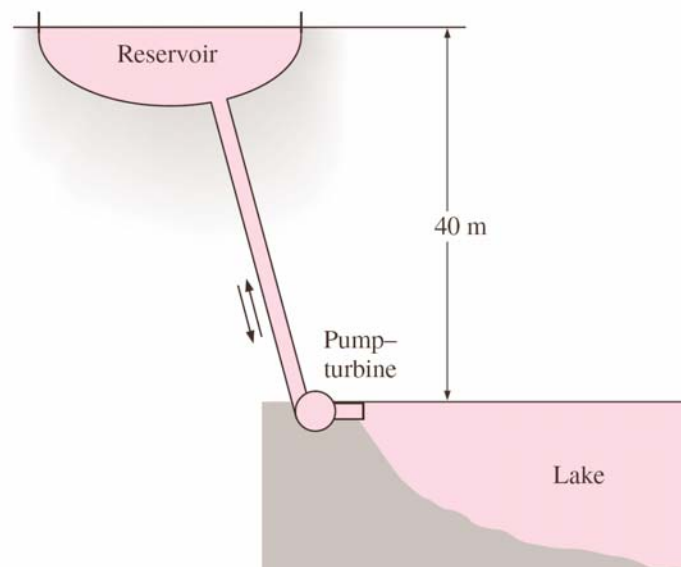


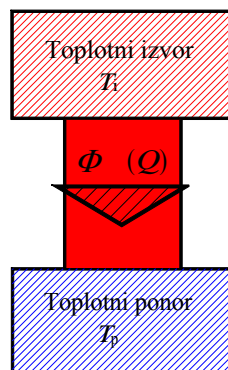
4 Termodinamička analiza desnokretnih kružnih procesa sa vodenom parom

4.1 Uvod

- U termodinamici izučavamo ponašanje radne supstancije pod dejstvom spoljašnjih energetskeg uticaja (radova i toplote). U tehničkoj praksi su od posebnog značaja slučajevi kada je dejstvo tih uticaja stalno.
- Pr. (mehanički)- Reverzibilna hidrocentrala Bajna Bašta – spontano, zbog razlike u potencijalnim energijama, javlja protok vode.
 - U normalnim uslovima radi kao hidrocentrala
 - U slučajevima kada ima „viška“ struje u sistemu radi kao pumpa (troši struju) i stvara akumulaciju vode

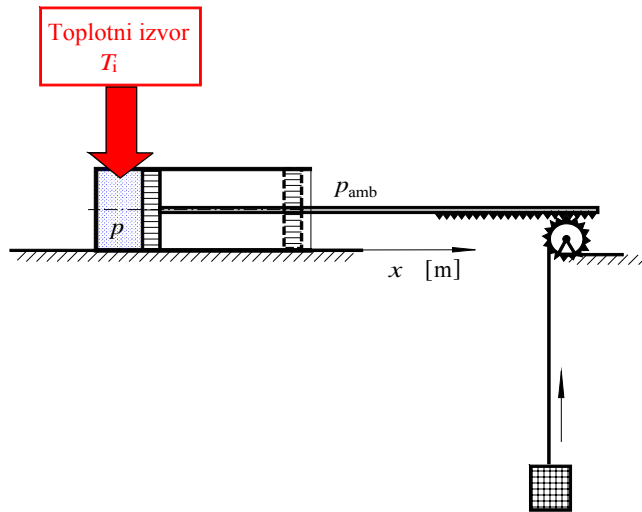


- U termotehnici



Spontano se javlja toplotni protok

- Kako da ga iskoristimo?
 - „umetanjem“ radnog fluida



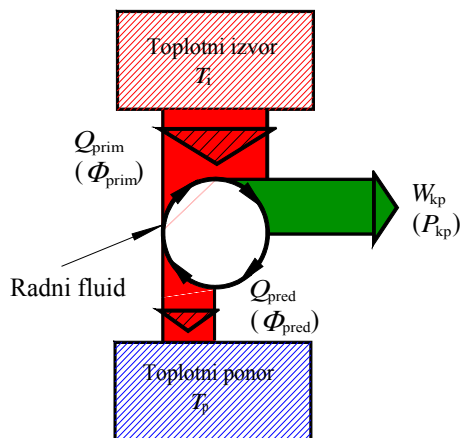
Pri predaji toplote gasu on se širi i pokreće klip, koji pokreće zupčastu letvu, koja preko zupčanika podiže teret – vrši rad

Kretanje letve ograničeno:

- dimenzijama
- temperaturama ...,

- Za trajno (permanentno) podizanje tereta, vršenje rada, radni fluid je potrebno vratiti u početno (polazno) stanje, a proces ponoviti!
- Kako?
 - Predajom toplote radne materije okolini – toplotnom ponoru

4.1.1.1 Opšta šema energetskih tokova desnokratnih kružnih procesa



$\Phi_{\text{prim}} (Q_{\text{prim}})$ – neophodno energetske dejstvo okoline okoline

$P_{\text{kp}} (W_{\text{kp}})$ – željena posledica, željeno energetske dejstvo na okolinu

$\Phi_{\text{pred}} (Q_{\text{pred}})$ – sporedno (posledično) energetske dejstvo

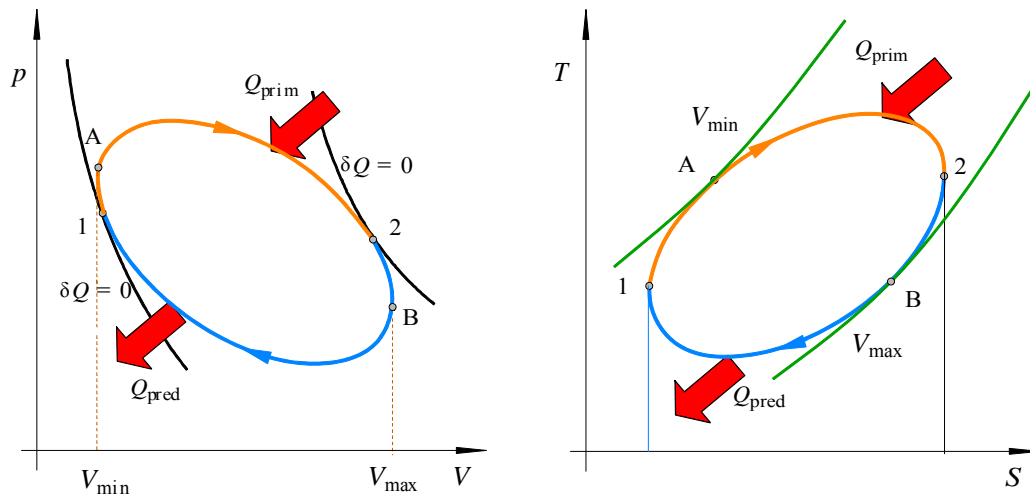
- Svrha postojanja desnokratnih kružnih procesa je permanentno dobijanje (vršenje, obavljanje) rada na račun primljene toplote
- Za pretvaranje toplote u rad $P_{\text{kp}} (W_{\text{kp}})$, između ostalog, potrebno je obezbediti toplotni izvor iz koga će radni fluid primati toplotu ($Q_{\text{prim}}, \Phi_{\text{prim}}$), radni fluid, toplotni ponor, kome će radni fluid predati toplotu $\Phi_{\text{pred}} (Q_{\text{pred}})$, kako bi mogao da se vraća u polazno stanje.

