{|Q_{23}| - |Q_{41}|}{|Q_{23}|} = 1 - \frac{|Q_{41}|}{|Q_{23}|} \quad (3.12)$$

Dovedena toplina nastaje tijekom izgaranja mješavine goriva i zraka, kada se pojavi iskra, pri konstantnom volumenu. Budući da tijekom izohornog procesa nema ostvarivanja rada, prvi

zakon termodinamike diktira da je razlika unutarnje energije jednaka razlici topline, tj. $\Delta U = \Delta Q$. Prema tome, formule za dovedenu i odvedenu toplinu mogu se zapisati kao:

$$Q_{23} = G \cdot c_v \cdot (T_3 - T_2) \quad (3.13)$$

$$Q_{41} = G \cdot c_v \cdot (T_1 - T_4) \quad (3.14)$$

Zamjenom ovih izraza za dovedenu i odvedenu toplinu u izrazu za toplinski stupanj djelovanja dobiva se:

$$\eta_0 = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} \quad (3.15)$$

Gornji izraz može se pojednostaviti koristeći činjenicu da su procesi 1-2 i 3-4 adijabatski, a za adijabatski proces vrijedi sljedeća formula:

$$\left(\frac{V_2}{V_1}\right)^\kappa = \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^{\kappa-1} \quad (3.16)$$

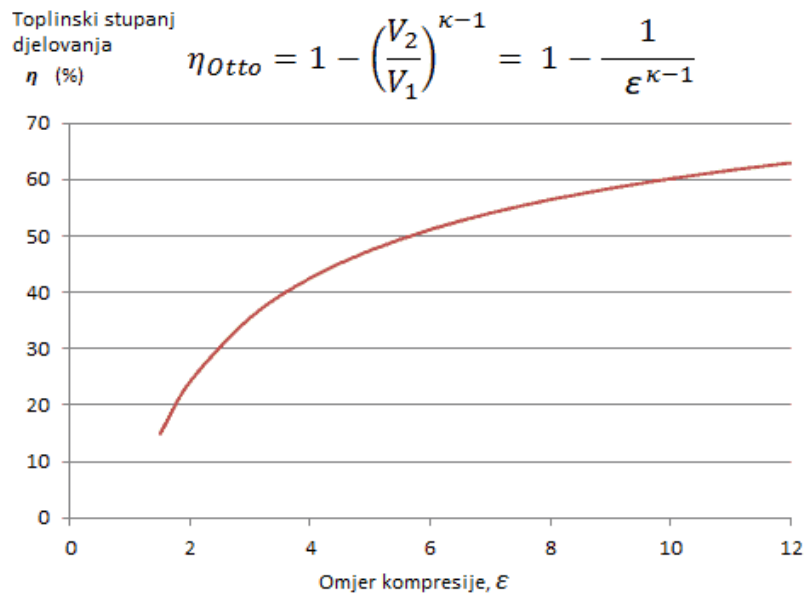
Dalje se može izvesti:

$$\frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{\kappa-1} \quad (3.17)$$

U ovoj jednadžbi omjer V_1/V_2 poznat je kao omjer kompresije, ε . Kada se prepiše izraz za toplinski stupanj djelovanja koristeći omjer kompresije, zaključuje se da je toplinski stupanj djelovanja Ottovog procesa funkcija omjera kompresije i eksponenta adijabate κ .

$$\eta_0 = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\kappa-1}} \quad (3.18)$$

To je vrlo koristan zaključak jer je poželjno postići visok omjer kompresije kako bi se izvuklo više mehaničke energije iz dane mase mješavine zraka i goriva. Veći omjer kompresije omogućuje postizanje iste temperature izgaranja s manje goriva uz dulji proces ekspanzije. To stvara veću mehaničku izlaznu snagu i snižava temperature ispušnih plinova. Smanjenje temperature ispuha uzrokuje smanjenje energije koja se odbacuje u okolinu. Ovaj odnos je prikazan na slici 3.2., za $\kappa=1,4$, koji vrijedi za dvoatomne plinove.



Slika 3.2. Toplinski stupanj djelovanja Ottovog procesa ovisan o omjeru kompresije

3.3. Primjena Ottovog procesa u tehničkoj praksi

Ottov ciklus je skup procesa koje koriste motori s unutarnjim izgaranjem na paljenje svjećicom (dvotaktni ili četverotaktni motori). Nikolaus August Otto prvi je dizajnirao ono što je poznato kao četverotaktni motor.

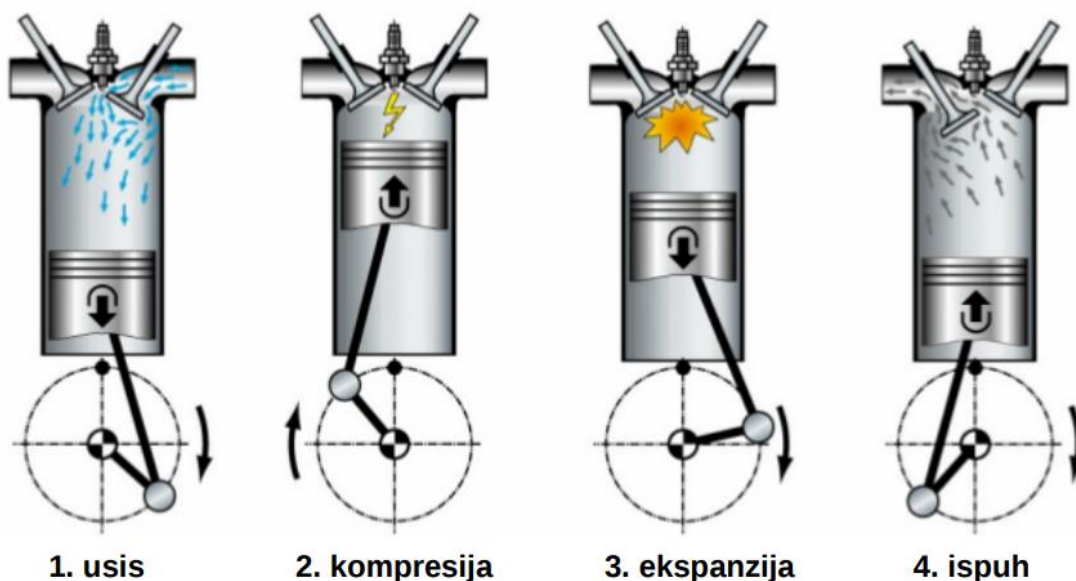
Četverotaktni proces Ottovog motora sastoji se od:

- Usisnog takta: Klip se kreće od gornje mrtve točke (GMT) do donje mrtve točke (DMT). U ovom taktu usisni ventil je otvoren dok klip vuče smjesu goriva i zraka u cilindar stvaranjem podtlaka u cilindru njegovim kretanjem prema dolje.
- Kompresijskog takta. Klip se kreće od donje mrtve točke (DMT) do gornje mrtve točke (GMT). U ovom taktu, i usisni i ispušni ventil su zatvoreni. Stoga je smjesa goriva i zraka komprimirana. Na kraju ovog takta smjesa goriva i zraka se zapali iskrom, što uzrokuje daljnji porast tlaka i temperature u komori. Na kraju ovog takta, radilica je završila puni okret od 360 stupnjeva.
- Takta ekspanzije. Klip se kreće od gornje mrtve točke (GMT) do donje mrtve točke (DMT). Uslijed dovođenja topline izgaranjem, plinovima u cilindru raste temperatura a zbog toga i tlak, plinovi ekspandiraju i pritom pomiču klip koji posredstvom osovinice i

klipnjače okreće koljenasto vratilo. Na taj se način kemijska energija goriva pretvara u mehanički rad na koljenastom vratilu.

- Takta ispuha. Klip se kreće od donje mrtve točke (DMT) do gornje mrtve točke (GMT). Ispušni ventil je otvoren u ovom taktu dok klip izvlači ispušne plinove iz komore. Na kraju ovog hoda, radilica je završila drugi puni okret od 360 stupnjeva.

Na slici 3.3. je prikaz gore opisanog procesa.



Slika 3.3. Način rada četverotaktnog Ottovog motora

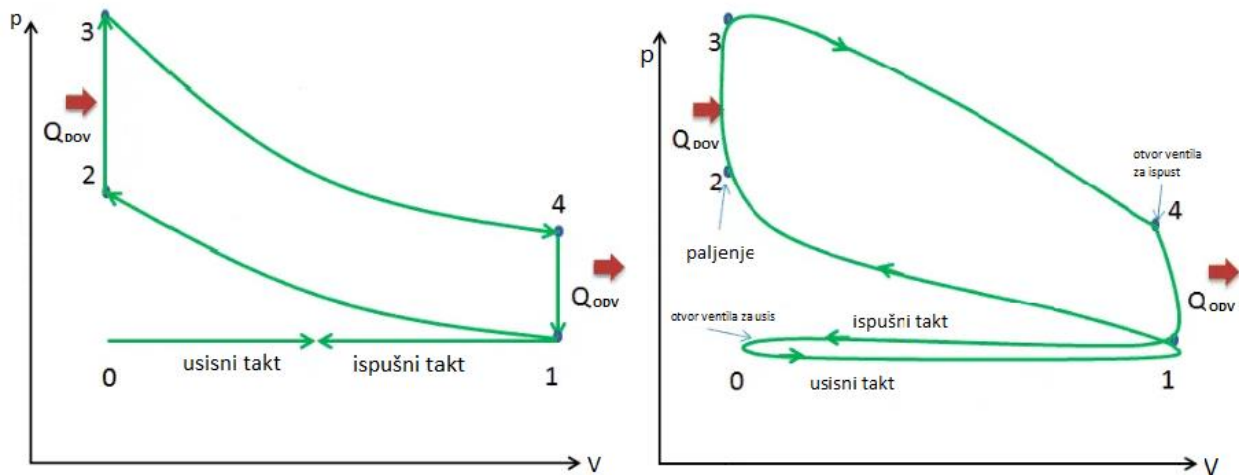
3.4. Kompresijski omjer

Omjer kompresije, ϵ , definiran je kao omjer volumena u donjoj mrtvoj točki i volumena u gornjoj mrtvoj točki. To je ključna karakteristika mnogih motora s unutarnjim izgaranjem. Kompresijski omjer igra veliku ulogu u procesu zbog toga što utječe na izlaznu snagu, ekonomičnost goriva i toplinski stupanj djelovanja. Kod benzinskih motora on najčešće iznosi od 7 do 10, dok je kod dizelskih motora znatno veći i iznosi od 18 do 25. Razlika između kompresijskih omjera kod benzinskih motora i dizelskih motora je zbog načina zapaljenja goriva. Budući da se goriva smjesa kod benzinskih motora kontrolirano pali iskrom električne svjeće, kompresijski omjer ne smije biti prevelik kako bi se izbjegla pojava detonantnog izgaranja.

