Příklad 1

Plynová turbína pracuje dle Ericsson-Braytonova oběhu. Kompresor nasává *0,05 [kg.s-^{1}]* vzduchu (individuální plynová konstanta *287,04 [J.kg^{-1}K^{-1}]*; Poissonova konstanta 1,4) o tlaku *0,12 [MPa]* a teplotě *28 [°C].* Teplota na vstupu do turbíny je *1200 [°C]*, na výstupu z turbíny *650 [°C].*

Určete:

- znázorněte oběh v *p-v* a *T-s* diagramu, očíslujte charakteristické body, popište křivky změn, naznačte, v které části se teplo přivádí a v které odvádí
- vypište zadané hodnoty pro vaše očíslování charakteristických bodů v diagramu
- stanovte teplotu, tlak a měrný objem ve všech charakteristických bodech (nejlépe uspořádejte do přehledné tabulky)
- vypočítejte objem nasávaný kompresorem za jednotku času
- vyřešte měrné přivedené teplo, měrné odvedené teplo, měrnou práci cyklu
- vypočítejte tepelnou účinnost cyklu a výkon turbíny (tj. výkon soustrojí)

Dáno:

$\dot{m} = 0{,}05\ [kg.s^{-1}];\ r = 287{,}04\ [J.kg^{-1}.K^{-1}];\ \kappa = 1{,}4;\ p_1 = 0{,}12\ [MPa];\ t_1 = 28\ [°C]$

$t_3 = 1200\ [°C];\ t_4 = 650\ [°C]$

Řešení začneme kreslením grafů, abychom si ujasnili skutečnosti, týkající se tohoto cyklu **(cykly tedy musíte umět kreslit a poznat jednotlivé křivky)**.

Braytnův-Ericsonův oběh se skládá z těchto křivek:

Pro p-V diagram:

1 – 2 Adiabata (adiabatická komprese)

2 – 3 Izobara (izobarický přívod tepla)

3 – 4 Adiabata (adiabatická expanze)

4 – 1 Izobara (izobarický odvod tepla)

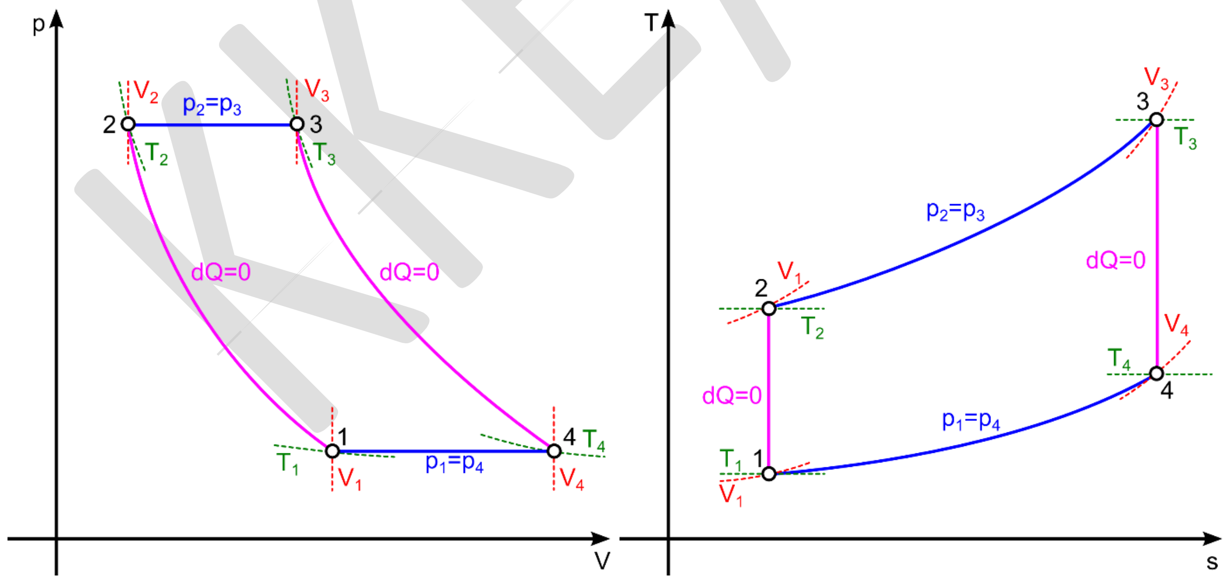
Pro T-s diagram:

1 – 2 Izoentropická změna (dq=0 ; ds=konst.)