4.1.2 Termodinamički stepen korisnosti

- Mera (energetskog) kvaliteta desnokretnih kružnih procesa opisuje se termodinamičkim stepenom korisnosti

$$\boxed{\eta_t = -\frac{W_{kp}}{Q_{prim}} = -\frac{P_{kp}}{\Phi_{prim}}} \quad \left(= \frac{\text{željeno energetsko dejstvo TDS na okolinu}}{\text{neophodno energetsko dejstvo okoline na TDS}} \right)$$

4.1.3 Smer desnokretnih kružnih procesa



- Matematički negativan
- Slike su slične za sve vrste gasova (idealne, poluidealne, realne)

Analiza desnokretnih procesa Prvim principom termodinamike (zatvoren TDS)

- Posmatra se „prost“ zatvoren termodinamički sistem (npr. cilindar sa klipom i gasom u njemu)

$$\delta Q + \delta W_V = dU$$

integraljenjem po zatvorenoj konturi, od polaznog stanja(1) do krajnjeg stanja (1):

$$Q_{1-A-2-B-1} + W_{V,1-A-2-B-1} = \underbrace{U_1 - U_1}_{\text{vazna činjenica koja važi i za sve ostale veličine stanja}} = 0$$

$$Q_{1-A-2} + Q_{2-B-1} + W_{kp} = 0$$

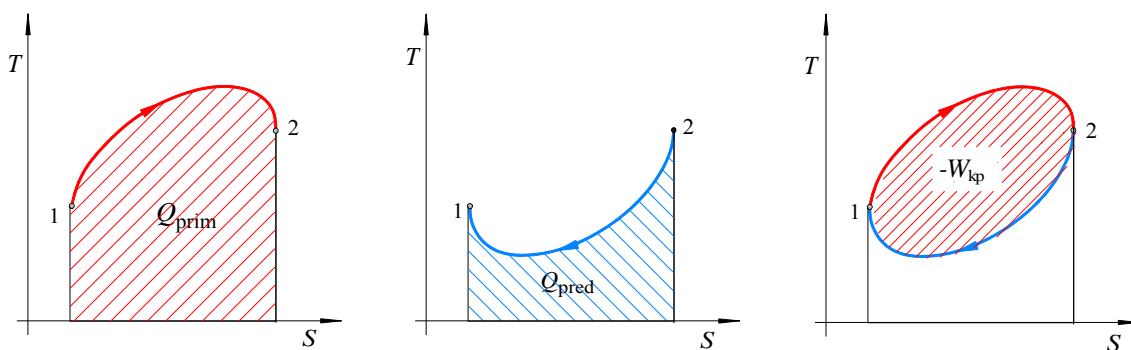
$$Q_{prim} - |Q_{pred}| + W_{kp} = 0$$

$$-W_{kp} = Q_{prim} - |Q_{pred}|$$

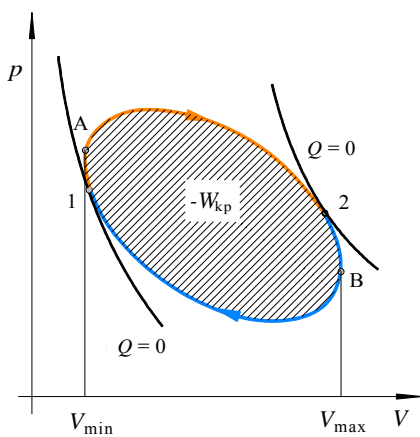
Na osnovu ovoga sledi:

$$\eta_t = \frac{Q_{\text{prim}} - |Q_{\text{pred}}|}{Q_{\text{prim}}} = 1 - \frac{|Q_{\text{pred}}|}{Q_{\text{prim}}}$$

Za ravnotežne procese



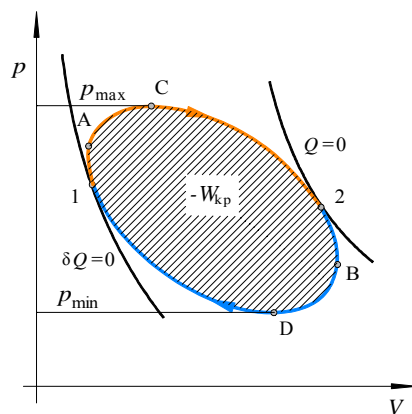
$$W_{\text{kp}} = -\oint T dS$$



$$W_{\text{kp}} = -\oint p dV$$

$$W_{\text{kp}} = W_{V,A-2-B} + W_{V,B-1-A}$$

$$W_{\text{kp}} = W_{V,\text{izvršen}} + W_{V,\text{uložen}}$$



$$W_{\text{kp}} = \oint V dp$$

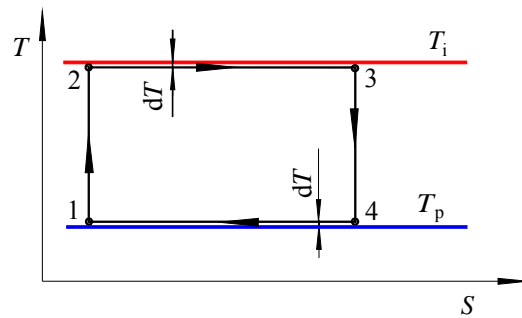
$$W_{\text{kp}} = W_{\text{teh},C-2-D} + W_{V,D-1-C}$$

$$W_{\text{kp}} = W_{\text{teh},\text{izvršen}} + W_{\text{teh},\text{uložen}}$$

4.2 Karnoov (Carnot) kružni proces

- Sadi Carnot, 1824
- Karnoov kružni proces je termodinamički „najbolji“ kružni proces – povratni kružni proces
- Karnoov kružni proces se sastoji od 4 povratne promene stanja:

1-2	izentropske ekspanzije	$s = \text{idem}$	
2-3	izotermnog „hlađenja“	$T = \text{idem}$	$T_2 = T_3 = T_p = \text{idem}$
3-4	izentropske kompresije	$s = \text{idem}$	
4-1	izotermnog „zagrevanja“	$T = \text{idem}$	$T_4 = T_1 = T_i = \text{idem}$



- Određivanje termodinamičkog stepena korisnosti Karnoovog kružnog procesa

$$\eta_{t,\text{Carno}} = 1 - \frac{|Q_{\text{pred}}|}{Q_{\text{prim}}} = 1 - \frac{T_p (S_1 - S_4)}{T_i (S_2 - S_3)} = 1 - \frac{T_p}{T_i}$$

- Karnoov proces je povratni kružni proces kružnog procesa

$$\Delta S_{\text{is}} = \Delta S_{\text{ti}} + \Delta S_{\text{tp}} + \Delta S_{\text{rs}} = 0$$