Detonantno izgaranje je pojava u kojoj dolazi do istovremenog samozapaljenja gorive smjese na više mjesta u cilindru koje nije uzrokovano iskrom električne svjeće. Fronta plamena nekontrolirano se širi i uzrokuje detonaciju. Ova pojava je opasna jer uzrokuje oštećenja klipova, ležajeva i ostalih dijelova. Događa se zbog određenih nepravilnosti kao što su neadekvatno gorivo, preopterećen motor ili problemi s hlađenjem. Kako bi se izbjeglo detonantno izgaranje važna je kvaliteta goriva s odgovarajućim oktanskim brojem. Oktanski broj se definira kao mjera koja pokazuje koliko benzin može podnijeti kompresije prije nego dođe do samozapaljenja. Što je oktanski broj veći, gorivo je stabilnije te može podnijeti više kompresije i zagrijavanja.

3.5. Usporedba idealnog i stvarnog Ottovog procesa

Glavne razlike između idealnog i stvarnog Otto motora prikazane su na slici 3.4. U stvarnosti, idealni ciklus se ne događa, a sa svakim procesom povezani su mnogi gubici. Za stvarni ciklus, oblik pV dijagrama sličan je idealnom, ali je površina (rad) koju okružuje pV dijagram uvijek manja od idealne vrijednosti.



Slika 3.4. Idealni i stvarni Otto procesi

Idealni Otto ciklus temelji se na sljedećim pretpostavkama:

- Zatvoreni proces; Najveća razlika između dva dijagrama je pojednostavljenje takta usisa i ispuha u idealnom ciklusu. U taktu ispuha, toplina Q_{ODV} se izbacuje u okolinu. U pravom motoru plin napušta motor i zamjenjuje ga nova mješavina zraka i goriva.

- Izohorno trenutačno dodavanje topline. U pravim motorima, dodavanje topline nije trenutno. Stoga maksimalni tlak nije u gornjoj mrtvoj točki, već odmah nakon.
- U dijelu procesa nema izmjene topline (adijabatska ekspanzija i kompresija). U stvarnim motorima uvijek postoji izmjena topline koja smanjuje toplinski stupanj djelovanja.
- Potpuno izgaranje smjese zraka i goriva.
- Nema rada na pumpanju. Rad pumpanja je razlika između rada obavljenog tijekom ispušnog takta i rada obavljenog tijekom usisnog takta. U stvarnim ciklusima postoji razlika između ispušnog i ulaznog tlaka.
- Nema gubitaka ispuhivanja. Gubitak ispuhivanja uzrokovan je ranim otvaranjem ispušnih ventila. To rezultira gubitkom radnog učinka tijekom takta ekspanzije.
- Nema gubitaka udaraca. Gubitak udarcima uzrokovan je istjecanjem komprimiranih plinova kroz klipne prstenove i druge pukotine.
- Nema gubitaka uslijed trenja.

Zbog svih ovih parametara dobivena snaga stvarnog procesa će uvijek biti manja od snage idealnog procesa.

4. DIESELOV KRUŽNI PROCES

Njemački izumitelj Rudolf Diesel, 1890. godine patentirao je svoj učinkoviti motor s unutarnjim izgaranjem s kompresijskim paljenjem sporog gorenja. Izvorni proces koji je predložio bio je proces konstantne temperature. U kasnijim godinama Diesel je shvatio da njegov izvorni proces neće funkcionirati, te je usvojio proces konstantnog tlaka, koji je poznat kao Dieselov proces.

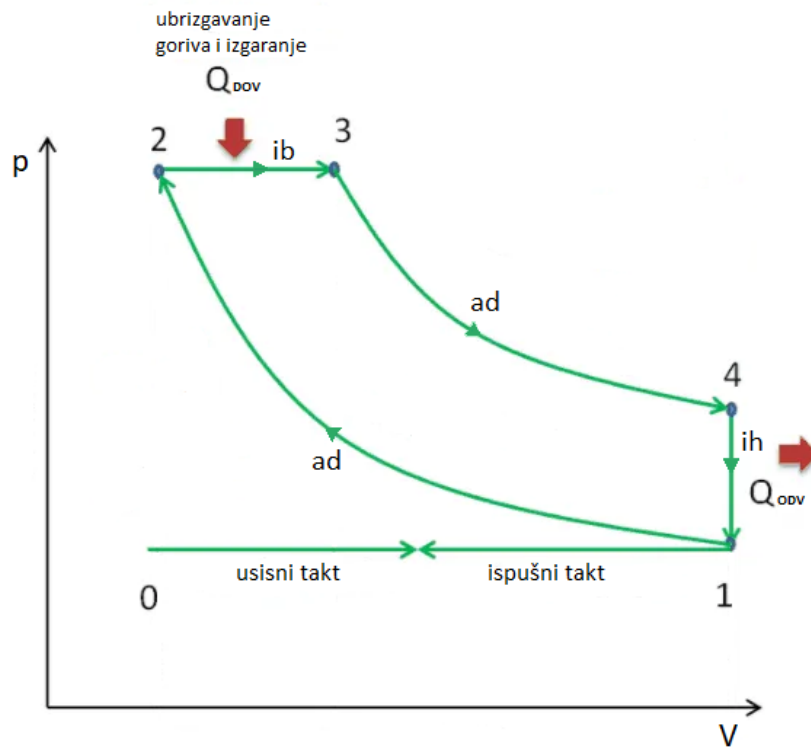
Dieselov proces također je jedan od najčešćih kružnih procesa koji je osnova za rad automobilskih motora i opisuje funkcioniranje tipičnog klipnog motora s kompresijskim paljenjem. Dizelov motor je po radu sličan benzinskom motoru.

Za razliku od Ottovog procesa, Dieselov proces ne provodi izohorno dodavanje topline. U idealnom Dieselovom procesu, sustav koji izvršava proces prolazi niz od četiri promjene stanja: dva adijabatska procesa izmjenjuju se s jednim izohornim procesom i jednim izobarnim procesom.

Najvažnije razlike između Dieselovog i Ottovog procesa su:

- Kompresijski omjer nije bitan kod Dieselovog procesa jer se komprimira čisti zrak pa nema opasnosti od samozapaljenja.
- Zbog visoke temperature koja se razvija tijekom adijabatske kompresije, gorivo se spontano zapali dok se ubrizgava. Stoga nisu potrebne svjećice.
- Prije početka takta ekspanzije, mlaznice počinju ubrizgavati gorivo izravno u komoru za izgaranje. Stoga se prvi dio takta ekspanzije događa približno pri konstantnom tlaku.
- Veći omjeri kompresije mogu se postići u Dizel motorima nego u Otto motorima.

4.1. Faze Dieselovog kružnog procesa



Slika 4.1. Dieselov kružni proces u pV dijagramu

Faze procesa su:

- Usisavanje čistog zraka (bez goriva) u cilindar. (0-1)
- Zrak se komprimira adijabatski iz stanja 1 u stanje 2. Okolina djeluje na plin, povećavajući njegovu unutarnju energiju (temperaturu) i komprimirajući ga. S druge strane, entropija ostaje nepromijenjena. Volumen se mijenja, a omjer V_1/V_2 poznat je kao omjer kompresije. (1-2)
- U ovoj fazi, između stanja 2 i stanja 3, postoji konstantan tlak te se dodava toplina u zrak iz vanjskog izvora (izgaranje ubrizganog goriva) dok se klip kreće prema V_3 . (2-3)
- Plin adijabatski ekspanzira iz stanja 3 u stanje 4. Plin djeluje na okolinu i gubi količinu unutarnje energije jednaku radu koji napušta sustav. Entropija opet ostaje nepromijenjena. (3-4)
- Proces završava hlađenjem plinova izgaranja uz konstantan volumen. Tlak radnog plina pada od točke 4 do točke 1. Ispušni ventil se otvara u točki 4. (4-1)
- Ispuh plinovite smjese. (1-0)

Tijekom Dieselog procesa klip vrši rad na plinu za vrijeme adijabatske kompresije (1-2) te plin obavlja rad na klipu tijekom izobarnog dodavanja topline (2-3) i adijabatske ekspanzije (3-4). Razlika između rada plina i rada na samom plinu je površina koju zatvara krivulja procesa.

4.2. Toplinski stupanj djelovanja Dieselog procesa

Kao što je već spomenuto kod Ottovog procesa, toplinski stupanj djelovanja bilo kojeg toplinskog motora definiran je kao omjer rada L koji obavlja i dovedene topline Q_{23} . Zna se da se rad može raspisati kao razlika između dovedene i odvedene topline u procesu. Stoga formula za toplinski stupanj djelovanja može se zapisati kao:

$$\eta_D = \frac{L}{Q_{23}} = \frac{|Q_{23}| - |Q_{41}|}{|Q_{23}|} = 1 - \frac{|Q_{41}|}{|Q_{23}|} \quad (4.19)$$

Dovedena toplina nastaje tijekom izgaranja mješavine goriva i zraka, otprilike pri konstantnom tlaku.

Formule za dovedenu i odvedenu toplinu mogu se zapisati kao:

$$Q_{23} = G \cdot c_p \cdot (T_3 - T_2) \quad (4.20)$$

$$Q_{41} = G \cdot c_v \cdot (T_1 - T_4) \quad (4.21)$$

Zamjenom ovih izraza za dovedenu i odvedenu toplinu u izrazu za toplinski stupanj djelovanja dobiva se:

$$\eta_D = 1 - \frac{1}{\kappa} \cdot \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} \quad (4.22)$$

Ova se jednadžba može preurediti u oblik s omjerom kompresije i stupnjem ubrizgavanja goriva:

$$\eta_D = 1 - \frac{1}{\kappa} \cdot \frac{1}{\varepsilon^{\kappa-1}} \cdot \frac{\varphi^{\kappa-1}}{\varphi-1} \quad (4.23)$$

Zaključuje se da toplinski stupanj djelovanja Dieselog procesa ovisi o omjeru kompresije ε , stupnju ubrizgavanja goriva φ te eksponenti adijabatske promjene stanja idealnog plina κ .

U usporedbi s toplinskim stupnjem djelovanja Ottovog procesa, može se vidjeti da će Ottov proces biti učinkovitiji za isti omjer kompresije, ali Dizel motori su obično učinkovitiji budući da mogu raditi pri višim stupnjevima kompresije.