2 – 3 Izobara (izobarický přívod tepla)

3 – 4 Izoentropická změna (dq=0 ; ds=konst.)

4 – 1 Izobara (izobarický odvod tepla)



Obr. 1 p-V (vlevo) a T-s (vpravo) diagram Brayton-Ericsonova cyklu

- Množství přivedeného tepla je reprezentována plochou pod izobarou mezi body 2 a 3.
- Množství odvedeného tepla je reprezentována plochou pod izobarou mezi body 4 a 1.
- Při dějích, které se odehrávají mezi body 1 a 2 respektive mezi 3 a 4 nedochází k přívodu ani odvodu tepla.

Dalším bodem zadání je *„vypište zadané hodnoty pro vaše očíslování charakteristických bodů v diagramu“*. Je dobré jsi tedy vytvořit tabulku, která bude postupně doplňována. Ze zadání můžeme doplnit následujícím způsobem:

	1	2	3	4
p [Pa]	0,12.10^6			
T [K]	301,15		1473,15	923,15
v [m^3.kg^-1]				

Bez jakýchkoli počtů můžeme tabulku doplnit ještě o jednu hodnotu. Víme, že mezi body 1 a 4 je izobara, tedy tlak v obou bodech je stejný. Tabulka tedy bude vypadat následovně:

	1	2	3	4
p [Pa]	0,12.10^6			0,12.10^6
T [K]	301,15		1473,15	923,15
v [m^3.kg^-1]				

Dalším bodem zadání je *„stanovte teplotu, tlak a měrný objem ve všech charakteristických bodech“*. Všimněme si, že v zadání je napsáno měrný objem, tedy výsledky se očekávají v rozměrech $m^3.kg^{-1}$.
Při samotném výpočtu je dobré začít body, o kterých víme nejvíc. Tedy dle tabulky jsou to body 1 a 4. Zaměříme se tedy nejprve na ně.
Výpočet měrného **objemu v bodě 1** bude vycházet ze stavové rovnice**:**

$$p_1 . v_1 = r . T_1$$

$$v_1 = \frac{r . T_1}{p_1} = \frac{287{,}04 \, . \, 301{,}15}{0{,}12 \, . \; 10^6} = 0{,}72 \; [m^3 . kg^{-1}]$$

Výpočet měrného **objemu v bodě 4** bude vycházet ze stavové rovnice**:**

$$p_4 . v_4 = r . T_4$$

$$v_4 = \frac{r . T_4}{p_4} = \frac{287{,}04 \, . \, 923{,}15}{0{,}12 \, . \, 10^6} = 2{,}208 \; [m^3 . kg^{-1}]$$

Tabulku tedy můžeme doplnit o další hodnoty:

	1	2	3	4
p [Pa]	0,12.10^6			0,12.10^6
T [K]	301,15		1473,15	923,15
v [m^3.kg^-1]	0,72			2,208

Jelikož v bodě 2 zatím nemáme dopočítané žádné hodnoty, je dobré pokračovat ve výpočtu bodem, kde máme aspoň jednu veličinu, tedy bodem 3. V bodě 3 známe teplotu, tedy můžeme určit poměr teplot. Když je známý poměr teplot mezi začátkem a koncem děje a známe alespoň jednu hodnotu na konci nebo začátku děje, můžeme zbývající veličiny dopočítat.
Víme, že mezi body 3 a 4 je adiabata a známe poměr teplot. Z úvah o adiabatickém ději (*viz. poznámky k cvičením z termomechaniky – Cvičení 4. – rovnice (6) a (7)*). Můžeme pro tlak v bodě v 3 napsat:

$$\frac{T_3}{T_4} = \left(\frac{p_3}{p_4}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \rightarrow \left(\frac{T_3}{T_4}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} = \frac{p_3}{p_4}$$

$$p_3 = p_4 . \left(\frac{T_3}{T_4}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} = 0{,}12 \, . \, 10^6 \left(\frac{1473{,}15}{923{,}15}\right)^{\frac{1{,}4}{1{,}4-1}} = 616017 \; [Pa]$$