- Kratka analiza Karnoovog kružnog procesa

- Ako bi temperatura toplotnog ponora bila jednaka apsolutnoj nuli $T_p = 0 \text{ K}$ ($0^\circ - 273,15^\circ \text{C}$),

termodinamički stepen korisnosti Karnoovog kružnog procesa bio bi jednak jedinici

$$\eta_{t,\text{Carnot}} = 1$$

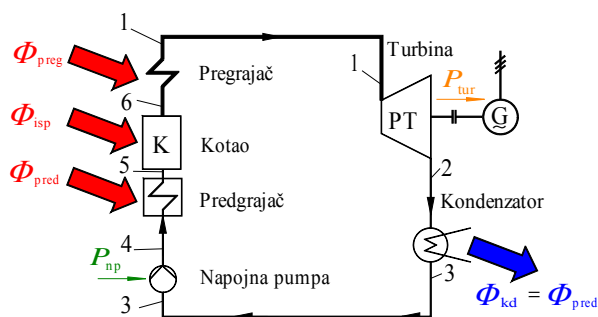
- Realno $T_p \approx 300 \text{ K}$, a $T_i = 1000 \text{ K}$, (max 1300 K), pa je

$$\eta_{t,c} = 1 - 0,3 = 0,7 \quad (\eta_{t,c} = 0,77)$$

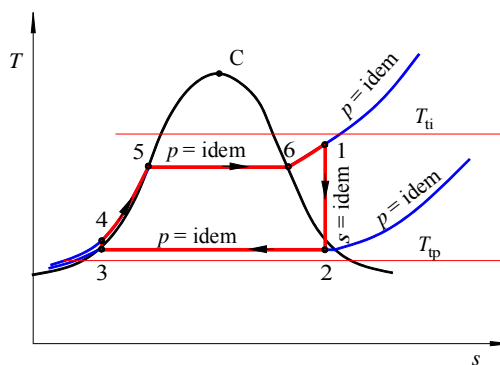
4.3 Idealni Renkin-Klauzijusov (Rankine-Clausius) kružni proces

- Ponoviti (Termodinamika B):
 - 11. Desnokretni kružni procesi
 - 13. Desnokretni kružni procesi parnih (realan fluid) postrojenja
- Termoelektrane
- Toplotni izvor: produkti sagorevanja (gasa, mazuta, nafte, uglja, ...)
- Toplotni ponor: reke, jezera, okolni vazduh (kule za hlađenje)
- Radni fluid: voda – vodena para
- Reč „idealni“ – označava da su sve promene stanja, pa i one koje se dešavaju i u turbini i u napojnoj pumpi, ravnotežene.

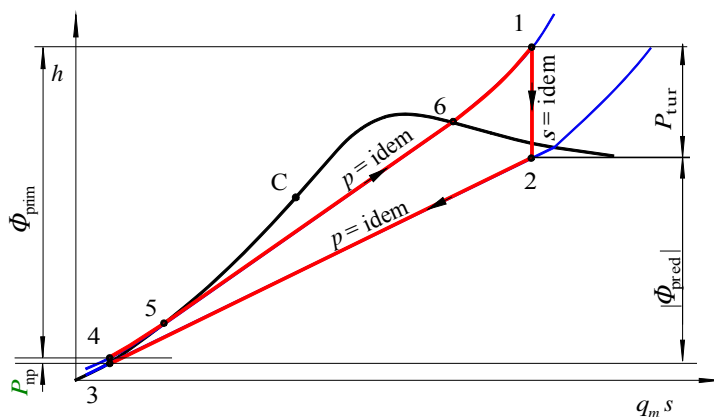
- Šema bloka parnoturbinskog postrojenja



- Prikaz ciklusa u $T-s$ koordinatnom sistemu



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



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

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

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

Ili, količina primljene toplote

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

- 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 količina predate toplota

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

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

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

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

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

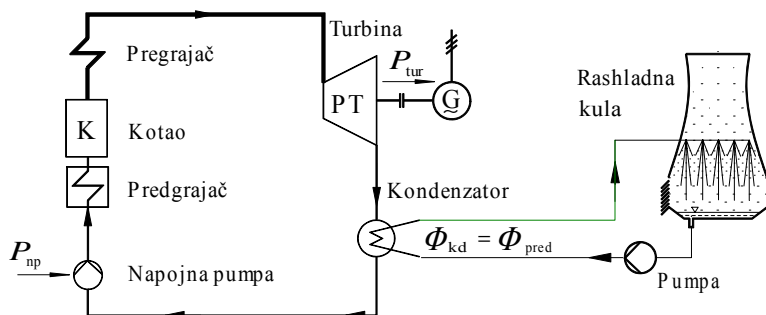
$$|P_{\text{tur}}| = q_m (h_1 - h_2) ,$$

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

- Termodinamički stepen korisnosti idealnog Rankin-Klauzijusovog kružnog procesa

$$\eta_{\text{t,R-K}} = \frac{P_{\text{kp}}}{\Phi_{\text{prim}}} = \frac{|P_{\text{tur}}| - P_{\text{np}}}{\Phi_{\text{prim}}} .$$

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



4.4 Odstupanja stvarnog od idealnog Renkin –Klauzijusovog kružnog procesa

- Odstupanja „realnog“ od idealnog Renkin–Klauzijusovog kružnog procesa nastaju kao posledica nepovratnih procesa koji se dešavaju u pojedinim delovima postrojenja. Dva najznačajnija uzroka tih 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“ nastali padovi pritiska, pritisak vode u pumpi se 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 dešavaju u **turbinama i pumpama**. Nepovratnosti u ovim uređajima nastaju usled mehaničke neravnoteže, i neizostavno su prisutne pri proticanju radnog fluida kroz ove uređaje. Kao posledica tih nepovratnosti u turbinama se „proizvodi“ manje rada, a za pogon pumpe 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 te promene neizentropske.

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

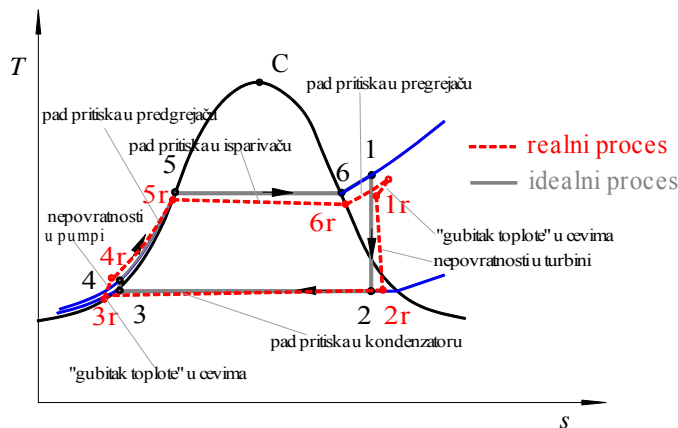
- Stepen dobrote (unutrašnji stepan korisnosti turbine)

$$\eta_d^{\text{tur}} = \eta_i^{\text{tur}} = \frac{W_{\text{tur}}^{\text{realno}}}{W_{\text{tur}}^{\text{idealno}}} = \frac{P_{\text{tur}}^{\text{realno}}}{P_{\text{tur}}^{\text{idealno}}}$$

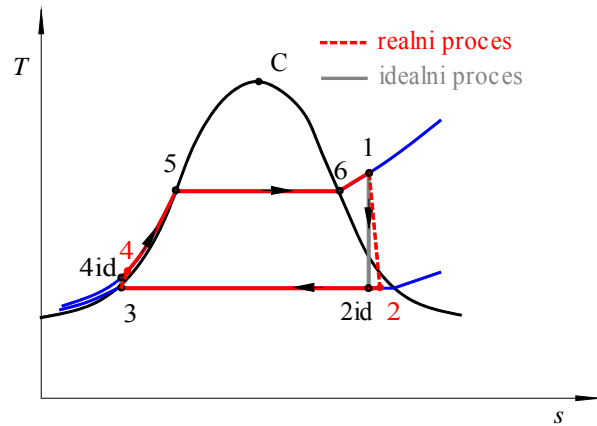
- Stepen dobrote (unutrašnji stepan korisnosti pumpe)

$$\eta_d^{\text{pum}} = \eta_i^{\text{pum}} = \frac{W_{\text{tur}}^{\text{idealno}}}{W_{\text{tur}}^{\text{realno}}} = \frac{P_{\text{tur}}^{\text{idealno}}}{P_{\text{tur}}^{\text{realno}}}$$

- Drugi važan uzrok nepovratnosti posledica je „gubitaka toplote“ – prelaženja toplote sa radnog fluida na okolinu – 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.