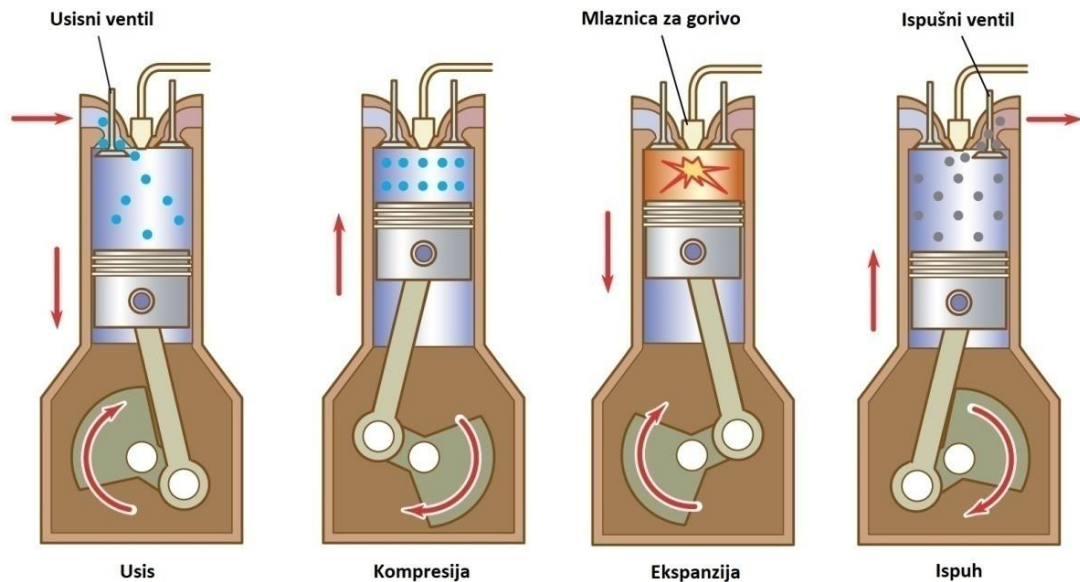
4.3. Primjena Dieselog procesa u tehničkoj praksi

Dizelski motori rade po modificiranom kružnom procesu koji se zove Sabatheov proces. Dizelski motori mogu biti projektirani kao dvotaktni ili četverotaktni. Četverotaktni dizel motor je motor s unutarnjim izgaranjem u kojem klip obavlja četiri odvojena takta dok okreće koljenasto vratilo.

Četverotaktni proces Dieselog motora sastoji se od:

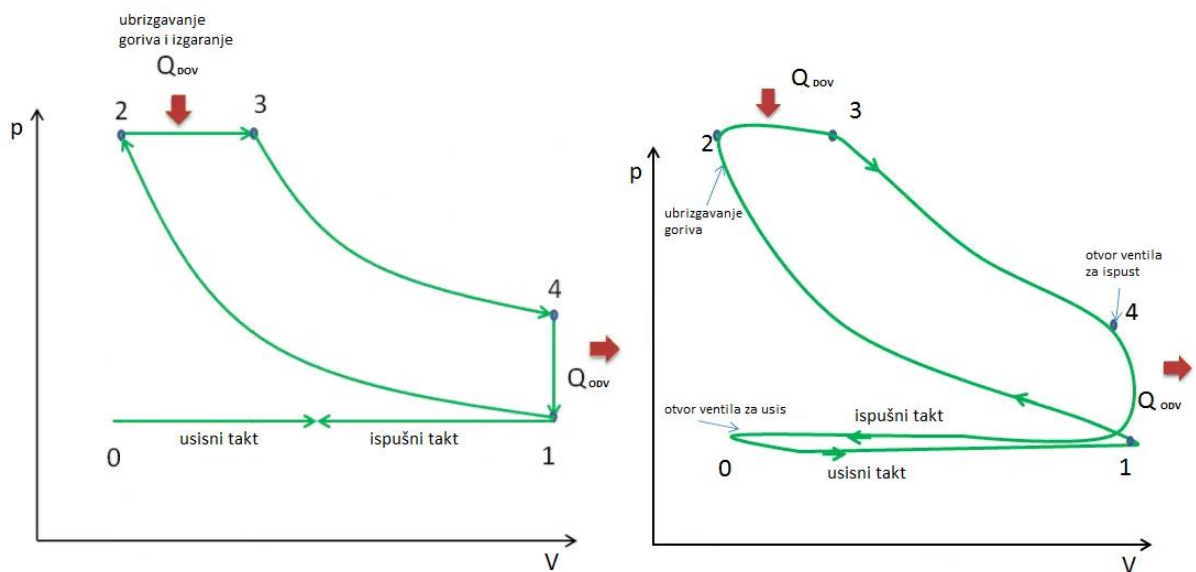
- Usisnog takta. Klip se kreće od gornje mrtve točke (GMT) do donje mrtve točke (DMT). U ovom taktu usisni ventil je otvoren dok klip vuče čisti zrak u cilindar stvaranjem podtlaka u cilindru njegovim kretanjem prema dolje.
- Kompresijskog takta. Klip se kreće od donje mrtve točke (DMT) do gornje mrtve točke (GMT). U ovom taktu su usisni i ispušni ventili zatvoreni što rezultira adijabatskom kompresijom zraka. Na kraju ovog takta smjesa goriva i zraka se zapali iskrom, što uzrokuje daljnji porast tlaka i temperature u komori. Na kraju ovog takta, radilica je završila puni okret od 360 stupnjeva.
- Takta ekspanzije. Klip se kreće od gornje mrtve točke (GMT) do donje mrtve točke (DMT). I u ovom taktu su usisni i ispušni ventili zatvoreni. Na početku takta ekspanzije javlja se izobarno izgaranje. U tom intervalu tlak ostaje konstantan jer se klip spušta i volumen se povećava. Na kraju izobarne promjene stanja, ubrizgavanje goriva i izgaranje su završeni, a temperatura plina u cilindru se povisila. Dalje se plin adijabatski ekspandira. U tom taktu klip se tjera prema koljenastom vratilu, volumen se povećava, a rad na klipu vrši plin.
- Takta ispuha. Klip se kreće od donje mrtve točke (DMT) do gornje mrtve točke (GMT). Ispušni ventil je otvoren u ovom taktu dok klip izvlači ispušne plinove iz komore. Na kraju ovog hoda, radilica je završila drugi puni okret od 360 stupnjeva.

U idealnom slučaju, adijabatska ekspanzija bi se trebala nastaviti sve dok tlak ne padne na tlak okolnog zraka. To bi povećalo toplinski stupanj djelovanja takvog motora, ali to također uzrokuje praktične poteškoće. Jednostavno, motor bi morao biti mnogo veći.



Slika 4.2. Primjer rada četverotaktnog Diesellovog motora

4.4. Usporedba idealnog i stvarnog Diesellovog procesa



Slika 4.3. Idealni i stvarni Diesel procesi

U potpoglavlju 3.5. opisane su razlike između idealnog i stvarnog Ottovog procesa. Iste razlike vrijede i za Diesellov proces, samo što još postoji razlika zbog izobarnog dodavanja topline. Naime, u pravim motorima dodavanje topline nije nikada u potpunosti izobarično što je vidljivo na slici 4.3. između stanja 2 i stanja 3.

5. PRORAČUN KARAKTERISTIČNIH VELIČINA OTTOVOG I DIESELOVOG PROCESA

Pri zadavanju završnog zadatka zadano je početno stanje i Ottovog i Dieselovog procesa uz pomoć kojega treba izračunati ostale točke procesa, dovedenu i odvedenu toplinu, izvršeni rad te toplinski stupanj djelovanja. Zadani su još dodatni uvjeti za proračun Dieselovih procesa kako bi mogli usporediti razlike između Ottovog i Dieselovog procesa.

5.1. Ottov kružni proces

5.1.1. Karakteristične točke kružnog procesa (p, V, T)

Za radni medij mase 1 kg zadana je temperatura okoline koja iznosi 40 °C, maksimalna temperatura koja iznosi 700 °C, tlak u točki 1 koji iznosi 1 bar, kompresijski omjer koji iznosi 10 i eksponent adijabate čija je vrijednost 1,4.

Zadani podaci:

$$p_1 = 1 \text{ bar}$$

$$t_1 = 40 \text{ °C}$$

$$t_3 = 700 \text{ °C}$$

$$G = 1 \text{ kg}$$

$$\varepsilon = 10$$

$$\kappa = 1,4$$

Gdje je:

p_1 - tlak u točki 1 [bar]

t_1 - temperatura u točki 1 [°C]

t_3 - temperatura u točki 3 [°C]

G - masa radnog medija [kg]

ε - kompresijski omjer

κ - eksponent adijabate

Točka 1:

U proračunu se koriste drukčije jedinice od zadanih pa se vrši pretvorba °C u K i bar u Pa:

$$T_1 = 40 \text{ °C} = 313,15 \text{ K}$$

$$T_3 = 700 \text{ °C} = 973,15 \text{ K}$$

$$p_1 = 1 \text{ bar} = 1 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

Volumen u točki 1 može se izračunati pomoću jednadžbe stanja idealnog plina:

$$p_1 \cdot V_1 = G \cdot R \cdot T_1 \quad (5.24)$$

Gdje je:

R – plinska konstanta za zrak koja iznosi: $R = 287 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$

Poznavajući sve podatke može se izračunati volumen u točki 1:

$$V_1 = \frac{G \cdot R \cdot T_1}{p_1} = \frac{1 \cdot 287 \cdot 313,15}{10^5} = 0,899 \text{ m}^3 \quad (5.25)$$

Točka 2:

Kako se između točke 1 i točke 2 odvija adijabatska kompresija, koriste se formule za izračun adijabatske promjene stanja koje koriste omjere temperatura, tlakova i volumena kako bi se izračunale razlike između početka i kraja promjene.

