

## 5.1 Desnokretni kružni porocesi sa idealnim gasovima

- Motori sa unutrašnjim sagorevanjem
- Gasne turbine
- Osnovne osobenosti
  - Radni fluid
    - u prvom delu kružnog procesa radni fluid je ili smeša vazduha i gasovitog goriva (ili para tečnog goriva ) ili čist vazduh
    - u drugom delu procesa ( tokom i nakon sagorevanja goriva) radni fluid predstavljaju nastali produkti sagorevanja
    - termo-fizičke osobenosti (karakteristika) bilo vazduha, bilo smeše vazduha i goriva i produkata sagorevanja su približno iste
    - pritisci pri kojima se odvijaju procesi su relativno niski pa se radni fluidi mogu smatrati idealnim gasovima
  - Izvor toplote
    - hemijske reakcije sagorevanja goriva
    - ne postoji izolovan „uređaj”, nego se proces „oslobađanja ” toplote dešava u samom radnom fluidu

### 11.2.3 Motori sa unutrašnjim sagorevanjem (motori SUS) – *Internal Combustion Engine (ICE)*

- Otto
- Diesel
- Brayton-Joule
- (Stirling)
- (Sabathe)
- (Ericson)
- (Wankel)

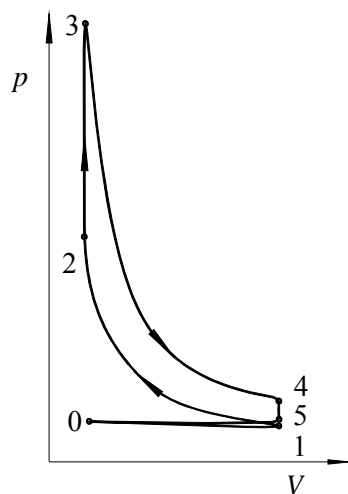
## 11.2.4 Otov (Otto) kružni proces

1854 – Eugenio Barsanti and Felice Matteucci – patentirali

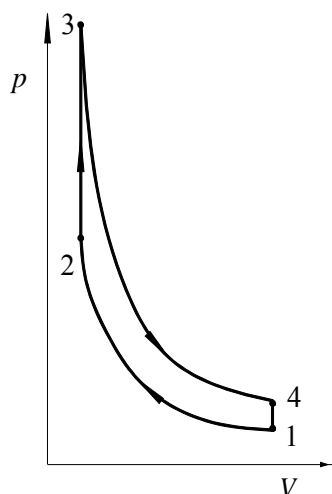
1862 – Aphonse Beau de Rochas – prvi konstruisao

1876 – Nicolaus August Otto – ponovo “prvi” konstruisao

Indikatorski dijagram



Teorijski (hipotetički) dijagram



0-1 – usis smeše vazduha i goriva iz karburatora u cilindar ( $v \approx \text{idem}$ )

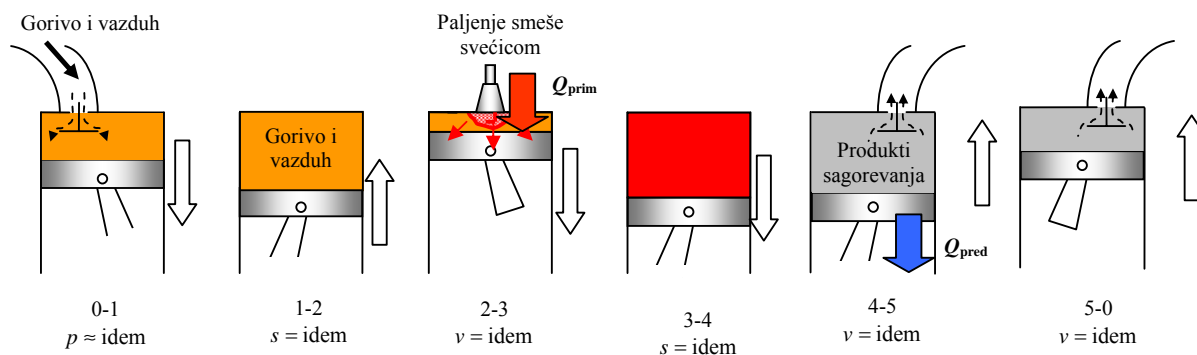
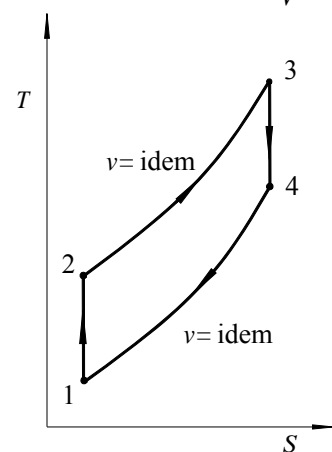
1-2 – adijabatsko sabijanje smeše vazduha i goriva