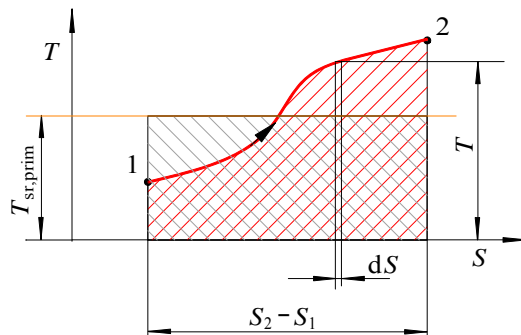
- Zbog relativno malih promena pritiska, kao i prihvatljivo malih „gubitaka toplote“ u predajnicima toplote, ove promene obično mogu da se zanemare, a pod **realnim (neidealnim) Renkin-Klauzijusovim procesom**, u kursevima Temodinamike, podrazumeva se onaj proces koji u obzir uzima samo neravnotežne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



4.5 Pojam srednje integralne temperature radnog tela (supstance) pri procesima primanja ili predaje toplote

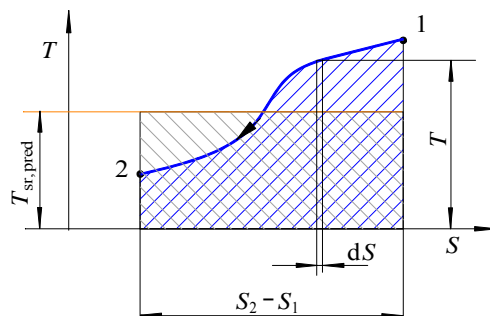
- Srednja integralna temperatura radnog tela (supstance) tokom procesa primanja toplote, definiše se kao odnos količine toplote koju radno telo tokom tog procesa primi i, tokom tog procesa promenjene entropije radnog tela.

$$\int_1^2 T dS = Q_{1-2} = T_{sr} (S_2 - S_1)$$



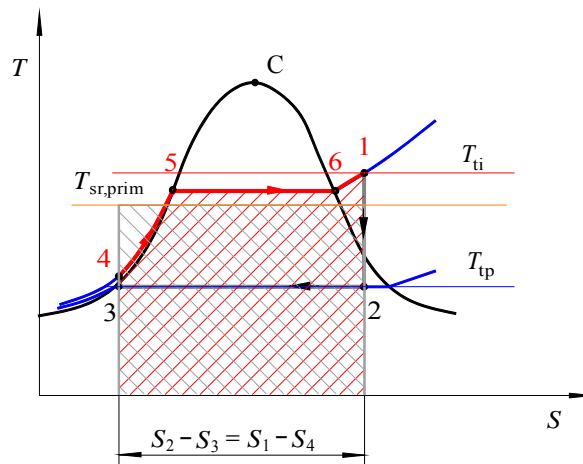
$$T_{sr,prim} = \frac{Q_{1-2}}{S_2 - S_1} = \frac{Q_{prim}}{S_2 - S_1}.$$

- Srednja integralna temperatura radnog tela (supstance) tokom procesa predaje toplote, definiše se kao odnos količine toplote koju radno telo tokom tog procesa preda i, tokom tog procesa promenjene entropije radnog tela.



$$T_{sr,pred} = \frac{Q_{1-2}}{S_2 - S_1} = \frac{Q_{pred}}{S_2 - S_1}.$$

4.6 Poređenje termodinamičkog stepena korisnosti Karnoovog i Renkin-Klauzijusovog kružnog procesa



- Termodinamički stepen korisnosti Karnoovog kružnog procesa

$$\eta_{t,C} = 1 - \frac{|Q_{\text{pred}}|}{Q_{\text{prim}}} = 1 - \frac{|\Phi_{\text{pred}}|}{\Phi_{\text{prim}}} = 1 - \frac{T_{\text{Tp}}}{T_{\text{Ti}}}$$

- Termodinamički stepen korisnosti idealnog Renkin-Klauzijusovog kružnog procesa

$$\eta_{t,R-C} = 1 - \frac{|Q_{\text{pred}}|}{Q_{\text{prim}}} = 1 - \frac{T_{\text{Tp}}(S_2 - S_3)}{T_{\text{sr,prim}}(S_1 - S_6)} = 1 - \frac{T_{\text{Tp}}}{T_{\text{sr,prim}}} = 1 - \frac{T_{\text{sr,pred}}}{T_{\text{sr,prim}}},$$

$$T_{\text{sr,prim}} = \frac{Q_{\text{prim}}}{(S_1 - S_4)} = \frac{Q_{4-5} + Q_{5-6} + Q_{6-1}}{(S_1 - S_4)}; \quad T_{\text{sr,pred}} = \frac{Q_{\text{pred}}}{(S_3 - S_2)} = \frac{Q_{2-3}}{(S_3 - S_2)},$$

$$T_{\text{sr,prim}} < T_{\text{Ti}} \Rightarrow \boxed{\eta_{t,R-C} < \eta_{t,C}}$$

4.7 Načini povećanja termodinamičkog stepana korisnosti Renkin-Klauzijusovog kružnog procesa

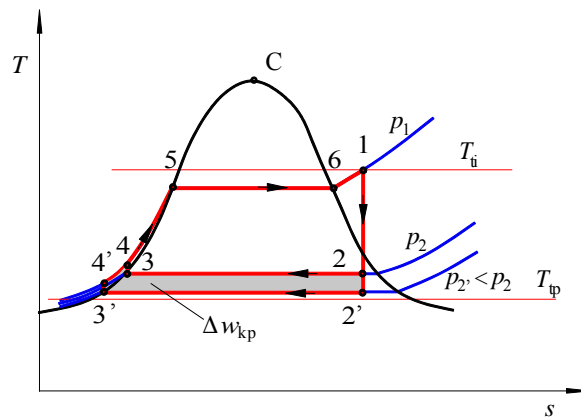
4.3.1 Snižavanje temperature kondenzovanja pare

- Snižavanjem temperature (pritiska) kondenzovanja pare, praktično se snižava se srednja integralna temperatura radnog fluida pri predaji toplote (temperatura pare u kondenzatoru), što u skladu sa izvedenim izrazom

$$\eta_{t,R-C} = 1 - \frac{T_{sr,pred}}{T_{sr,prim}},$$

vodi ka povećanju stepna korisnosti $\eta_{t,R-C}$.

- Efekat smanjenja temperature kondenzacije pare ima za posledicu povećanje ostvarnog rada kružnog procesa (Δw_{kp} - zatamnjena površina), ali i potrebu za povećanjem primljene količine toplote ($q_{4'-4}$). Spreguto dejstvo ovih povećanja vodi povećanju termodinamičkog stepena korisnosti.