Omjer temperatura se zapisuje kao:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\kappa-1} \quad (5.26)$$

Kompresijski omjer je omjer između početnog (maksimalnog) i krajnjeg (minimalnog) volumena, tj. omjer volumena prve i druge točke. Poznavajući to može se urediti gornja formula:

$$T_2 = T_1 \cdot \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\kappa-1} = T_1 \cdot \varepsilon^{\kappa-1} \quad (5.27)$$

Sada se iz gornjeg izraza može izračunati temperatura u točki 2:

$$T_2 = T_1 \cdot \varepsilon^{\kappa-1} = 313,15 \cdot 10^{1,4-1} = 786,59 \text{ K} \quad (5.28)$$

Tlak se računa preko sljedeće formule:

$$p_2 = p_1 \cdot \varepsilon^{\kappa} = 10^5 \cdot 10^{1,4} = 25,12 \cdot 10^5 \text{ Pa} \quad (5.29)$$

Volumen u točki 2 može se izračunati preko kompresijskog omjera:

$$V_2 = \frac{V_1}{\varepsilon} = \frac{0,899}{10} = 0,0899 \text{ m}^3 \quad (5.30)$$

Točka 3:

Zadana je maksimalna temperatura:

$$T_3 = 700 \text{ °C} = 973,15 \text{ K}$$

Kod izohorne promjene stanja volumen ostaje konstantan pa je vrijednost volumena u točki 3 jednaka vrijednosti u točki 2:

$$V_3 = V_2 = 0,0899 \text{ m}^3 \quad (5.31)$$

Poznavajući to i poznavajući jednadžbe stanja idealnog plina:

$$\begin{aligned} p_2 \cdot V_2 &= G \cdot R \cdot T_2 \\ p_3 \cdot V_3 &= G \cdot R \cdot T_3 \end{aligned} \quad (5.32)$$

Mogu se pokratiti jednake varijable i dobije se:

$$\frac{p_2}{p_3} = \frac{T_2}{T_3} \quad (5.33)$$

Omjer tlakova u trećoj i drugoj točki procesa naziva se stupanj povišenja tlaka, ξ :

$$\frac{T_3}{T_2} = \frac{p_3}{p_2} = \xi \quad (5.34)$$

$$\xi = \frac{T_3}{T_2} = \frac{973,15}{786,59} = 1,24 \quad (5.35)$$

Poznavajući stupanj povišenja tlaka i tlak u točki 2, izračuna se tlak u točki 3:

$$p_3 = p_2 \cdot \xi = 25,12 \cdot 10^5 \cdot 1,24 = 31,15 \cdot 10^5 \text{ Pa} \quad (5.36)$$

Točka 4:

Od točke 3 do točke 4 se odvija adijabatska ekspanzija pa se opet koriste formule za izračun adijabatske promjene stanja:

$$\frac{T_4}{T_3} = \left(\frac{V_3}{V_4}\right)^{\kappa-1} = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{\kappa-1} = \frac{1}{\left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\kappa-1}} = \frac{1}{\varepsilon^{\kappa-1}} \quad (5.37)$$

Daljnijim raspisivanjem gornje formule dobije se iznos temperature u točki 4:

$$\begin{aligned} T_4 &= T_3 \cdot \frac{1}{\varepsilon^{\kappa-1}} = T_1 \cdot \xi \cdot \varepsilon^{\kappa-1} \cdot \frac{1}{\varepsilon^{\kappa-1}} \\ T_4 &= T_1 \cdot \xi = 313,15 \cdot 1,24 = 388,31 \text{ K} \end{aligned} \quad (5.38)$$

Kako je promjena stanja od točke 4 do točke 1 izohorna, volumen u točki 4 je jednak volumenu u točki 1:

$$V_4 = V_1 = 0,899 \text{ m}^3 \quad (5.39)$$

Tlak na kraju ekspanzije iznosi:

$$p_4 = p_3 \cdot \frac{1}{\varepsilon^{\kappa}} = 31,15 \cdot 10^5 \cdot \frac{1}{10^{1,4}} = 1,24 \cdot 10^5 \text{ Pa} \quad (5.40)$$

5.1.2. Dovedena i odvedena toplina

Dovedena toplina računa se kao umnožak mase radnog medija, specifične topline kod konstantnog volumena i razlike temperatura:

$$Q_{23} = G \cdot c_v \cdot (T_3 - T_2) \quad (5.41)$$

Gdje je:

Q_{23} - dovedena toplina [J]

G – masa radnog medija [kg]

c_v - specifična toplina kod konstantnog volumena [J/kg · K]

Specifična toplina pri konstantnom volumenu računa se pomoću sljedeće jednadžbe:

$$c_v = \frac{c_p}{\kappa} \quad (5.42)$$

Gdje je:

c_p - specifična toplina kod konstantnog tlaka [J/kg · K]

Specifična toplina pri konstantnom tlaku računa se pomoću sljedeće jednadžbe:

$$c_p = \frac{\kappa \cdot R}{\kappa - 1} = \frac{1,4 \cdot 287}{1,4 - 1} = 1004,5 \text{ J/kg} \cdot \text{K} \quad (5.43)$$

Specifična toplina pri konstantnom volumenu onda iznosi:

$$c_v = \frac{c_p}{\kappa} = \frac{1004,5}{1,4} = 717,5 \text{ J/kg} \cdot \text{K} \quad (5.44)$$

Može se izračunati dovedena toplina:

$$Q_{23} = G \cdot c_v \cdot (T_3 - T_2) = 1 \cdot 717,5 \cdot (973,15 - 786,59) = 133856,8 \text{ J} \quad (5.45)$$

Odvedena toplina se računa pomoću istog izraza, samo za različite karakteristične točke:

$$Q_{41} = G \cdot c_v \cdot (T_1 - T_4) = 1 \cdot 717,5 \cdot (313,15 - 388,31) = -53927,3 \text{ J} \quad (5.46)$$

5.1.3. Izvršeni rad

Izvršeni rad se računa kao razlika između dovedene i odvedene topline:

$$L = |Q_{23}| - |Q_{41}| = 133856,8 - 53927,3 = 79929,5 \text{ J} \quad (5.47)$$

Gdje je:

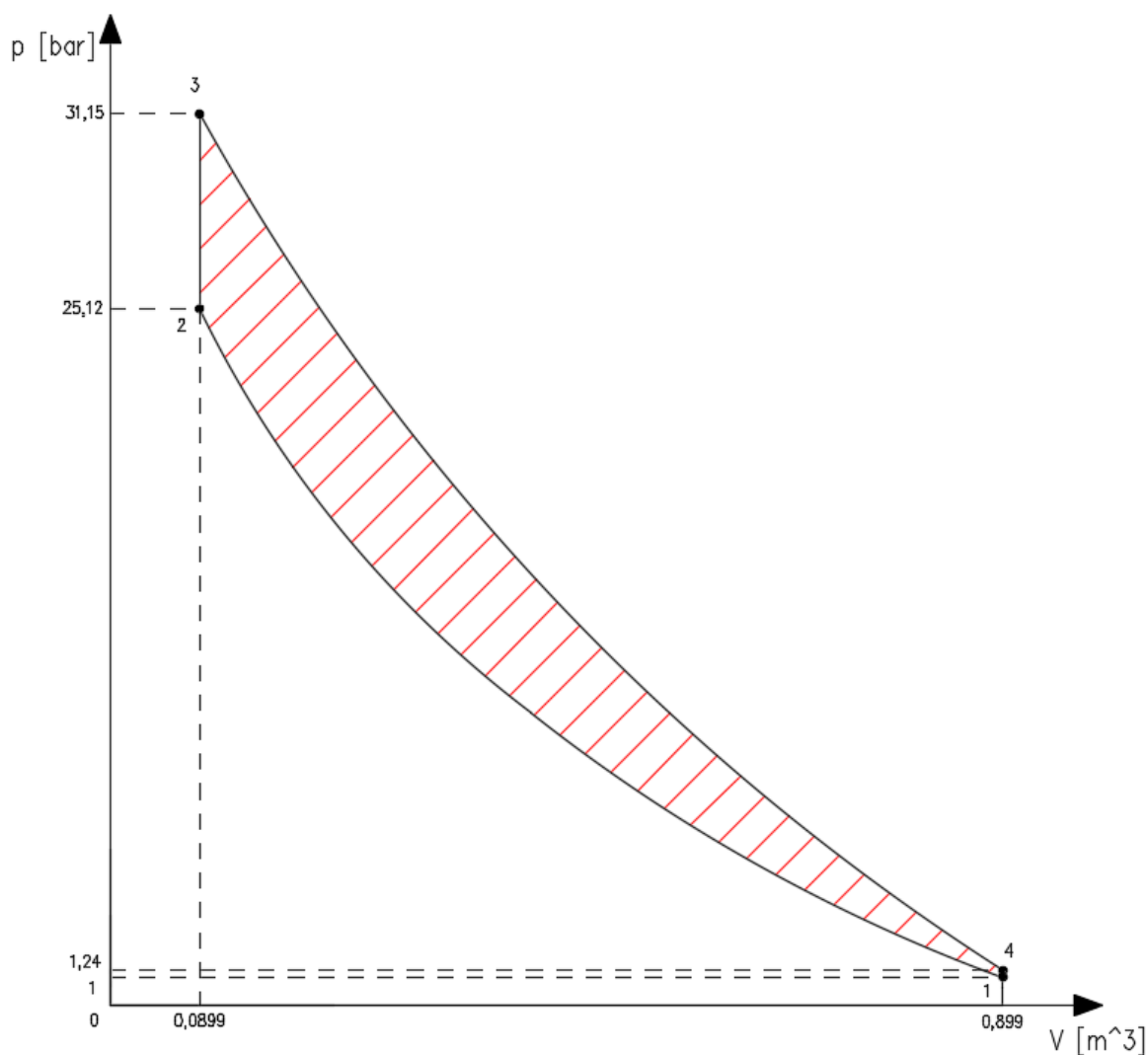
L – izvršeni rad [J]

5.1.4. Toplinski stupanj djelovanja

U potpoglavlju 3.2. već je objašnjeno što je i kako se dobiva formula za toplinski stupanj djelovanja Ottovog kružnog procesa. Općenito, toplinski stupanj djelovanja definiran je kao omjer rada L i dovedene topline Q_{23} .

Daljnijim objašnjenjem i raspisom dobili smo finalnu formulu:

$$\eta_0 = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\kappa-1}} = 1 - \frac{1}{10^{1,4-1}} = 0,602 \quad (5.48)$$



Slika 5.1. pV dijagram Ottovog procesa

5.2. Diesellov kružni proces

Na početku ovog poglavlja spomenuti su dodatni uvjeti pri proračunu Diesellovog procesa koji će se koristiti pri usporedbi Ottovog i Diesellovog procesa, a oni su:

- proračun uz isti kompresijski omjer za Ottov proces koji iznosi: $\varepsilon = 10$
- proračun uz isti dobiveni najveći tlak u Ottovom procesu

5.2.1. Proračun karakterističnih točki kružnog procesa za isti kompresijski omjer (p, V, T)

Jednaki početni podaci za Ottov proces vrijede i za Diesellov proces. Proračun prve dvije točke će biti identičan. Razlika se pojavljuje u točki 3 gdje se pojavljuje izobarna promjena stanja.