Obdobně můžeme dopočítat i měrný objem v bodě 3:

$$\frac{T_3}{T_4} = \left(\frac{v_3}{v_4}\right)^{1-\kappa} \rightarrow \left(\frac{T_3}{T_4}\right)^{\frac{1}{1-\kappa}} = \frac{v_3}{v_4}$$

$$v_3 = v_4.\left(\frac{T_3}{T_4}\right)^{\frac{1}{1-\kappa}} = 2{,}208.\left(\frac{1473{,}15}{923{,}15}\right)^{\frac{1}{1-\kappa}} = 0{,}686\ [m^3.kg^{-1}]$$

Nebo můžeme využít pro výpočet měrného objemu stavovou rovnici:

$$p_3.v_3 = r.T_3$$

$$v_3 = \frac{r.T_3}{p_3} = \frac{287{,}04\ .\ 1473{,}15}{616017} = 0{,}686\ [m^3.kg^{-1}]$$

V případě, že bychom jsme přes rovnici adiabaty nejprve vyjádřili měrný objem, tak můžeme tlak vyjádřit přes stavovou rovnici:

$$p_3.v_3 = r.T_3$$

$$p_3 = \frac{r.T_3}{v_3} = \frac{287{,}04\ .\ 1473{,}15}{0{,}686} = 616404\ \ [Pa]$$

<u>Přesný postup není dán. Můžete si vybrat jakýkoli způsob. Jak je vidět, výsledky se shodují úplně, nebo jsou odchylky minimální. Odchylky jsou dány zaokrouhlováním a jsou zanedbatelné.</u>

Před doplněním do tabulky se můžeme kouknout na graf a z něho je patrné, že tlak v bodě 2 je stejný jako v bodě 3, tedy není zapotřebí ho počítat. Platí tedy:

$$p_3 = p_2 = 616017\ \ [Pa]$$

Tabulku tedy můžeme doplnit o další hodnoty:

	1	2	3	4
p [Pa]	$0{,}12.10^6$	616017	616017	$0{,}12.10^6$
T [K]	301,15		1473,15	923,15
v [$m^3.kg^{-1}$]	0,72		0,686	2,207

V bodě 2 již máme hodnotu tlaku. To nám umožňuje určit tlakový poměr mezi body 1 a 2. Když je známý poměr tlaků mezi začátkem a koncem děje a známe alespoň jednu hodnotu na konci nebo začátku děje, můžeme zbývající veličiny dopočítat.
Víme, že mezi body 1 a 2 je adiabata a známe poměr teplot. Z úvah o adiabatickém ději (*viz. poznámky k cvičením z termomechaniky – Cvičení 4. – rovnice (6) a (7)*). Můžeme pro teplotu v bodě v 2 napsat:

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

$$T_2 = T_1.\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = 301{,}15\ .\left(\frac{616017}{0{,}12\ .\ 10^6}\right)^{\frac{1{,}4-1}{1{,}4}} = 480{,}6\ [K]$$

Obdobně můžeme dopočítat i měrný objem v bodě 2:

$$\frac{v_2}{v_1} = \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{1}{\kappa}}$$

$$v_2 = v_1.\left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{1}{\kappa}} = 0{,}72.\left(\frac{0{,}12\ .\ 10^6}{616017}\right)^{\frac{1}{1{,}4}} = 0{,}224\ [m^3.kg^{-1}]$$

Nebo můžeme využít pro výpočet měrného objemu výpočet přes stavovou rovnici:

$$p_2 . v_2 = r . T_2$$

$$v_2 = \frac{r . T_2}{p_2} = \frac{287{,}04 \,.\, 480{,}6}{616017} = 0{,}224 \; [m^3 . kg^{-1}]$$

V případě, kdybychom jsme přes rovnici adiabaty nejprve vyjádřili měrný objem, tak můžeme teplotu vyjádřit přes stavovou rovnici:

$$p_2 . v_2 = r . T_2$$

$$T_2 = \frac{p_2 . v_2}{r} = \frac{616017 \,.\, 0{,}224}{287{,}04} = 480{,}7 \; [K]$$