- Da bi se opisana mogućnost povećanja $\eta_{t,R-C}$ iskoristila, pritisak pare u kondenzatoru obično je značajno niži od atmosferskog ($\vartheta_{sat}(1 \text{ bar}) = 99,64^\circ\text{C}$). Ostvarivanje pritiska pare ispod atmosferskog, ne predstavlja bitan tehnički problem.
- Donja granica pritiska pare ograničena je isključivo vrednošću temperature toplotnog ponora (spoljašnjeg vazduha, odnosno vode za hlađenje). Kako je za efikasnu predaju toplote potrebno obezbediti temperatursku razliku od bar 10°C , uz temperturu vode od $15^\circ\text{C} \div 20^\circ\text{C}$, minimalni pritisak kondenzacije pare mora da bude veći od $3,2 \text{ kPa}$ ($\vartheta_{sat}(0,032 \text{ bar}) = 25,07^\circ\text{C}$, $\vartheta_{sat}(0,04 \text{ bar}) = 28,99^\circ\text{C}$).

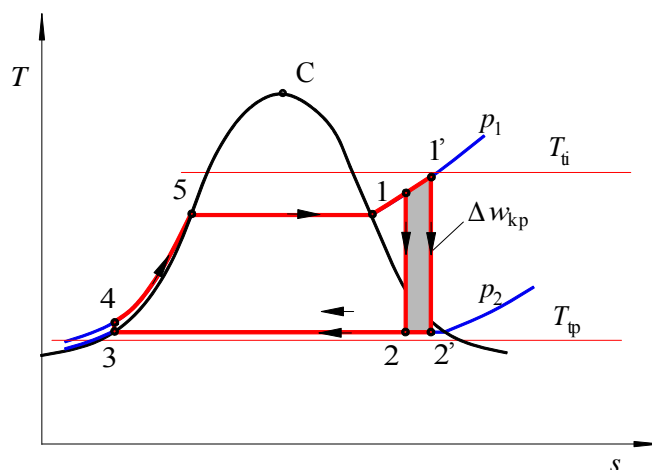
4.3.2 Povišavanje temperature pregrevanja pare

- Povišavanjem temperature pregrevanja pare, povećava se i srednja integralna temperatura radnog fluida pri primanju toplote u (kotao), što u skladu sa izvedenim izrazom

$$\eta_{t,R-C} = 1 - \frac{T_{sr,pred}}{T_{sr,prim}},$$

vodi povećanju $\eta_{t,R-C}$.

- Ponovo, efekat povišavanja temperature pregrevanja pare ima za posledicu povećanje ostvarnog rada kružnog procesa (Δw_{kp} - zatamnjena površina), kao i potrebu za povećanjem primljene količine toplote ($q_{1-1'}$). Ponovo, spreguto dejstvo ovih povećanja vodi povećanju termodinamičkog stepena korisnosti Renkin-Klauzijusovog kružnog procesa.



- Gornja granica temperature pregrevanja pare ograničena je i sa mogućnosti ostvarivanja visokih temperatura toplotnog izvora (produkata sagorevanja), ali i sa osobinama materijala u kojima će se ovi procesi ostvarivati. Trenutno, materijali koji se koriste za izgradnju pregrejača (austenitni čelici) dopuštaju da maksimalna temperatura pregravanja pare ne prelazi 620°C. Predviđa se, da će prelaskom na keramičke pregrejače, ova temperatura moći da se značajno poveća.

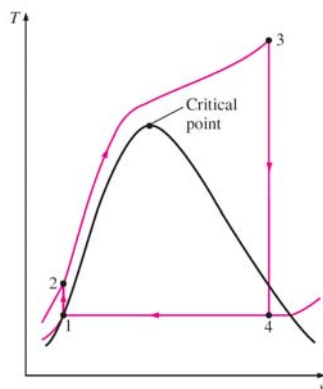
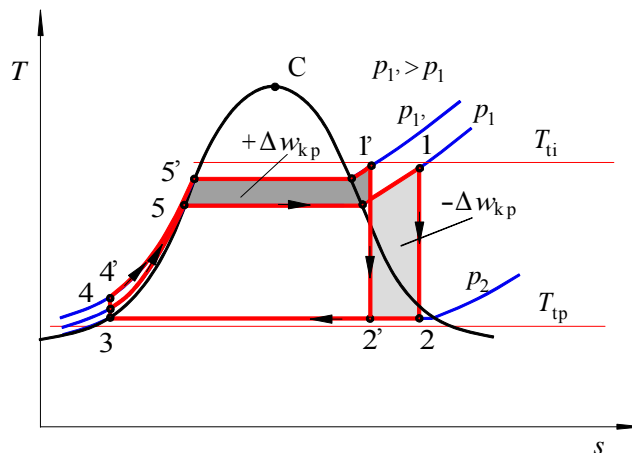
4.3.3 Povišavanje pritiska ključanja (isparavanja) tečnosti

- Povećavanjem pritiska isparavanja tečnosti, uz nepromenjivu maksimalnu temperaturu pare (T_{\max}) povećava se i srednja integralna temperatura radnog fluida pri primanju toplote, čime bi trebalo da se u skladu sa izvedenim izrazom

$$\eta_{t,R-C} = 1 - \frac{T_{sr,pred}}{T_{sr,prim}},$$

povećava i $\eta_{t,R-C}$.

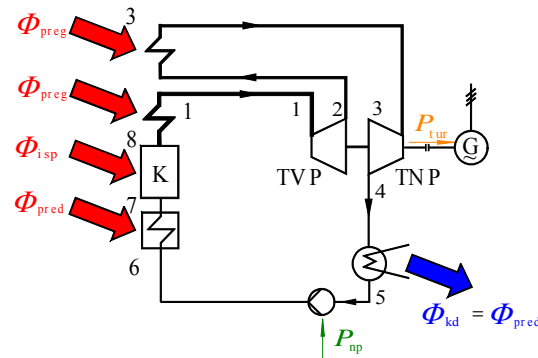
- Povećavanje pritiska isparavanja tečnosti, istovremeno vodi i povećanju i smanjenju ostvarnog (rada kružnog procesa (Δw_{kp} i $-\Delta w_{kp}$ - zatamnjene površine), uz takođe promenjenu potrebu za primljenom količinom toplote. Otuda, sa porastom p_{\max} (uz nepromenjivo T_{\max}), $\eta_{t,R-C}$ ne raste linearno, nego je taj rast “usporen”, asimptotski se približavajući jednoj vrednosti.
- Termo-ekonomska analiza $\Rightarrow p_{\max} \approx 9 \div 10$ MPa (sa porastom p_{\max} moraju se koristiti deblje cevi, limovi, specijalne pumpe, ...)
- Poseban problem predstavlja i povećanje vlažnosti pare po izlasku iz turbine (rešenje ... višestepeno širenje pare sa njenim međupregrevanjem)



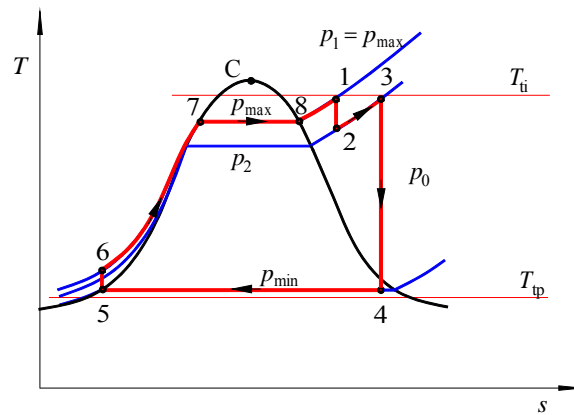
- Nadkritični Renkin-Klauzijusov kružni proces
- Maksimalni radni pritisak pare
1922. godine , 2,7 MPa
2006. godine, 30 MPa (nadkritični pritisak) –
kritični pritisak $p_C = 22,13$ MPa .