Zadani podaci:

$$p_1 = 1 \text{ bar}$$

$$t_1 = 40 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$t_3 = 700 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$G = 1 \text{ kg}$$

$$\varepsilon = 10$$

$$\kappa = 1,4$$

Točka 1:

U proračunu se koriste drukčije jedinice od zadanih pa se vrši pretvorba $^\circ\text{C}$ u K i bar u Pa:

$$T_1 = 40 \text{ }^\circ\text{C} = 313,15 \text{ K}$$

$$T_3 = 700 \text{ }^\circ\text{C} = 973,15 \text{ K}$$

$$p_1 = 1 \text{ bar} = 1 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

Isto kao i kod Ottovog procesa, volumen u točki 1 može se izračunati pomoću jednadžbe stanja idealnog plina:

$$p_1 \cdot V_1 = G \cdot R \cdot T_1 \quad (5.49)$$

Gdje je:

R – plinska konstanta za zrak koja iznosi: $R = 287 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$

Poznavajući sve podatke može se izračunati volumen u točki 1:

$$V_1 = \frac{G \cdot R \cdot T_1}{p_1} = \frac{1 \cdot 287 \cdot 313,15}{10^5} = 0,899 \text{ m}^3 \quad (5.50)$$

Točka 2:

Proračun točke 2 Dieselovog procesa s istim kompresijskim omjerom je identičan proračunu točke 2 Ottovog procesa.

Kako se između točke 1 i točke 2 odvija adijabatska kompresija, koriste se formule za izračun adijabatske promjene stanja koje koriste omjere temperatura, tlakova i volumena.

Temperatura u točki 2 se računa preko sljedeće formule:

$$T_2 = T_1 \cdot \varepsilon^{\kappa-1} = 313,15 \cdot 10^{1,4-1} = 786,59 \text{ K} \quad (5.51)$$

Tlak se računa preko sljedeće formule:

$$p_2 = p_1 \cdot \varepsilon^{\kappa} = 10^5 \cdot 10^{1,4} = 25,12 \cdot 10^5 \text{ Pa} \quad (5.52)$$

Volumen u točki 2 može se izračunati preko kompresijskog omjera:

$$V_2 = \frac{V_1}{\varepsilon} = \frac{0,899}{10} = 0,0899 \text{ m}^3 \quad (5.53)$$

Točka 3:

Kako je promjena stanja od točke 2 do točke 3 izobarna, tlak u točki 3 je jednak tlaku u točki 2:

$$p_3 = p_2 = 25,12 \cdot 10^5 \text{ Pa} \quad (5.54)$$

Poznavajući to i poznavajući jednadžbe stanja idealnog plina:

$$\begin{aligned} p_2 \cdot V_2 &= G \cdot R \cdot T_2 \\ p_3 \cdot V_3 &= G \cdot R \cdot T_3 \end{aligned} \quad (5.55)$$

Mogu se pokratiti jednake varijable i dobijemo:

$$\frac{V_2}{V_3} = \frac{T_2}{T_3} \quad (5.56)$$

Omjer volumena u trećoj i drugoj točki procesa naziva se stupanj ubrizgavanja goriva, φ :

$$\frac{V_3}{V_2} = \frac{T_3}{T_2} = \frac{V_3}{V_0} = \varphi \quad (5.57)$$

Zadana je maksimalna temperatura:

$$\begin{aligned} T_3 &= 700 \text{ °C} = 973,15 \text{ K} \\ \varphi &= \frac{T_3}{T_2} = \frac{973,15}{786,59} = 1,24 \end{aligned} \quad (5.58)$$

Poznavajući stupanj ubrizgavanja goriva i volumen u točki 2, može se izračunati volumen u točki 3:

$$V_3 = V_2 \cdot \varphi = 0,0899 \cdot 1,24 = 0,1115 \text{ m}^3 \quad (5.59)$$

Točka 4:

Od točke 3 do točke 4 se odvija adijabatska ekspanzija pa se opet koriste formule za izračun adijabatske promjene stanja:

$$\frac{T_4}{T_3} = \left(\frac{V_3}{V_4} \right)^{\kappa-1} \quad (5.60)$$

Daljnijim raspisivanjem gornje formule dobije se iznos temperature u točki 4:

$$\begin{aligned} T_4 &= T_3 \cdot \left(\frac{V_3}{V_4} \right)^{\kappa-1} = T_3 \cdot \left(\frac{V_3}{V_4} \cdot \frac{V_2}{V_1} \right)^{\kappa-1} = T_3 \cdot \left(\frac{\varphi}{\varepsilon} \right)^{\kappa-1} \\ T_4 &= T_1 \cdot \varphi \cdot \varepsilon^{\kappa-1} \cdot \frac{\varphi^{\kappa-1}}{\varepsilon^{\kappa-1}} \\ T_4 &= T_1 \cdot \varphi^\kappa = 313,15 \cdot 1,24^{1,4} = 423,2 \text{ K} \end{aligned} \quad (5.61)$$

Kako je promjena stanja od točke 4 do točke 1 izohorna, volumen u točki 4 jednak je volumenu u točki 1:

$$V_4 = V_1 = 0,899 \text{ m}^3 \quad (5.62)$$

Tlak na kraju ekspanzije iznosi:

$$p_4 = \frac{G \cdot R \cdot T_4}{V_4} = \frac{1 \cdot 287 \cdot 423,2}{0,899} = 1,35 \cdot 10^5 \text{ Pa} \quad (5.63)$$

5.2.2. Dovedena i odvedena toplina

Dovedena toplina računa se kao umnožak mase radnog medija, specifične topline kod konstantnog tlaka i razlike temperatura:

$$Q_{23} = G \cdot c_p \cdot (T_3 - T_2) \quad (5.64)$$

Gdje je:

Q_{23} - dovedena toplina [J]

G - masa radnog medija [kg]

c_p - specifična toplina kod konstantnog tlaka [J/kg · K]

Specifična toplina pri konstantnom tlaku računa se pomoću sljedeće jednadžbe:

$$c_p = \frac{\kappa \cdot R}{\kappa - 1} = \frac{1,4 \cdot 287}{1,4 - 1} = 1004,5 \text{ J/kg} \cdot \text{K} \quad (5.65)$$

Može se izračunati dovedena toplina:

$$Q_{23} = G \cdot c_p \cdot (T_3 - T_2) = 1 \cdot 1004,5 \cdot (973,15 - 786,59) = 187399,52 \text{ J} \quad (5.66)$$

Specifična toplina pri konstantnom volumenu iznosi:

$$c_v = \frac{c_p}{\kappa} = \frac{1004,5}{1,4} = 717,5 \text{ J/kg} \cdot \text{K} \quad (5.67)$$

Odvedena toplina računa se kao umnožak mase radnog medija, specifične topline kod konstantnog volumena i razlike temperatura:

$$Q_{41} = G \cdot c_v \cdot (T_1 - T_4) = 1 \cdot 717,5 \cdot (313,15 - 423,2) = -78960,88 \text{ J} \quad (5.68)$$

Gdje je:

Q_{41} - odvedena toplina [J]

c_v - specifična toplina kod konstantnog volumena [J/kg · K]

5.2.3. Izvršeni rad

Izvršeni rad se računa kao razlika između dovedene i odvedene topline:

$$L = |Q_{23}| - |Q_{41}| = 187399,52 - 78960,88 = 108438,64 \text{ J} \quad (5.69)$$

Gdje je:

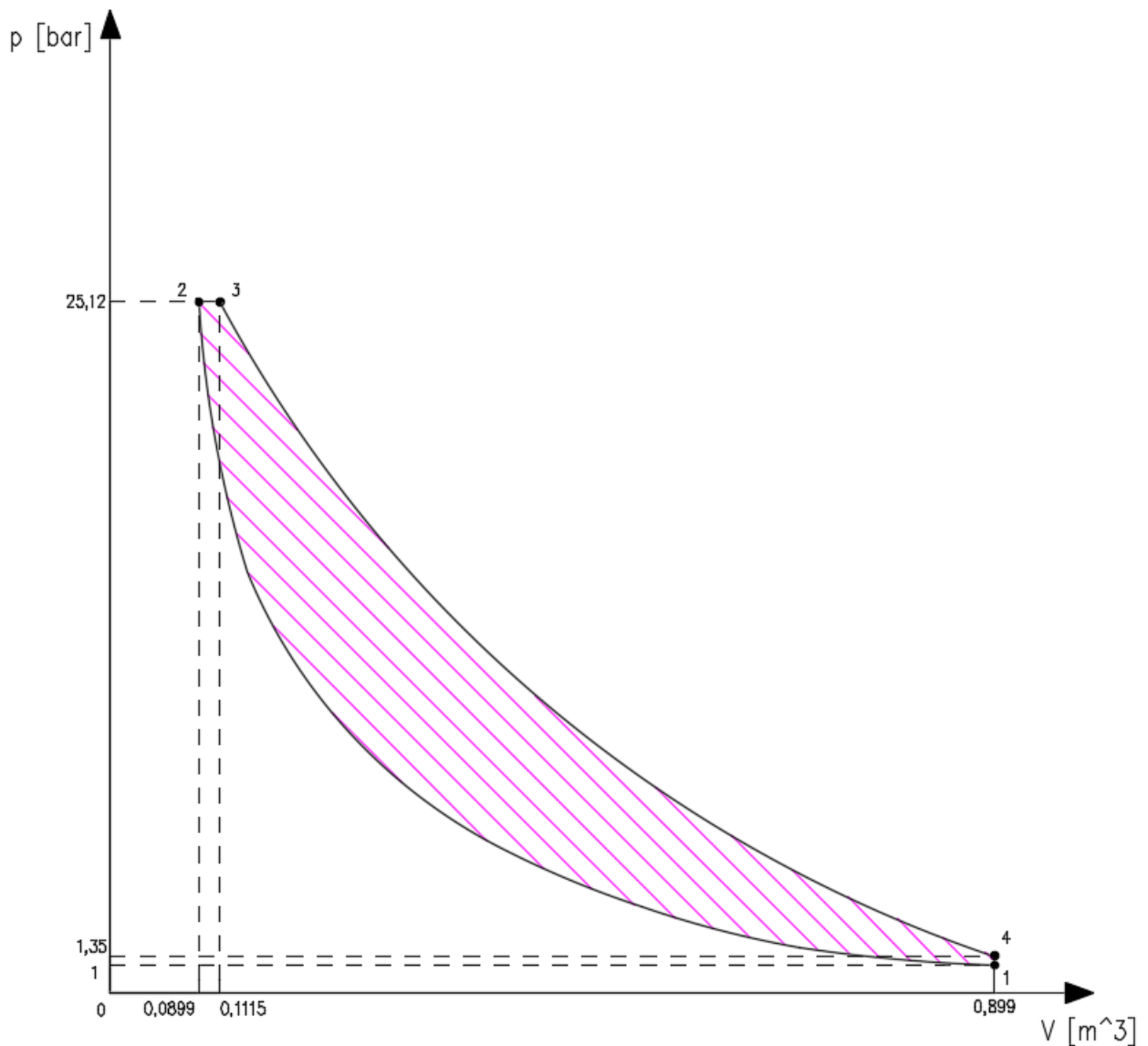
L – izvršeni rad [J]

5.2.4. Toplinski stupanj djelovanja

U potpoglavlju 4.2. već je objašnjeno što je i kako se dobiva formula za toplinski stupanj djelovanja Diesellovog kružnog procesa. Općenito, toplinski stupanj djelovanja definiran je kao omjer rada L i dovedene topline Q_{23} .