<u>Přesný postup není dán. Můžete si vybrat jakýkoli způsob. Jak je vidět výsledky se shodují úplně, nebo jsou odchylky minimální. Odchylky jsou dány zaokrouhlováním a jsou zanedbatelné.</u>

Tabulku tedy můžeme doplnit do finální podoby:

	1	2	3	4
p [Pa]	$0{,}12.10^6$	616017	616017	$0{,}12.10^6$
T [K]	301,15	480,6	1473,15	923,15
v [$m^3.kg^{-1}$]	0,72	0,224	0,686	2,207

Dalším bodem zadání je „*vypočítejte objem nasávaný kompresorem za jednotku času*“. Ze zadání už víme, že kompresor nasává *0,05 [kg.s^{-1}]* vzduchu. Máme tedy hmotnostní tok vzduchu. Součin hmotnostního toku a měrného objemu tedy dostaneme objem nasávaný za jednotku čas:

$$\dot{V} = \dot{m} . v_1 = 0{,}05 \,.\, 0{,}72 = 0{,}036 \; [m^3 . s^{-1}]$$

Dalším bodem zadání je „*vyřešte měrné přivedené teplo, měrné odvedené teplo, měrnou práci cyklu*“. Opět se objevuje v zadání, že se má vypočítat měrné teplo. Tedy budeme pracovat jenom s měrnými jednotkami. Na začátku jsme si už uvedli, že teplo se přivádí mezi body 2 a 3. Z předchozího víme *(viz http://home.zcu.cz/~gaspar/cv/CV_TM_06_02.pdf - část přivedené teplo při izobarické změně)*, že velikost přivedeného tepla při konstantním tlaku se dá vyjádřit jednoduše:

$$q_p = c_p . (T_3 - T_2) = \frac{\kappa . r}{\kappa - 1} . (T_3 - T_2) = \frac{1{,}4 \,.\, 287{,}04}{1{,}4 - 1} \,.\, (1473{,}15 - 480{,}6) = 997155{,}432 \;\; [J . kg^{-1}]$$

Dále bylo řečeno, že teplo se odvádí mezi body 4 a 1. Z předchozího víme, že velikost odvedeného tepla při konstantním tlaku se dá vyjádřit jednoduše:

$$q_o = c_p . (T_1 - T_4) = \frac{\kappa . r}{\kappa - 1} . (T_1 - T_4) = \frac{1{,}4 \,.\, 287{,}04}{1{,}4 - 1} \,.\, (301{,}15 - 923{,}15) = -624886{,}08 \;\; [J . kg^{-1}]$$

Znaménko mínus udává, že se teplo odvádí, velikost odvedeného tepla je tedy absolutní hodnota hodnoty q_o:

$$|q_o| = 624886{,}08 \; [J . kg^{-1}]$$

Práci cyklu můžeme definovat jako rozdíl přivedeného a odvedeného tepla:

$$a_c = q_p - |q_o| = 997155{,}432 - 624886{,}08 \; = 372269{,}352 \; [J . kg^{-1}]$$

Posledním bodem zadání je *„vypočítejte tepelnou účinnost cyklu a výkon turbíny (tj. výkon soustrojí)“*. Při výpočtu tepelné účinnosti se můžeme opřít o již známou rovnici:

$$\eta_t = \frac{a_c}{q_p}$$

V čitateli se nachází práce cyklu. Jak jsme si ukázali dříve *(viz http://home.zcu.cz/~gaspar/cv/CV_TM_06_02.pdf – část výpočet práce cyklu)*, tak je možné práci vypočítat cyklu několika způsoby. Nejjednodušší způsob se v tomto případě opět jeví vypočítat práci cyklu jako rozdíl přivedeného a odvedeného tepla tedy: $a_c = q_p - |q_o|$. Rovnice pro účinnost cyklu tedy nabyde tvaru:

$$\eta_t = \frac{q_p - |q_o|}{q_p} = 1 - \frac{|q_o|}{q_p} = 1 - \frac{624886{,}08}{997155{,}432} = 0{,}37\ [-] = 37\ [\%]$$

