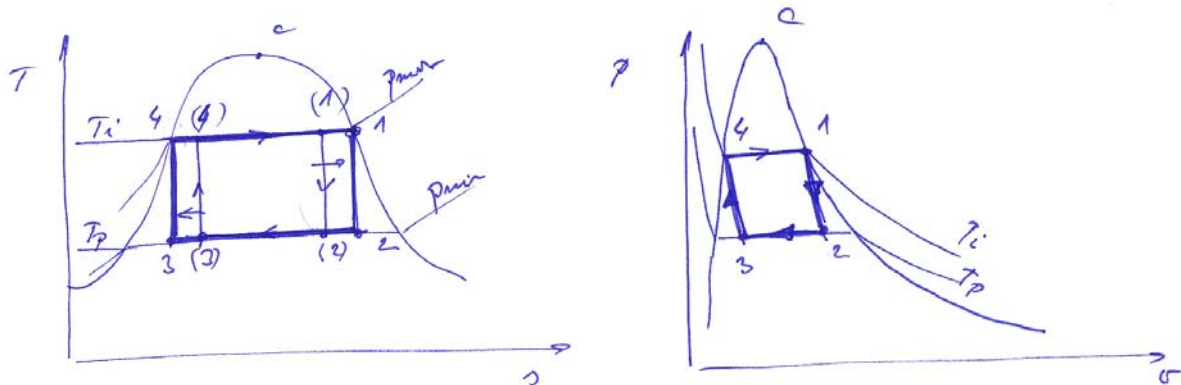
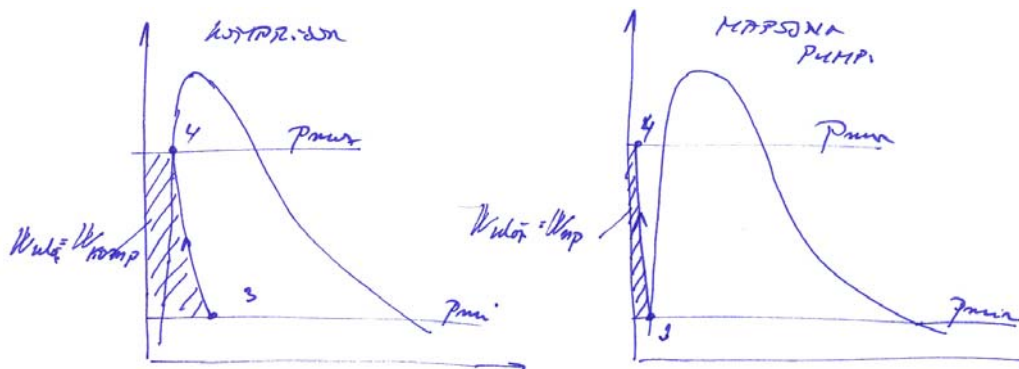


## 13. Desnokretni kružni procesi sa realnim radnim fluidima

### 13.1 Uvod – mogućnosti ostvarivanja Karnoovog kružnog procesa sa realnim fluidima



- Zbog činjenice da je proces isparavanja, odnosno kondenzacije realnog fluida izobarsko-izotermički proces, izotermički proces primanja (4-1), odnosno predaje toplote (2-3) je relativno lako ostvariti
- Tehnički problemi se javljaju pri ostvarivanju procesa izentropskog sabijanja vlažne pare (3-4), odnosno, njenog izentropskog širenja u turbini (1-2).
  - Stanja 1 i 4 obično se pomeraju na granične linije, jer se u tom slučaju dobija više specifičnog rada
- Problemi sa sabijanjem vlažne pare:
  - Bilo bi potrebno da kompresor bude znatnih dimenzija jer je  $v_3$  relativno veliko (područje vlažne pare)
  - Za pogon kompresora bilo bi potrebno trošiti relativno veliki rad ( $W_{kom}$ ) odnosno snagu ( $P_{kom}$ )