2-3 – paljenje svećicom smeše i njeno izohorsko sagorevanje

3-4 – radni takt – adijabatsko širenje produkata sagorevanja

4-5 – otvaranje izduvnog ventila i izohorsko isticanje produktat sagorevanja iz cilindra

5-0 – istiskivanje preostalih produkata sagorevanja iz cilindra ( $v \approx \text{idem}$ )



- Videti:  
<http://www.shermanlab.com/science/physics/thermo/engines/OttoG.php>  
<http://members.fortunecity.com/rickteuscher/thermodynamics/OttoCycle.html>

- Termodinamički stepen korisnosti  $\eta_{t,Otto}$

$$\eta_{t,Otto} = 1 - \frac{|Q_{pred}|}{Q_{prim}} = 1 - \frac{mc_V(T_4 - T_1)}{mc_V(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_1 \left( \frac{T_4}{T_1} - 1 \right)}{T_2 \left( \frac{T_3}{T_2} - 1 \right)} = \dots^1$$

$$\boxed{\eta_{t,Otto} = 1 - \frac{T_1}{T_2}}$$

a uvođenjem stepena kompresije  $\varepsilon$

$$\varepsilon = \frac{V_{max}}{V_{min}}$$

termodinamički stepen korisnosti  $\eta_{t,Otto}$  može da se izrazi kao<sup>2</sup>

$$\boxed{\eta_{t,Otto} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\kappa-1}}}$$

<sup>1</sup> Kako zapremine gasa u stanjima 1 i 4, odnosno 2 i 3 iste

$$V_1 = V_4 \text{ i } V_2 = V_3$$

a procesi 1-2 i 3-4 su izentropski ( $s = \text{idem}$ )

$$T_1 V_1^{\kappa-1} = T_2 V_2^{\kappa-1} \text{ i } T_4 V_4^{\kappa-1} = T_3 V_3^{\kappa-1}$$

sledi da je

$$\frac{T_4}{T_1} = \frac{T_3}{T_2}$$

pa je

$$\eta_{t,Otto} = 1 - \frac{T_1 \left( \frac{T_4}{T_1} - 1 \right)}{T_2 \left( \frac{T_3}{T_2} - 1 \right)} = 1 - \frac{T_1}{T_2}$$

<sup>2</sup> Uvođenjem stepena kompresije  $\varepsilon$  - tj. odnosa maksimalne i minimalne zapremine cilindra

$$\varepsilon = \frac{V_{max}}{V_{min}}$$

odnosno, odnosa zapremina gasa satnja 1 i 2:

$$\varepsilon = \frac{V_{max}}{V_{min}} = \frac{V_1}{V_2},$$

te kako je promena stanja 1-2 izentropska

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

sledi da je

$$\varepsilon^{\kappa-1} = \frac{T_2}{T_1} \text{ ili } \frac{T_1}{T_2} = \frac{1}{\varepsilon^{\kappa-1}}$$

pa je

$$\eta_{t,Otto} = 1 - \frac{T_1}{T_2}$$

- Kratka analiza  $\eta_{t,Otto}$ 
  - $\eta_{t,Otto} = f(\varepsilon, \kappa)$

Ako  $\varepsilon \nearrow \Rightarrow \eta_{t,Otto} \nearrow$ , ali i  $T_2 \nearrow !! \Rightarrow$