4.3.4 Višestepeno širenje pare sa međupregrevanjem

- Povisiti srednju integralnu temperaturu radnog fluida pri primanju toplote ($T_{sr,prim}$), uz ograničen maksimalni pritisak (p_{max}) i maksimalnu temperaturu pregrejane pare (T_{max}), i na taj način u ostvariti povećanje $\eta_{t,R-C}$, moguće je postići pomoću procesa višestepenog širenja pare u turbini uz njeno međupregrevanje.
- Šema bloka parnoturbinskog postrojenja sa dvostepenim širenjem pare i njenim međupregrevanjem



- Prikaz kružnog ciklusa u $T-s$ koordinatnom sistemu



- Toplotni protok sa toplotnog izvora na vodu – vodenu paru tokom njenog izobarskog zagrevanja ($p = idem$) u kotlu (predgrejaču, isparivaču, pregrejaču i međupregrejaču)

$$\Phi_{prim} = \Phi_{predg} + \Phi_{ispa} + \Phi_{preg} + \Phi_{mpreg} = q_m [(h_1 - h_6) + (h_3 - h_2)],$$

$$\Phi_{prim} = q_m [(h_7 - h_6) + (h_8 - h_7) + (h_1 - h_8) + (h_3 - h_2)] = q_m [(h_1 - h_6) + (h_3 - h_2)],$$

ili, količina primljene toplote

$$Q_{prim} = Q_{predg} + Q_{ispa} + Q_{preg} + Q_{mpreg} = Q_{7-6} + Q_{8-7} + Q_{1-8} + Q_{2-3}.$$

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

$$|\Phi_{pred}| = |\Phi_{kond}| = q_m (h_4 - h_5),$$

ili, količina predate toplote

$$|Q_{\text{pred}}| = |Q_{\text{kond}}| = |Q_{4-5}| = m(h_4 - h_5).$$

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

$$P_{\text{np}} = q_m(h_6 - h_5),$$

$$W_{\text{np}} = m(h_6 - h_5).$$

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

$$|P_{\text{tur}}| = |P_{\text{tur}}^{\text{vp}}| + |P_{\text{tur}}^{\text{np}}| = q_m[(h_1 - h_2) + (h_3 - h_4)],$$

$$|W_{\text{tur}}| = |W_{\text{tur}}^{\text{vp}}| + |W_{\text{tur}}^{\text{np}}| = m[(h_1 - h_2) + (h_3 - h_4)].$$

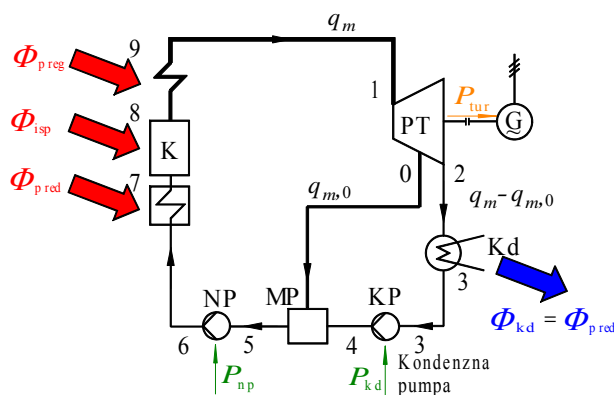
- Termodinamički stepen korisnosti kružnog procesa

$$\eta_{\text{t,R-K}} = \frac{|P_{\text{tur}}| - P_{\text{np}}}{\Phi_{\text{prim}}} = \frac{q_m[(h_1 - h_2) + (h_3 - h_4) - (h_6 - h_5)]}{q_m[(h_1 - h_6) + (h_3 - h_2)]}.$$

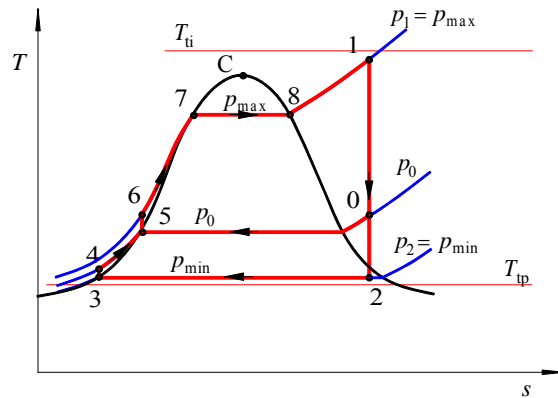
4.3.5 Regenerativno zagrevanje napojne vode

4.3.5.1 Regenerativno zagrevanje napojne vode sa parom oduzetom iz turbine, u predajniku toplote mešnog tipa

- I regeneracija toplote doprinosi povišenju srednje temperature radnog fluida pri procesu primanja toplote, pa je i tako moguće da se ostvari povećanje termodinamičkog stepena korisnosti Renkin-Klauzijusovog kružnog procesa.
- Šema bloka parnoturbinskog postrojenja sa regenerativnim zagrevanjem napojne vode, u predajniku toplote mešnog tipa, parom oduzetom iz turbine



- Prikaz kružnog ciklusa u $T-s$ koordinatnom sistemu



- Bilans energije za mešni predajnik (MP):

$$\underbrace{q_{m,0}h_0 + (q_m - q_{m,0})h_4}_{\text{ulaz u MP}} = \underbrace{q_m h_5}_{\text{izlaz iz MP}},$$

obično $h_5 = h'(p_0)$.

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

$$\Phi_{\text{prim}} = \Phi_{\text{predg}} + \Phi_{\text{ispa}} + \Phi_{\text{preg}} = q_m (h_1 - h_6),$$

$$\Phi_{\text{prim}} = q_m [(h_7 - h_6) + (h_8 - h_7) + (h_1 - h_8)] = q_m (h_1 - h_6).$$

ili, količina primljene toplote

$$Q_{\text{prim}} = Q_{\text{predg}} + Q_{\text{ispa}} + Q_{\text{preg}} = Q_{7-6} + Q_{8-7} + Q_{1-8}.$$

- 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)

$$|\Phi_{\text{pred}}| = |\Phi_{\text{kond}}| = (q_m - q_{m,0})(h_2 - h_3),$$

ili, količina predate toplote

$$|Q_{\text{pred}}| = |Q_{\text{kond}}| = |Q_{2-3}| = (m - m_0)(h_2 - h_3).$$

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

$$P_{\text{kp}} = q_{m,0}(h_4 - h_3),$$

$$W_{\text{kp}} = m_0(h_4 - h_3).$$

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

$$P_{\text{np}} = q_m(h_6 - h_5),$$

$$W_{\text{np}} = m(h_6 - h_5).$$

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

$$|P_{\text{tur}}| = |P_{\text{tur}}^{\text{vp}}| + |P_{\text{tur}}^{\text{np}}| = q_m(h_1 - h_0) + (q_m - q_{m,0})(h_0 - h_2),$$