- Da bi se kompresijom vlažne pare stanja 3 ( $p_{\min}$ ), dobila zasićena tečnost 4 ( $p_{\max}$ ), ona uvek mora biti tačno određene suvoće ( $x_3$ ), što je veoma teško ostvariti (kontrolisati)
- Čak i kad bi bilo moguće da se kontroliše stanje 3, odnosno da na ulasku u kompresor uvek bude para zahtevane suvoće ( $x_3$ ), i sam proces izentropskog sabijanja (3-4), bio bi teško ostvariv. Naime, parni deo vlažne pare stanja 3 (3''), lako bi se sabijao i pri tom bi para promenila temperaturu. Za razliku od parnog, tečni deo stanja 3 (3'), pri promeni pritiska, ukoliko je proces dovoljno "brz", ne bi promenio temperaturu. To znači da po završetku procesa sabijanja ne bi bilo stvoreno stanje zasićene tečnosti (4), nego bi nastala heterogena smeša pare više i tečnosti niže temperature.
  - kompresor se zamenjuje sa napojnom pumpom i predgrejačem (ekonomajzer)
  - stanje 3 se više ne nalazi u području vlažne pare, nego tačno na liniji zasićene tečnosti
- Problemi sa širenjem vlažne pare:
  - Pored tehničkih problema u radu sa kompesorom, tehnički problemi se javljaju ukoliko se suviše vlažna para širi u turbini. To se događa, ukoliko u turbinu ulazi suva para, koja tokom procesa izentropskog širenja sve dublje "ulazi" u područje vlažne pare. Takva suviše vlažna para u stanju je da ošteti lopatice turbine.
    - uvodi se još jedan uređaj u postrojenje – predgrejač pare

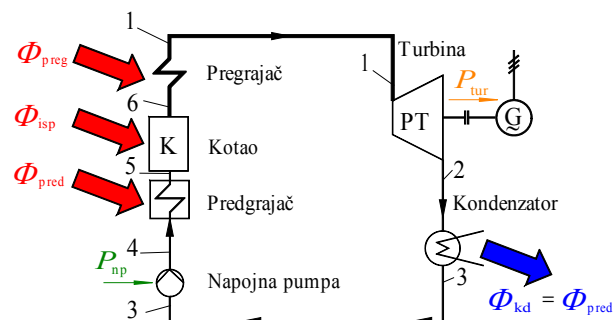
## 13.2 Rankin-Klauziusov (Rankine-Clausius) kružni proces

- Termoelekrane
- Toplotni izvor – produkti sagorevanja (gas, mazut, nafta, ugalj, ...)
- Toplotni ponor – reke, jezera, okolni vazduh (kule za hlađenje)
- Radni fluid – voda – vodena para

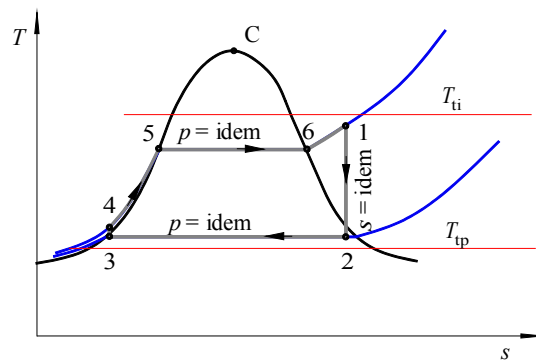
### 13.2.1 Idealni Rankin-Klauziusov kružni proces

- „Idealni“ – reč označava da su sve promene stanja, pa i one koje se odvijaju u turbini i u napojnoj pumpi ravnotežene.

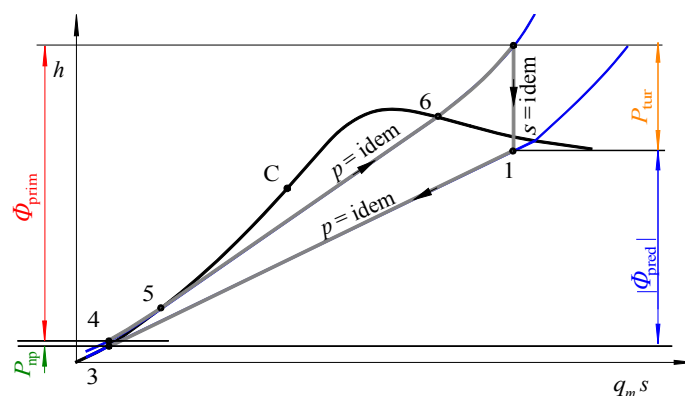
- Šema postrojenja



- Prikaz ciklusa u  $T-s$  koordinatnom sistemu



- Prikaz ciklusa u  $h-q_m s$  koordinatnom sistemu



- Toplotni tok sa toplotnog izvora (produkata sagorevanja) na vodu – vodenu paru tokom njenog izobarskog zagrevanja ( $p = \text{idem}$ ) u predgrejaču, kotlu i predgrejaču

$$\Phi_{\text{prim}} = \Phi_{\text{predg}} + \Phi_{\text{kotao}} + \Phi_{\text{preg}} = q_m (h_1 - h_4)$$

$$\Phi_{\text{prim}} = q_m [(h_5 - h_4) + (h_6 - h_5) + (h_1 - h_6)] = q_m (h_1 - h_4)$$