Daljnjim objašnjenjem i raspisom dobije se finalna formula:

$$\eta_D = 1 - \frac{1}{\kappa} \cdot \frac{1}{\varepsilon^{\kappa-1}} \cdot \frac{\varphi^{\kappa-1}}{\varphi-1} = 1 - \frac{1}{1,4} \cdot \frac{1}{10^{1,4-1}} \cdot \frac{1,24^{1,4}-1}{1,24-1} = 0,584 \quad (5.70)$$



Slika 5.2. pV dijagram Diesellovog procesa s ϵ jednakim Ottovom procesu

5.2.5. Proračun karakterističnih točki kružnog procesa za isti maksimalni tlak (p , V , T)

Opet vrijede jednaki početni podaci kao i za Ottov proces. Proračun prve točke će biti identičan. Razlika se pojavljuje u točki 2 gdje se pojavljuje izobarna promjena stanja uz uvjet da maksimalni tlak za Diesellov proces je jednak dobivenom maksimalnom tlaku za Ottov proces.

U ovom proračunu nije zadani kompresijski omjer, već ga se mora izračunati ovisno o iznosima volumena karakterističnih točki 1 i 2.

Zadani podaci:

$$p_1 = 1 \text{ bar}$$

$$p_2 = p_3 = p_{\max \text{ Otto}} = 31,15 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

$$t_1 = 40 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$t_3 = 700 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$G = 1 \text{ kg}$$

$$\kappa = 1,4$$

Točka 1:

U proračunu se koriste drukčije jedinice od zadanih pa se vrši pretvorba $^\circ\text{C}$ u K i bar u Pa:

$$T_1 = 40 \text{ }^\circ\text{C} = 313,15 \text{ K}$$

$$T_3 = 700 \text{ }^\circ\text{C} = 973,15 \text{ K}$$

$$p_1 = 1 \text{ bar} = 1 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

Isto kao i kod prethodnog proračuna, volumen u točki 1 može se izračunati pomoću jednadžbe stanja idealnog plina:

$$p_1 \cdot V_1 = G \cdot R \cdot T_1 \quad (5.71)$$

Gdje je:

R – plinska konstanta za zrak koja iznosi: $R = 287 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$

Poznavajući sve podatke može se izračunati volumen u točki 1:

$$V_1 = \frac{G \cdot R \cdot T_1}{p_1} = \frac{1 \cdot 287 \cdot 313,15}{10^5} = 0,899 \text{ m}^3 \quad (5.72)$$

Točka 2:

Zadano uvjetom za proračun, tlak točke 2 je jednak maksimalnom tlaku Ottovog procesa koji se dobije kod točke 3 te on iznosi:

$$p_2 = p_{\max \text{ Otto}} = 31,15 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

Poznavajući tlak u točki 1 te u točki 2, i temperaturu u točki 1, može se izračunati temperatura u točki 2 uz pomoć formule:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}$$

$$T_2 = T_1 \cdot \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = 313,15 \cdot \left(\frac{31,15 \cdot 10^5}{10^5}\right)^{\frac{1,4-1}{1,4}} = 836,48 \text{ K} \quad (5.73)$$

Poznavajući temperaturu u točki 1 te u točki 2, i volumen u točki 1, može se izračunati volumen u točki 2 uz pomoć formule:

$$\frac{V_2}{V_1} = \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^{\frac{1}{\kappa-1}}$$

$$V_2 = V_1 \cdot \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^{\frac{1}{\kappa-1}} = 0,899 \cdot \left(\frac{313,15}{836,48}\right)^{\frac{1}{1,4-1}} = 0,0771 \text{ m}^3 \quad (5.74)$$

Može se izračunati kompresijski omjer koji iznosi:

$$\varepsilon = \frac{V_1}{V_2} = \frac{0,899}{0,0771} = 11,66 \approx 12 \quad (5.75)$$

Točka 3:

Kako je promjena stanja od točke 2 do točke 3 izobarna, tlak u točki 3 je jednak tlaku u točki 2:

$$p_3 = p_2 = 31,15 \cdot 10^5 \text{ Pa} \quad (5.76)$$

Zadana je maksimalna temperatura:

$$T_3 = 700 \text{ °C} = 973,15 \text{ K}$$

$$\varphi = \frac{T_3}{T_2} = \frac{973,15}{836,48} = 1,16 \quad (5.77)$$

Poznavajući stupanj ubrizgavanja goriva i volumen u točki 2, može se izračunati volumen u točki 3:

$$V_3 = V_2 \cdot \varphi = 0,0771 \cdot 1,16 = 0,0894 \text{ m}^3 \quad (5.78)$$

Točka 4:

Temperatura iznosi:

$$T_4 = T_1 \cdot \varphi^\kappa = 313,15 \cdot 1,16^{1,4} = 385,47 \text{ K} \quad (5.79)$$

Kako je promjena stanja od točke 4 do točke 1 izohorna, volumen u točki 4 je jednak volumenu u točki 1:

$$V_4 = V_1 = 0,899 \text{ m}^3 \quad (5.80)$$

Tlak na kraju ekspanzije iznosi:

$$p_4 = \frac{G \cdot R \cdot T_4}{V_4} = \frac{1 \cdot 287 \cdot 385,47}{0,899} = 1,23 \cdot 10^5 \text{ Pa} \quad (5.81)$$

5.2.6. Dovedena i odvedena toplina

Dovedena toplina:

$$Q_{23} = G \cdot c_p \cdot (T_3 - T_2) \quad (5.82)$$

Specifična toplina pri konstantnom tlaku računa se pomoću sljedeće jednadžbe:

$$c_p = \frac{\kappa \cdot R}{\kappa - 1} = \frac{1,4 \cdot 287}{1,4 - 1} = 1004,5 \text{ J/kg} \cdot \text{K} \quad (5.83)$$

Može se izračunati dovedena toplina:

$$Q_{23} = G \cdot c_p \cdot (T_3 - T_2) = 1 \cdot 1004,5 \cdot (973,15 - 836,48) = 137285,015 \text{ J} \quad (5.84)$$

Specifična toplina pri konstantnom volumenu iznosi:

$$c_v = \frac{c_p}{\kappa} = \frac{1004,5}{1,4} = 717,5 \text{ J/kg} \cdot \text{K} \quad (5.85)$$

Odvedena toplina iznosi:

$$Q_{41} = G \cdot c_v \cdot (T_1 - T_4) = 1 \cdot 717,5 \cdot (313,15 - 385,47) = -51889,6 \text{ J} \quad (5.86)$$

5.2.7. Izvršeni rad

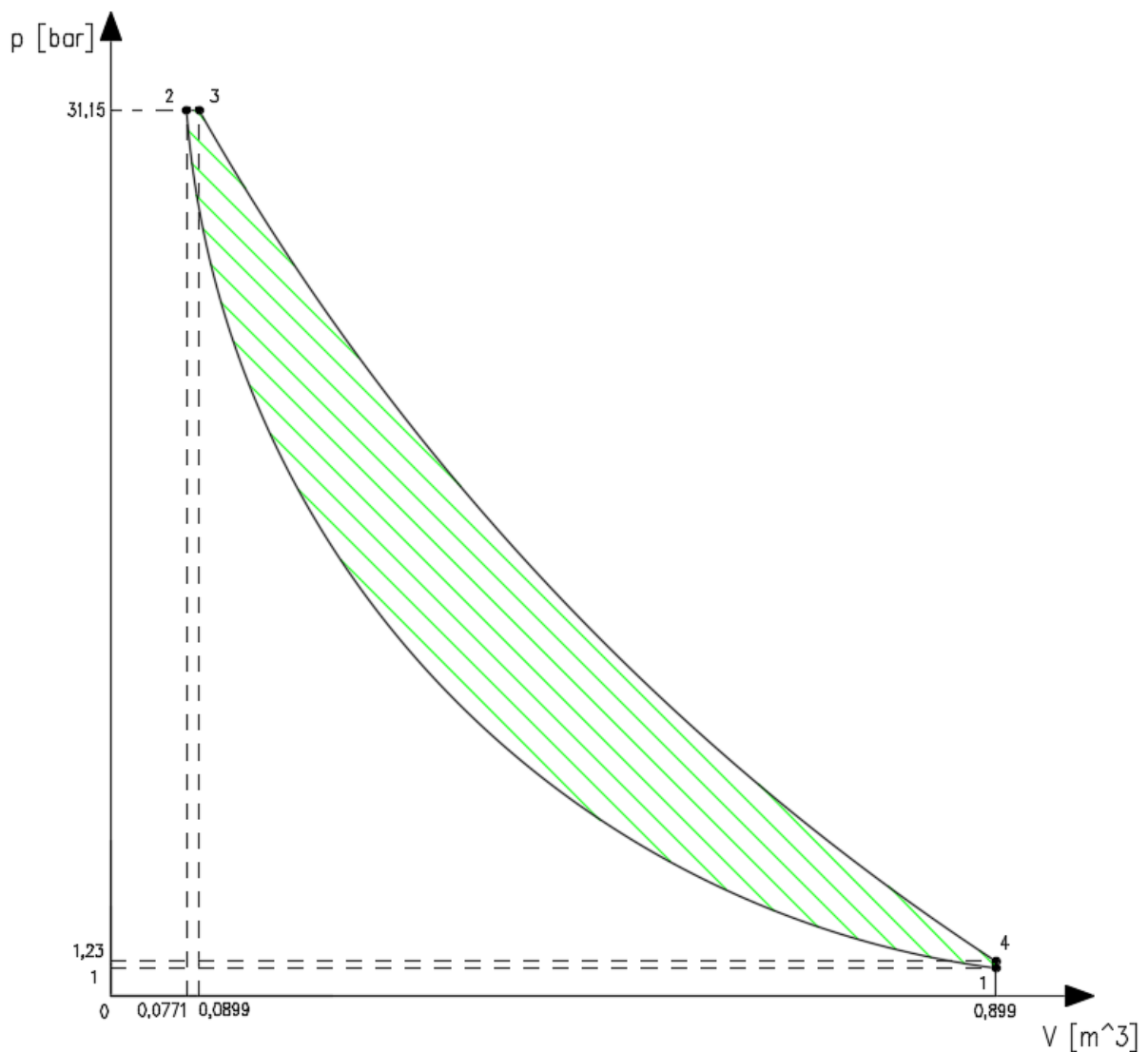
Izvršeni rad iznosi:

$$L = |Q_{23}| - |Q_{41}| = 137285,015 - 51889,6 = 85395,9 \text{ J} \quad (5.87)$$