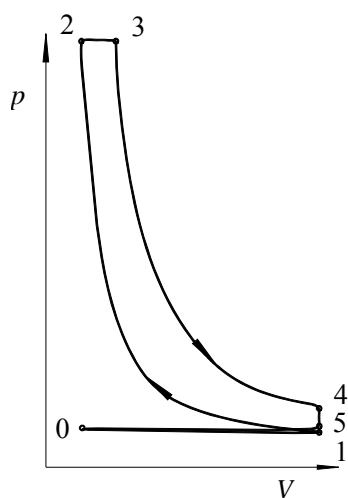
  - problem samopaljenja smeše - detonacioni udar
  - dodavanjem aditiva u benzin – tetra-etil-olova ili tetra-metil-olova, povećava se oktanski broj goriva
  - oktanski broj predstavlja meru otpornosti goriva na samopaljenje
    - Oktanski broj 100 (ili 100 oktana) ima izooktan – gorivo vrlo otporno na samopaljenje
    - Oktanski broj 0 (ili 0 oktana) ima normalni heptan – gorivo izuzetno male otpornost na samopaljenje
    - Oktanski broj nekog goriva određuje se upoređivanjem njegove otpornosti na samopaljenje sa otpornosti na samopaljenje smeše izooktana i normalnog heptana. Procenat izooktana u smeši iste otpornosti na samopaljenje, određuje oktanski broj goriva
  - Do 1920, koristili su se benzini bez olova, pa im je oktanski broj bio veoma mali 40-50 oktana
  - Bezolovni benzin – hemijski inženjering – novi aditivi –(aromatični ugljovodonici) – ista svrha – povećanje “oktanskog” broja
- Ograničenja  $\varepsilon$  - (danas)

$\varepsilon = 9 \div 10,5$  (12- sa direktnim ubrizgavanjem – promenljiv pritisak ubrizgavanja)

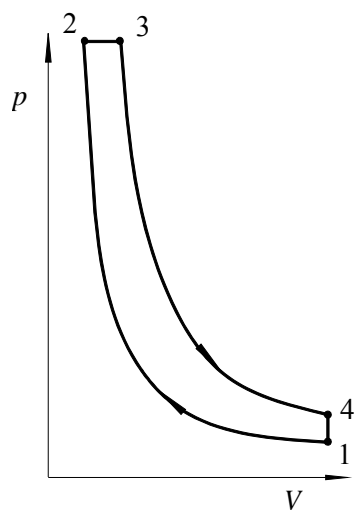
### 11.2.3 Dizelov (Diesel) kružni proces

1892 – Rudolf Christian Karl Diesel – patentirao i 1893 konstruisao

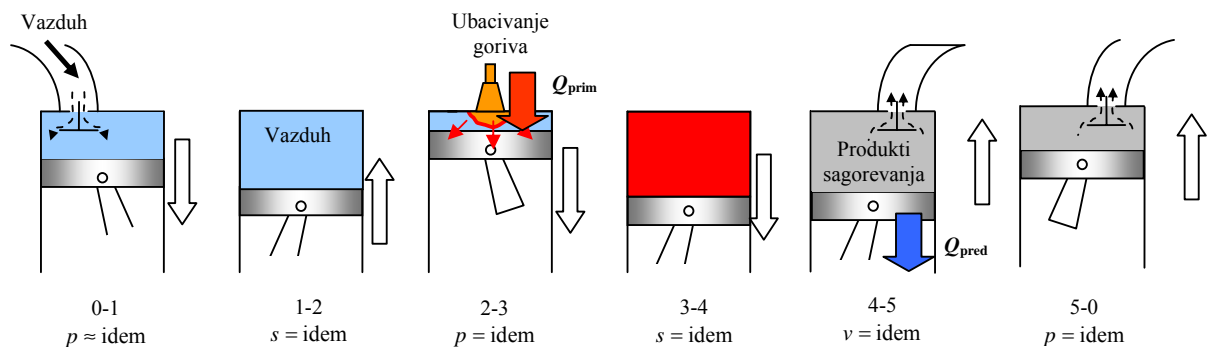
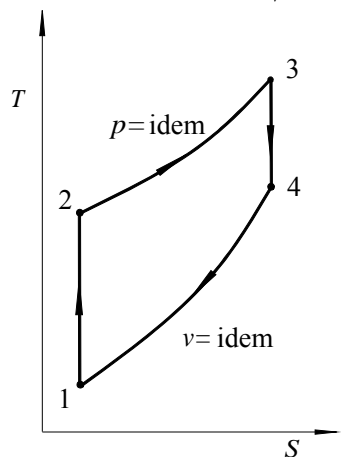
Indikatorski dijagram