Ili, ukoliko se integrihali po vremenu

$$Q_{\text{prim}} = Q_{\text{predg}} + Q_{\text{kotao}} + Q_{\text{preg}} = Q_{4-5} + Q_{5-6} + Q_{6-1}$$

- Toplotni protok sa vlažne vodene pare, tokom njene izobarske kondenzacije ( $p = \text{idem}$ ) u kondenzatoru, na toplotni ponor (reke, jezera, okolni vazduh – kule za hlađenje)

$$|\Phi_{\text{pred}}| = |\Phi_{\text{kond}}| = q_m (h_2 - h_3)$$

Ili, ukoliko se integrihali po vremenu

$$|Q_{\text{pred}}| = |Q_{\text{kond}}| = |Q_{2-3}| = m(h_2 - h_3)$$

- Mehanički snaga (rad) potrebna za izentropsku promenu pritiska ( $s = \text{idem}$ ) vode u napojnoj pumpi

$$P_{\text{np}} = q_m (h_4 - h_3)$$

$$W_{\text{np}} = m(h_4 - h_3)$$

- Mehanički snaga (rad) koju pri izentropskom i ravnotežnom širenju u turbini ( $s = \text{idem}$ ) pare preda vratilu – „snaga“ turbine („dobijeni“ rad)

$$|P_{\text{tur}}| = q_m (h_1 - h_2)$$

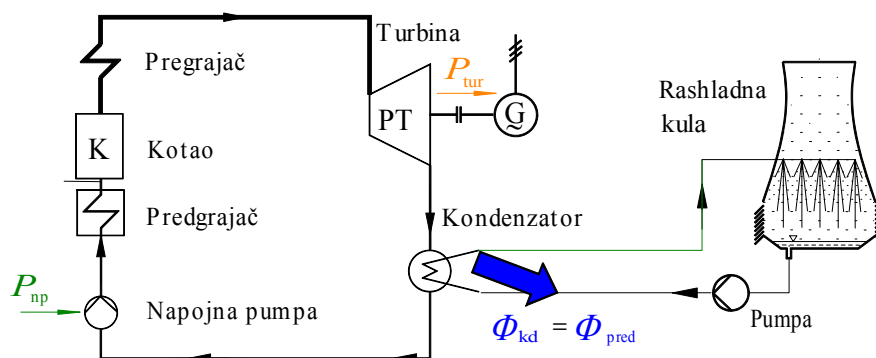
$$|W_{\text{tur}}| = m(h_1 - h_2)$$

- Termodinamički stepen korisnosti idealnog Rankin-Klauzijusovog kružnog procesa

$$\eta_{\text{t,R-K}} = -\frac{P_{\text{kp}}}{\Phi_{\text{prim}}} = \frac{P_{\text{tur}} - P_{\text{np}}}{\Phi_{\text{prim}}} = \frac{h_1 - h_2 - (h_4 - h_3)}{h_1 - h_4}$$

- Kondenzator

- uobičajeno se za hlađenje (kondenzovanje) pare u kondenzatoru koristi voda iz reka
- ukoliko nema reke, za kondenzovanje pare se koristi tzv. kula za hlađenje (isparavanjem vode u vazduh, voda se hladi i tako ohlađena skuplja u dnu kule (ili tornja) za hlađenje). – videti „Mapa za termodinamiku“, zadatak 4.5.6 str. 87