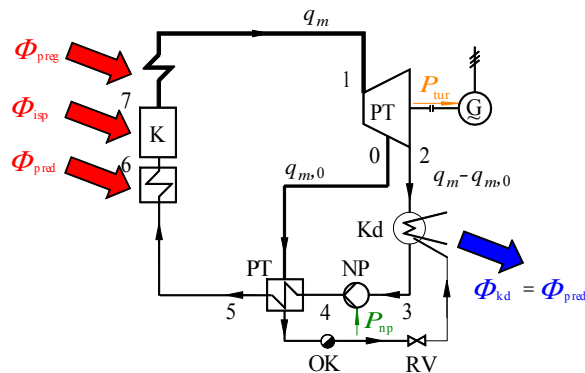
$$|W_{\text{tur}}| = |W_{\text{tur}}^{\text{vp}}| + |W_{\text{tur}}^{\text{np}}| = m(h_1 - h_0) + (m - m_0)(h_0 - h_2).$$

- Termodinamički stepen korisnosti kružnog procesa

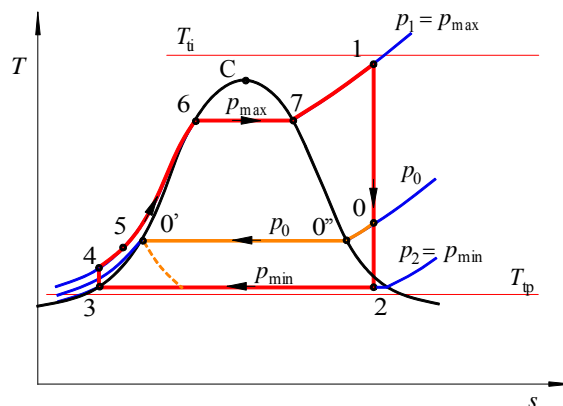
$$\eta_{\text{t,R-K}} = \frac{|P_{\text{tur}}| - P_{\text{kp}} - P_{\text{np}}}{\Phi_{\text{prim}}} = \frac{q_m(h_1 - h_0) + (q_m - q_{m,0})(h_0 - h_2) - q_{m,0}(h_4 - h_3) - q_m(h_6 - h_5)}{q_m(h_1 - h_6)}.$$

4.3.5.2 Regenerativno zagrevanje napojne vode sa parom oduzetom iz turbine u predajniku toplote površinskog tipa

- Kao što je već pokazano, regeneracija toplote doprinosi povišenju srednje temperature radnog fluida pri procesu primanja toplote, to jest omogućava povećanje termodinamičkog stepena korisnosti Renkin-Klauzijusovog kružnog procesa.
- Šema bloka paroturbinskog postrojenja sa regenerativnim zagrevanjem napojne vode parom oduzetom iz turbine u predajniku toplote površinskog tipa



- Prikaz kružnog ciklusa u $T-s$ koordinatnom sistemu



- Bilans energije za predajnik toplote (PT) površinskog tipa:

$$\underbrace{q_{m,0}h_0 + q_m h_4}_{\text{ulaz u PT}} = \underbrace{q_{m,0}h_{0'} + q_m h_5}_{\text{izlaz iz PT}},$$

pri čemu je $h_{0'} = h'(p_0)$.

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

$$\Phi_{\text{prim}} = \Phi_{\text{predg}} + \Phi_{\text{ispa}} + \Phi_{\text{preg}} = q_m(h_1 - h_5),$$

$$\Phi_{\text{prim}} = q_m[(h_6 - h_5) + (h_7 - h_6) + (h_1 - h_7)] = q_m(h_1 - h_5),$$

ili količina primljene toplote

$$Q_{\text{prim}} = Q_{\text{predg}} + Q_{\text{ispa}} + Q_{\text{preg}} = Q_{6-5} + Q_{7-6} + Q_{1-7}.$$

- 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)

$$|P_{\text{tur}}| = |P_{\text{tur}}^{\text{vp}}| + |P_{\text{tur}}^{\text{np}}| = q_m(h_1 - h_0) + (q_m - q_{m,0})(h_0 - h_2),$$

$$|W_{\text{tur}}| = |W_{\text{tur}}^{\text{vp}}| + |W_{\text{tur}}^{\text{np}}| = m(h_1 - h_0) + (m - m_0)(h_0 - h_2).$$

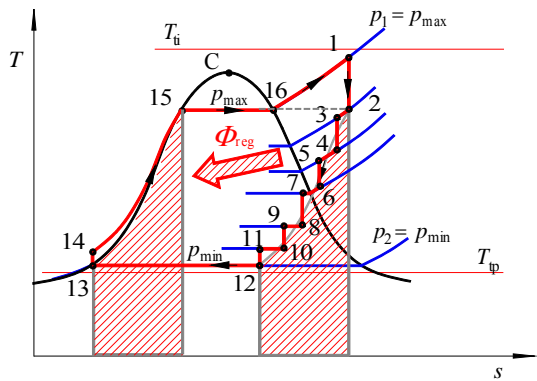
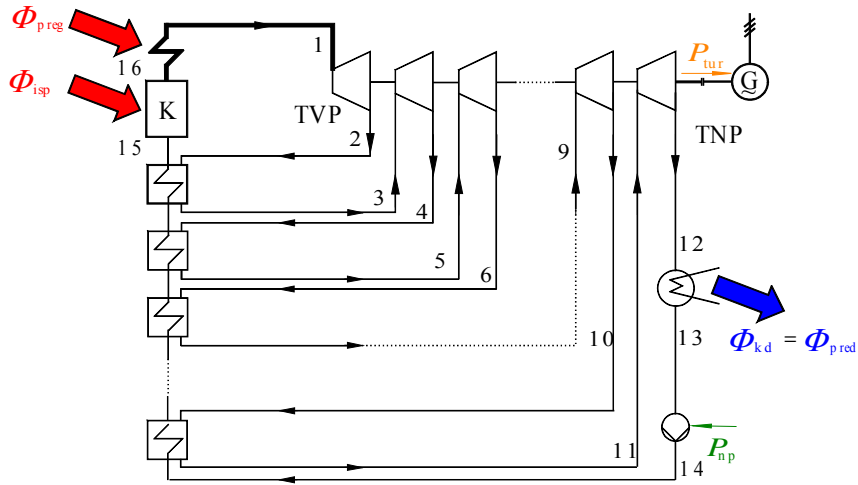
- Termodinamički stepen korisnosti kružnog procesa

$$\eta_{\text{t,R-K}} = \frac{|P_{\text{tur}}| - P_{\text{np}}}{\Phi_{\text{prim}}} = \frac{q_m(h_1 - h_0) + (q_m - q_{m,0})(h_0 - h_2) - q_m(h_4 - h_3)}{q_m(h_1 - h_5)}.$$

4.3.5.3 Višestepeno širenje pare u turbini uz regenerativno zagrevanje napojne vode

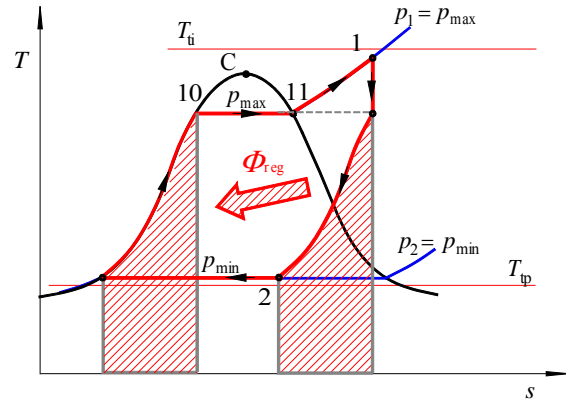
- Povećati srednju integralnu temperaturu radnog fluida pri primanju toplote ($T_{\text{sr,prim}}$), uz ograničen maksimalni pritisak (p_{max}) i maksimalnu temperaturu pregrejane pare (T_{max}), i na taj način u ostvariti povećanje $\eta_{\text{t,R-K}}$, moguće je postići i pomoću procesa višestepenog širenja pare uz regenerativnog zagrevanja napojne vode.