Teorijski (hipotetički) dijagram



- 0-1 – usisavanje čistog vazduha u cilindar
- 1-2 – adijabatsko sabijanje vazduha
- 2-3 – postepeno ubacivanje goriva i njegovo sagorevanje pri  $p = \text{idem}$
- 3-4 – radni hod – širenje produkata sagorevanja (adijabatsko širenje)
- 4-5 – izbacivanje produkata sagorevanja otvaranjem ventila ( $v = \text{idem}$ )
- 5-0 – izbacivanje preostalih produkata sagorevanja



- Videti:  
<http://www.shermanlab.com/science/physics/thermo/engines/DieselG.php>  
<http://members.fortunecity.com/rickteuscher/thermodynamics/DieselCycle.html>

- Stepen kompresije

$$\varepsilon = \frac{V_{\max}}{V_{\min}} = \frac{V_1}{V_2}$$

- Stepen predekspanzije ili stepen punjenja

$$\varphi = \frac{V_3}{V_2}$$

- Termodinamički stepen korisnosti

$$\eta_{t, \text{Diesel}} = 1 - \frac{c_v(T_4 - T_1)}{c_p(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{1}{\kappa} \frac{T_1}{T_2} \frac{\left(\frac{T_4}{T_1} - 1\right)}{\left(\frac{T_3}{T_2} - 1\right)} = \dots^3$$

$$\boxed{\eta_{t, \text{Diesel}} = 1 - \frac{1}{\kappa} \frac{1}{\varepsilon^{\kappa-1}} \frac{\varphi^{\kappa} - 1}{\varphi - 1}}$$

- Kratka analiza  $\eta_{t, \text{Diesel}}$

- $\eta_{t, \text{Diesel}} = f(\varepsilon, \varphi, \kappa)$
- $\eta_{t, \text{Diesel}} \nearrow$ , ako  $\varepsilon \nearrow$ ,  $\kappa \nearrow$ ,  $\varphi \searrow$
- $\varepsilon = 17 \div 22$ ,
  - nema opasnosti od samo paljenja – koristi jeftinije gorivo niže rafinacije
  - više temperature i pritisci pri sagorevanju – “kabastiji motor – skuplji za izradu, ali jeftiniji u eksploataciji
  - nema ni karburator, ni svećice

---

<sup>3</sup> Proces 1-2,  $s = \text{idem}$

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

Proces 2-3,  $p = \text{idem}$

$$p_2 V_2 = mRT_2 \text{ i } p_3 V_3 = mRT_3 \Rightarrow \frac{T_3}{T_2} = \frac{V_3}{V_2} = \varphi$$

Proces 3-4 i proces 1-2

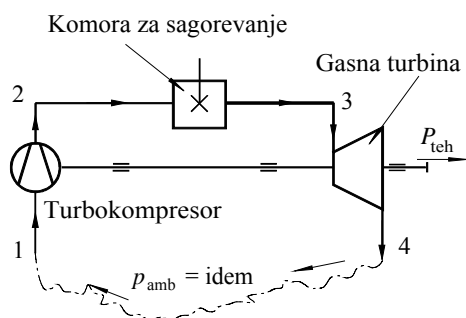
$$T_4 V_4^{\kappa-1} = T_3 V_3^{\kappa-1} \text{ i } T_1 V_1^{\kappa-1} = T_2 V_2^{\kappa-1} \Rightarrow \frac{T_4}{T_1} = \frac{T_3}{T_2} \left(\frac{V_3}{V_2}\right)^{\kappa-1} = \varphi \cdot \varphi^{\kappa-1} = \varphi^{\kappa}$$