5.2.4. Toplinski stupanj djelovanja

Toplinski stupanj djelovanja iznosi:

$$\eta_D = 1 - \frac{1}{\kappa} \cdot \frac{1}{\varepsilon^{\kappa-1}} \cdot \frac{\varphi^{\kappa}-1}{\varphi-1} = 1 - \frac{1}{1,4} \cdot \frac{1}{12^{1,4-1}} \cdot \frac{1,16^{1,4}-1}{1,16-1} = 0,6184 \quad (5.88)$$

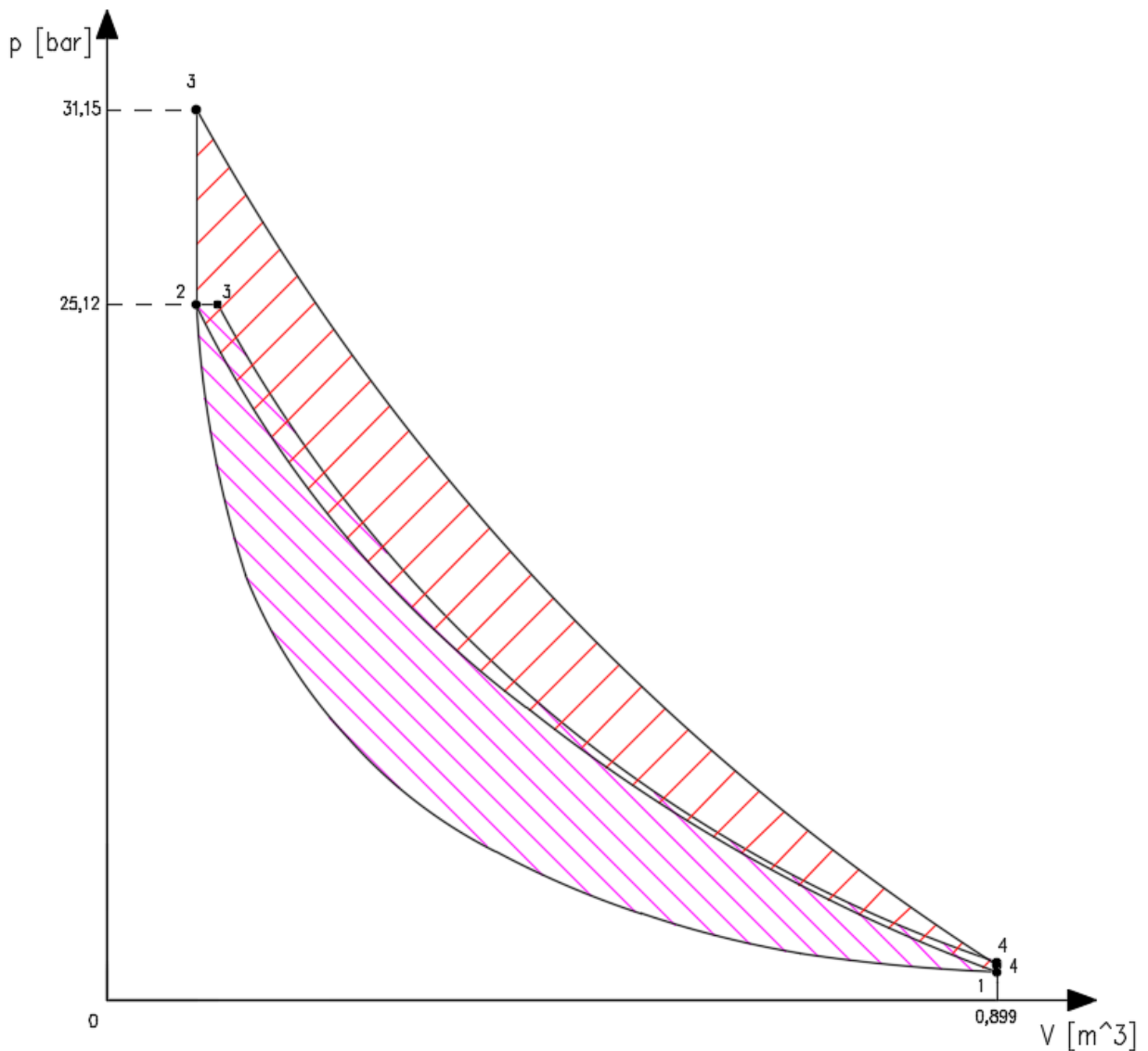


Slika 5.3. pV dijagram Diesellovog procesa s maksimalnim tlakom jednakim Ottovom procesu

5.3. Analiza dobivenih rezultata

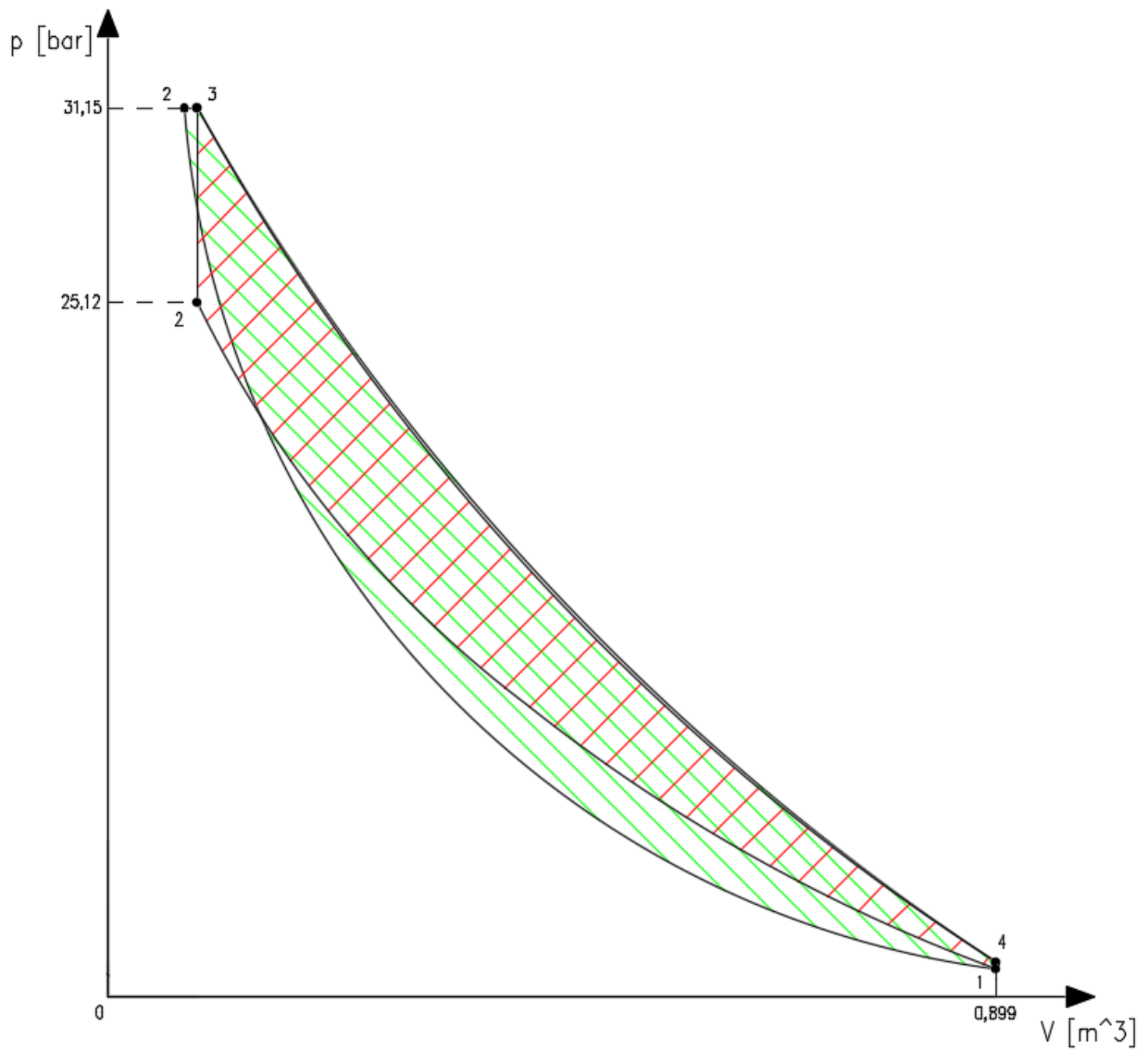
Obavljena je analiza utjecaja zadržavanja jednakog kompresijskog omjera, te u drugom slučaju zadržavanja jednakog najvećeg ostvarenog tlaka pri Ottovom procesu, pri proračunu Diesellovog procesa. U sva tri slučaja koristimo jednake početne podatke.

U proračunu u kojem je korišten jednaki kompresijski omjer, ostvareni rad Diesellovog procesa je veći za 26.3% od ostvarenog rada Ottovog procesa. Na slici 5.4. je prikaz Ottovog i Diesellovog procesa na jednom dijagramu te je vidljiva razlika u površinama koje zatvaraju pojedini procesi. Crvenom bojom je označen Ottov proces, s ljubičastom Diesellov.