- Šema bloka parnoturbinskog postrojenja sa višestepenim širenjem pare u turbini uz regenerativno zagrevanje napojne vode



- Prikaz „realnog“ kružnog ciklusa u $T-s$ koordinatnom sistemu

- Prikaz teorijskog kružnog ciklusa u $T-s$ koordinatnom sistemu (teorijski)



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

$$\Phi_{\text{prim}} = \Phi_{\text{ispa}} + \Phi_{\text{preg}} = q_m (h_1 - h_{15}),$$

$$\Phi_{\text{prim}} = q_m [(h_{16} - h_{15}) + (h_1 - h_{16})] = q_m (h_1 - h_{15}),$$

ili količina primljene toplote

$$Q_{\text{prim}} = Q_{\text{isp}} + Q_{\text{preg}} = Q_{15-16} + Q_{16-1}.$$

- 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)

$$|\Phi_{\text{pred}}| = |\Phi_{\text{kond}}| = q_m(h_{12} - h_{13}),$$

ili količina predate toplote

$$|Q_{\text{pred}}| = |Q_{\text{kond}}| = |Q_{12-13}| = m(h_{12} - h_{13}).$$

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

$$P_{\text{np}} = q_m(h_{14} - h_{13}),$$

$$W_{\text{np}} = m(h_{14} - h_{13}) .$$

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

$$|P_{\text{tur}}| = \sum |P_{\text{tur},i}| = q_m [(h_1 - h_2) + (h_3 - h_4) + (h_5 - h_6) + (h_7 - h_8) + (h_9 - h_{10}) + (h_{11} - h_{12})],$$

$$|W_{\text{tur}}| = \sum |W_{\text{tur},i}| = m[(h_1 - h_2) + (h_3 - h_4) + (h_5 - h_6) + (h_7 - h_8) + (h_9 - h_{10}) + (h_{11} - h_{12})].$$

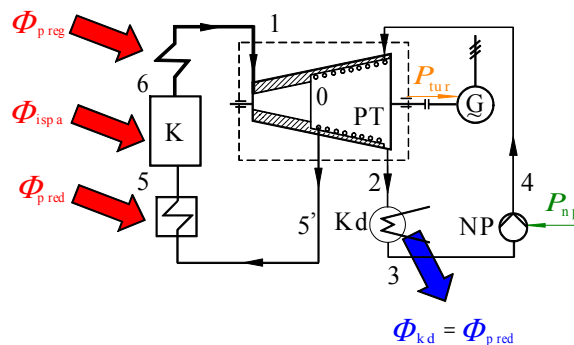
- Termodinamički stepen korisnosti kružnog procesa

$$\eta_{\text{t,R-K}} = \frac{|P_{\text{tur}}| - P_{\text{np}}}{\Phi_{\text{prim}}},$$

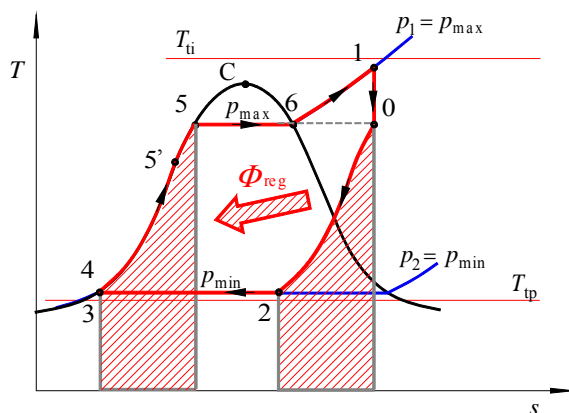
$$\eta_{\text{t,R-K}} = \frac{q_m [(h_1 - h_2) + (h_3 - h_4) + (h_5 - h_6) + (h_7 - h_8) + (h_9 - h_{10}) + (h_{11} - h_{12}) - (h_{14} - h_{13})]}{q_m (h_1 - h_{15})}.$$

4.3.5.4 Regenerativno zagrevanje napojne vode u predajniku toplote smeštenog u izlaznom delu kućišta turbine

- Šema bloka parnoturbinskog postrojenja sa regenerativnim zagrevanjem napojne vode u predajniku toplote smeštenog u izlaznom delu kućišta turbine



- Prikaz kružnog ciklusa u $T-s$ koordinatnom sistemu (zanemaren rad napojne pumpe)



- Toplotni protok sa toplotnog izvora (produkata sagorevanja) na vodu – vodenu paru tokom njenog izobarskog zagrevanja ($p = \text{idem}$) u predgrejaču, kotlu i pregrejaču za slučaj da stepen regeneracije toplote iznosi $\sigma_{\text{reg}} = \Phi_{\text{reg}} / \Phi_{\text{reg,max}} = 1$

$$\Phi_{\text{prim}} = \cancel{\Phi_{\text{predg}}} + \Phi_{\text{kotao}} + \Phi_{\text{preg}} = q_m (h_1 - h_5),$$

$$\Phi_{\text{prim}} = q_m [(h_5 - h_{5'}) + (h_6 - h_5) + (h_1 - h_6)] = q_m (h_1 - h_5),$$

ili, količina primljene toplote

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

Odnosno, ukoliko je $\sigma_{\text{reg}} = \Phi_{\text{reg}} / \Phi_{\text{reg,max}} < 1$

$$\Phi_{\text{prim}} = \Phi_{\text{predg}} + \Phi_{\text{ispa}} + \Phi_{\text{preg}} = q_m (h_1 - h_{5'}),$$

$$\Phi_{\text{prim}} = q_m [(h_5 - h_{5'}) + (h_6 - h_5) + (h_1 - h_6)] = q_m (h_1 - h_{5'}).$$

- 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, količina predate toplote

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

- Mehanička snaga (rad) potrebna za pogon napojne pumpe se zanemaruje

$$P_{\text{np}} \approx 0, \quad W_{\text{np}} = 0.$$

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

$$|P_{\text{tur}}| = |P_{\text{tur}}^{\text{vp}}| + |P_{\text{tur}}^{\text{np}}| = q_m (h_1 - h_0) + [q_m (h_0 - h_2) - |\Phi_{\text{rek}}|],$$

$$|W_{\text{tur}}| = |W_{\text{tur}}^{\text{vp}}| + |W_{\text{tur}}^{\text{np}}| = m(h_1 - h_0) + [m(h_0 - h_2) - |Q_{\text{rek}}|].$$

- Termodinamički stepen korisnosti kružnog procesa

$$\eta_{\text{t,R-K}} = \frac{\Phi_{\text{prim}} - |\Phi_{\text{pred}}|}{\Phi_{\text{prim}}} = 1 - \frac{|\Phi_{\text{pred}}|}{\Phi_{\text{prim}}} = 1 - \frac{(h_3 - h_2)}{(h_1 - h_{5'})}$$