## Džul (Joule) – Brajtonov (Brayton) kružni proces

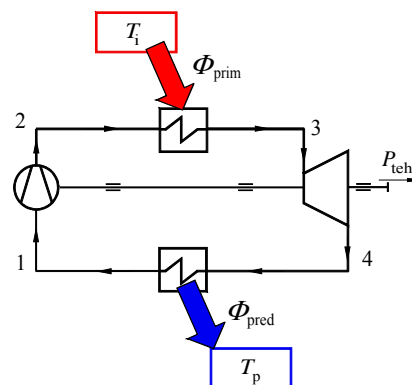
18 – James Joule

1870 – George Brayton

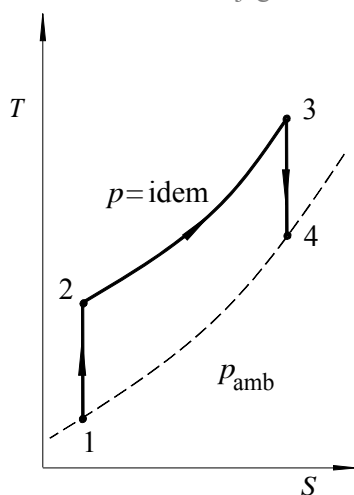
Šema postrojenja “otvorenog” tipa



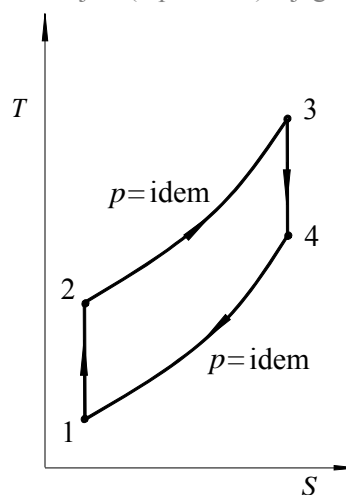
Šema postrojenja “zatvorenog” tipa



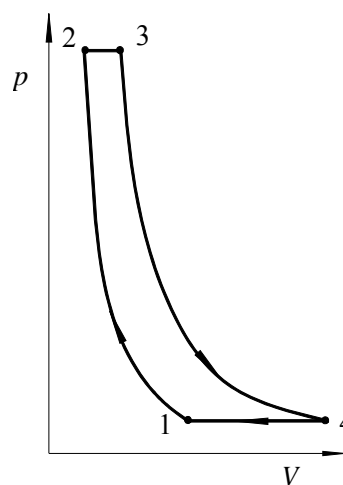
Indikatorski dijagram



Teorijski (hipotetički) dijagram



- 1-2 - adijabatsko sabijanje okolnog vazduha ( $p_{amb}$ )
- 2-3 - postepeno ubacivanje goriva i njegovo sagorevanje pri  $p = idem$
- 3-4 - radni hod – širenje produkata sagorevanja (adijabatsko širenje)
- 4 - puštanje produkata sagorevanja u okolinu ( $p_{amb}$ )



- Termodinamički stepen korisnosti

$$\eta_{t, \text{Joule}} = 1 - \frac{|\Phi_{\text{pred}}|}{\Phi_{\text{prim}}} = 1 - \frac{q_m c_p (T_4 - T_1)}{q_m c_p (T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_1 \left( \frac{T_4}{T_1} - 1 \right)}{T_2 \left( \frac{T_3}{T_2} - 1 \right)} = \dots^4$$

$$\eta_{t, \text{Joule}} = 1 - \frac{T_1}{T_2}$$

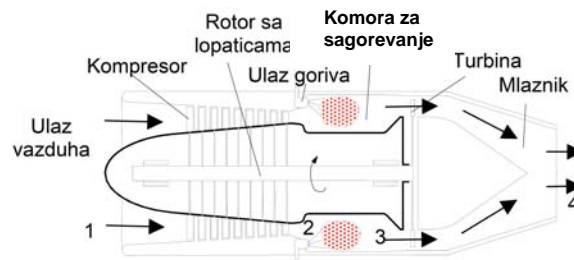
- Uvođenjem odnosa pritisaka

$$\pi = \frac{p_2}{p_1}$$

termodinamički stepen korisnosti se može napisati u obliku<sup>5</sup>

$$\eta_{t, \text{Joule}} = 1 - \pi^{\frac{1-\kappa}{\kappa}}$$

- Primer Džulovog “kružnog” procesa kod turboblaznog avionskog motora



<sup>4</sup> Kako je promena entropije pri izobarskim procesima 2-3 i 4-1 ista,

$$s_3 - s_2 = s_4 - s_1$$

$$c_p \ln \frac{T_3}{T_2} - R \ln \frac{p_3}{p_2} = c_p \ln \frac{T_4}{T_1} - R \ln \frac{p_4}{p_1} \Rightarrow \frac{T_3}{T_2} = \frac{T_4}{T_1} \Rightarrow$$

$$\eta_{t, \text{Joule}} = 1 - \frac{T_1 \left( \frac{T_4}{T_1} - 1 \right)}{T_2 \left( \frac{T_3}{T_2} - 1 \right)} = 1 - \frac{T_1}{T_2}$$

<sup>5</sup> Za izentropski proces 1-2 važi:

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