Slika 5.4. pV dijagram Ottovog i Diesellovog procesa s jednakim ϵ

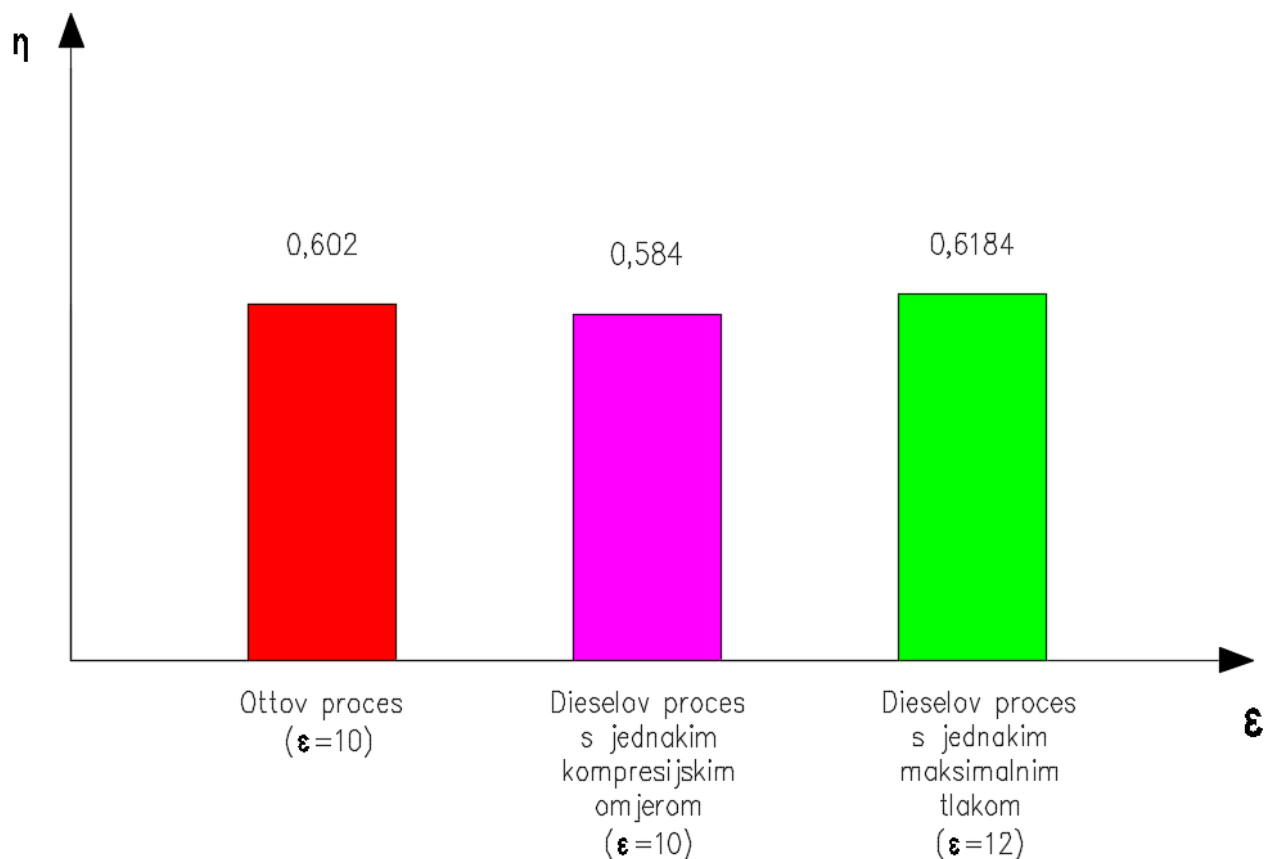
U drugom slučaju gdje je zadržan najveći ostvareni tlak pri Ottovom procesu, ostvareni rad Diesellovog procesa je veći za samo 6,4% od ostvarenog rada Ottovog procesa. Na slici 5.5. je opet prikaz Ottovog i Diesellovog procesa, ali u ovom slučaju Diesellovog procesa je označen zelenom bojom.



Slika 5.5. pV dijagram Ottovog i Dieselovog procesa pri jednakom maksimalnom tlaku

Može se zaključiti da u slučaju jednakih ulazih podataka, veći se rad ostvari u Dieselovom procesu ako se zadrži jednaki kompresijski omjer za razliku od ostvarivanja jednakog maksimalnog tlaka u Dieselovom i Ottovom procesu.

Na slici 5.6. je prikaz toplinskog stupnja djelovanja u ovisnosti o kompresijskom omjeru.



Slika 5.6. Ovisnost toplinskog stupnja djelovanja o kompresijskom omjeru

Najveći toplinski stupanj djelovanja se ostvari u zadnjem slučaju u Dieselovom procesu gdje kompresijski omjer iznosi približno 12. Naravno to je bilo i za očekivati jer kao što je već navedeno, kompresijski omjer je jedna od najznačajnijih varijabli koje utječu na toplinski stupanj djelovanja Dieselovog motora. Razlike u odnosu na Ottov proces nisu značajne zbog toga što kompresijski omjer ostvaren u Dieselovom procesu nije onoliko velik koliko je uobičajeno (uglavnom je u rasponu od 18 do 25).

6. ZAKLJUČAK

U okviru ovog rada upoznaje se s kružnim procesima i njihovoj važnosti u svakodnevnom životu. Počevši od Carnotovog, najučinkovitijeg ali u stvarnosti neprimjenjivog, do Ottovog i Dieselovog koji se najvjerojatnije koriste svaki dan, spoznaje se kako se toplinska energija pretvara u mehaničku.

Zadatak ovog završnog rada je bio izraditi proračun karakterističnih termodinamičkih veličina za Ottov i Dieselove procese, s različitim ulaznim parametrima. Bilo je potrebno usporediti Ottov proces naspram dva Dieselova. Za sve procese izračunate su temperatura, tlak i volumen u karakterističnim točama procesa, dovedena i odvedena toplina, izvršeni rad i toplinski stupanj djelovanja. Ovisno o ulaznim i dobivenim podacima Ottovog procesa, izračunat je Dieselov proces s jednakim kompresijskim omjerom kao i Ottov proces, te Dieselov proces gdje je najveći dobiveni tlak jednak najvećem dobivenom tlaku Ottovog procesa. Rezultati dovode do zaključka da, uspoređujući dobiveni rad, Dieselovi procesi postižu veći rad. Toplinski stupanj djelovanja u sva tri slučaja je vrlo sličan, razlikujući se 2% među procesima. Ottov proces pri kompresijskom omjeru u iznosu 10 postiže toplinski stupanj djelovanja od oko 60%, Dieselov pri jednakom kompresijskom omjeru postiže oko 58% te Dieselov pri kompresijskom omjeru u iznosu 12 postiže najveći toplinski stupanj djelovanja od oko 62%. Poznavajući činjenicu da Dieselovi motori mogu podnijeti kompresijske omjere u rasponu od 18 do 25, može se zaključiti da ova dva slučaja ne iskorištavaju maksimalno mogući ostvarivi toplinski stupanj djelovanja.

7. LITERATURA

- [1] Galović, A.: „Termodinamika I“, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2002
- [2] Trp, A.; Lenić, K.: „Predavanja iz Termodinamike I“, Tehnički fakultet Rijeka, Rijeka, 2018.
- [3] Senčić, T.: „Predavanja iz Toplinskih strojeva i uređaja“ Tehnički fakultet Rijeka, Rijeka, 2019.
- [4] S interneta: <https://www.nuclear-power.com/nuclear-engineering/thermodynamics/thermodynamic-cycles/>, 23. kolovoza 2022.
- [5] S interneta: <https://www.nuclear-power.com/nuclear-engineering/thermodynamics/thermodynamic-cycles/carnot-cycle-carnot-heat-engine/>, 23. kolovoza 2022.
- [6] S interneta: <https://www.nuclear-power.com/nuclear-engineering/thermodynamics/thermodynamic-cycles/otto-cycle-otto-engine/>, 23. kolovoza 2022.
- [7] S interneta: <https://www.nuclear-power.com/nuclear-engineering/thermodynamics/thermodynamic-cycles/diesel-cycle-diesel-engine/>, 23. kolovoza 2022.
- [8] S interneta: https://www.generatorsource.com/why_use_diesel.aspx, 23. kolovoza 2022.
- [9] S interneta: https://energyeducation.ca/encyclopedia/Otto_cycle, 23. kolovoza 2022.

8. POPIS SLIKA

<i>Slika 2.1. Realni kružni proces</i>	2
<i>Slika 2.2. Dovođenje i odvođenje topline u procesu</i>	3
<i>Slika 2.3. Desnokretni i lijevokretni kružni procesi</i>	5
<i>Slika 2.4. Promjene stanja idealnih plinova</i>	5
<i>Slika 2.5. Carnotov kružni proces u pV dijagramu</i>	7
<i>Slika 3.1. Idealni Ottov kružni proces u pV dijagramu</i>	9
<i>Slika 3.2. Toplinski stupanj djelovanja Ottovog procesa ovisan o omjeru kompresije</i>	12
<i>Slika 3.3. Način rada četverotaktnog Ottovog motora</i>	13
<i>Slika 3.4. Idealni i stvarni Otto procesi</i>	14
<i>Slika 4.1. Dieselov kružni proces u pV dijagramu</i>	17
<i>Slika 4.2. Primjer rada četverotaktnog Dieselovog motora</i>	20
<i>Slika 4.3. Idealni i stvarni Diesel procesi</i>	20
<i>Slika 5.1. pV dijagram Ottovog procesa</i>	26
<i>Slika 5.2. pV dijagram Dieselovog procesa s ϵ jednakim Ottovom procesu</i>	32
<i>Slika 5.3. pV dijagram Dieselovog procesa s maksimalnim tlakom jednakim Ottovom procesu</i> .	37
<i>Slika 5.4. pV dijagram Ottovog i Dieselovog procesa s jednakim ϵ</i>	38
<i>Slika 5.5. pV dijagram Ottovog i Dieselovog procesa pri jednakom maksimalnom tlaku</i>	39
<i>Slika 5.6. Ovisnost toplinskog stupnja djelovanja o kompresijskom omjeru</i>	40

9. POPIS OZNAKA

ΔU - unutarnja energija zatvorenog sustava [J]

Q - dovedena toplina u sustav [J]

L - izvršeni rad sustava [J]

Q_0 - odvedena toplina iz sustava [J]

η - toplinski stupanj djelovanja

p - tlak [bar, Pa]

V - volumen [m^3]

T - temperatura [$^{\circ}\text{C}$, K]

κ - eksponent adijabatske promjene stanja idealnog plina

G - masa radnog medija [kg]

c_v - specifična toplina kod konstantnog volumena [J/kg · K]

c_p - specifična toplina kod konstantnog tlaka [J/kg · K]

ε - kompresijski omjer

R - plinska konstanta za zrak [J/kg · K]

ζ - stupanj povišenja tlaka

φ - stupanj ubrizgavanja goriva

10. SAŽETAK I KLJUČNE RIJEČI

10.1. Sažetak

Ključne riječi: kružni procesi, Ottov kružni proces, Diesellov kružni proces, motor s unutarnjim izgaranjem

U završnom radu opisan je termodinamički kružni proces i način dobivanja rada pretvorbom toplinske energije u mehaničku. Objasnjeni su elementarni kružni procesi i od njih najvažniji, Carnotov kružni proces. Objasnjene su faze Ottovog i Diesellovog kružnog procesa i njihova primjena u motorima s unutarnjim izgaranjem, te njihove razlike između idealnog i realnog procesa. Izrađeni su proračuni karakterističnih termodinamičkih veličina za Ottov i Diesellov proces. Zaključno, analizirani su utjecaji kompresijskog omjera i najvećeg postignutog tlaka na postignuti rad i toplinski stupanj djelovanja.

10.2. Summary

Key words: thermodynamic cycle, Otto cycle, Diesel cycle, internal combustion engine

This undergraduate paper describes the thermodynamic circular process and the method of obtaining work by converting thermal energy into mechanical energy. Elementary processes and the most important of them, the Carnot process, have been explained. The phases of Otto's and Diesel's cycles and their application in internal combustion engines have been explained, as well as their differences between ideal and real processes. Calculations of characteristic thermodynamic variables for the Otto and Diesel processes have been carried out. In conclusion, the effects of the compression ratio and the highest achieved pressure on the achieved work and the thermal efficiency have been analyzed.