### 13.3 Odstupanja stvarnog od idealnog Rankin –Klauziosovog kružnog procesa

- Odstupanja od idealnog Rankin–Klauzijusovog kružnog procesa nastaju kao posledica nepovratnih procesa koji se dešavaju u pojedinim delovima postrojenja. Dva najčešća uzroka nepovratnosti su:
  - Mehanički – (viskozno trenje, odvijanje procesa u mehaničkoj neravnoteži, ...)
  - Termički – prelaženje toplote sa radnog fluida na okolni vazduh
- Viskozno trenje, koje nastaje kretanjem fluida, izaziva pad pritiska u predajnicima toplote (**kondenzatoru, predgrejaču, isparivaču i pregrejaču**) kao i **cevima** koje povezuju ove uređaje. Da bi se „nadoknadili“ ovi padovi pritiska, pritisak vode se u pumpi mora podići na znatno viši nivo, nego za slučaj idealnog ciklusa. Posledično, za pogon pumpe je potrebno uložiti više rada, nego u idealnom slučaju.
- Od posebne važnosti su **nepovratnosti** koje se događaju **u turbinama i pumpama**. Nepovratnosti u ovim uređajima nastaju usled mehaničke neravnoteže, neizostavno prisutne pri proticanju radnog fluida kroz ove uređaje. Kao posledica tih nepovratnosti u turbinama se stvara manje rada, a za pogon pumpi potrebno je uložiti više rada, nego pod idealnim uslovima.

U idealnim uslovima promene stanja koje se dešavaju u pumpama i turbinama su izentropske, dok su u realnim neizentropske.

Stepen odstupanja realnih od idealnih procesa opisuje se preko stepena dobrote (unutrašnjeg stepena korisnosti uređaja).

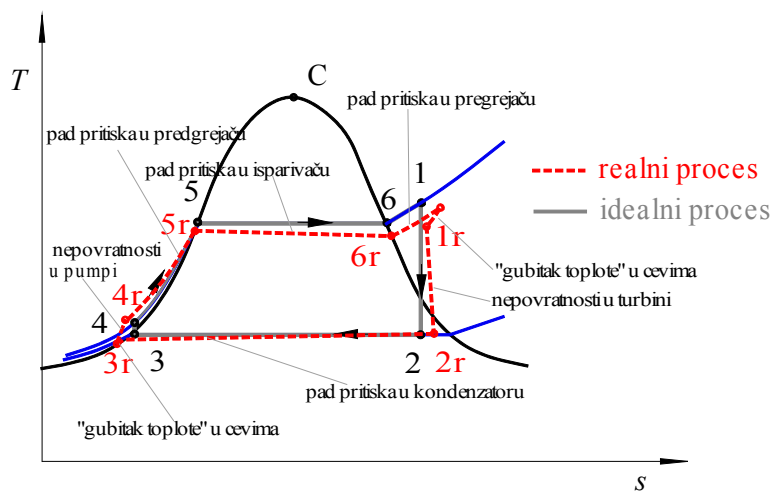
- Stepen dobrote adijatermne ekspanzije (unutrašnji stepen korisnosti turbine)

$$\eta_d^{\text{tur}} = \eta_i^{\text{tur}} = \frac{W_{\text{tur}}^{\text{realno}}}{W_{\text{tur}}^{\text{idealno}}} = \frac{P_{\text{tur}}^{\text{realno}}}{P_{\text{tur}}^{\text{idealno}}} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2\text{id}}}$$

- Stepen dobrote adijatermne kompresije (unutrašnji stepen korisnosti pumpe)

$$\eta_d^{\text{pum}} = \eta_i^{\text{pum}} = \frac{W_{\text{pum}}^{\text{idealno}}}{W_{\text{pum}}^{\text{realno}}} = \frac{P_{\text{pum}}^{\text{idealno}}}{P_{\text{pum}}^{\text{realno}}} = \frac{h_{4\text{id}} - h_3}{h_4 - h_3}$$

- Drugi važan uzrok nepovratnosti nastaje kao posledica „gubitaka toplote“ – prelaženja toplote sa radnog fluida na okolni – a pri prolasku radnog fluida kroz pomenute predajnike toplote (kondenzator, predgrejač, isparivač i pregrejač) kao kroz cevi koje povezuju ove uređaje. Da bi vrednost „proizvedenog“ rada u turbini ostala nepromenjena, „gubitke“ je potrebno „nadoknaditi“ dopunskom količinom toplote koju je u kotlu potrebno predati radnom fluidu.



- Zbog relativno malih promena pritiska, kao i prihvatljivo malih „gubitaka toplote“ u predajnicima toplote, ove promene obično mogu da se zanemare, a pod **realnim (neidealnim) Renkin-Klauzijusovim procesom**, u kursevima Temodinamike, podrazumeva se onaj proces koji u obzir uzima samo neravnotežne procese što se javljaju u turbini i napojnoj pumpi.