Při výpočtu posledního bodu je nutné si dát pozor. Jedná se o výpočet výkonu, ale je dotázán výkon turbíny a ne celého cyklu. Samozřejmě při výpočtu výkonu se můžeme opřít o klasickou rovnici pro výkon:

$$P = \dot{m}.a$$

Pozor ale na to, že tomto případě nepočítáte práci cyklu, tedy následující úvaha je **ŠPATNÁ** !!!!

$$P = \dot{m}.a_c$$

Místo práce cyklu a_c je nutno dopočítat velikost práce turbíny a_{tT}. Tu můžeme dle už předchozích znalostí jednoduše odvodit (*viz. poznámky k cvičením z termomechaniky – Cvičení 4. – Adiabatická změna, rovnice (3)*). Očekává se kladná hodnota, jelikož se na turbíně práce generuje:

$$a_{tT} = -\frac{\kappa.r}{\kappa - 1}(T_4 - T_3) = -\frac{1{,}4\,.\,287{,}04}{1{,}4 - 1}(923{,}15 - 1473{,}15) = 552552\ [J.kg^{-1}]$$

Z toho plyne, že výkon turbíny je:

$$P_T = \dot{m}.a_{tT} = 0{,}05\,.\,552552 = 27627{,}6\ [W]$$

Příklad 2

Plynová turbína pracuje na principu Brayton-Ericsonova cyklu. Stupeň zvýšení tlaku v kompresoru je 7. Kompresor nasává vzduch o teplotě 15 °C. Teplota za spalovací komorou je 1000 °C. Stanovte měrnou práci a tepelnou účinnost oběhu při použití ideálního rekuperačního výměníku a bez něj.

Dáno:

$\pi = \frac{p_2}{p_1} = 7; T_1 = 15\,[°C] = 288{,}15\,[K]; T_3 = 1000[°C] = 1273{,}15\,[K]; r = 287{,}04\,[J.kg^{-1}.K^{-1}]; \kappa = 1{,}4$

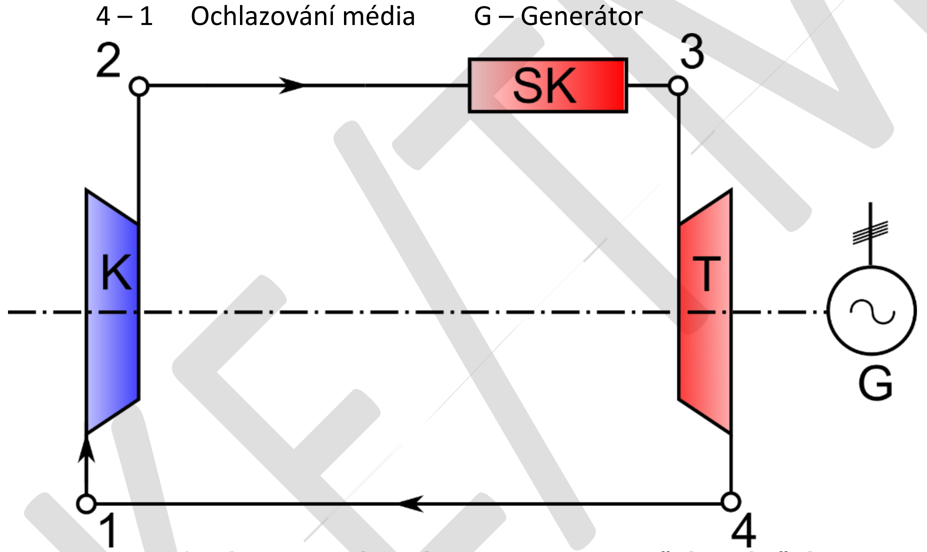
Úloha se skládá ze dvou částí. V první části máme počítat plynovou turbínu bez rekuperačního výměníku a v druhé části plynovou turbínu s rekuperačním výměníkem.

Před samotním výpočtem je nutné mít na paměti již zmíněná fakta, že uvažujeme vratný děj s pracovní látkou, která je ideální plyn.

Začneme teda s příkladem bez rekuperačního výměníku. Před výpočtem si ukážeme, z jakých částí se cyklus plynové turbíny bez rekuperačního výměníku skládá:

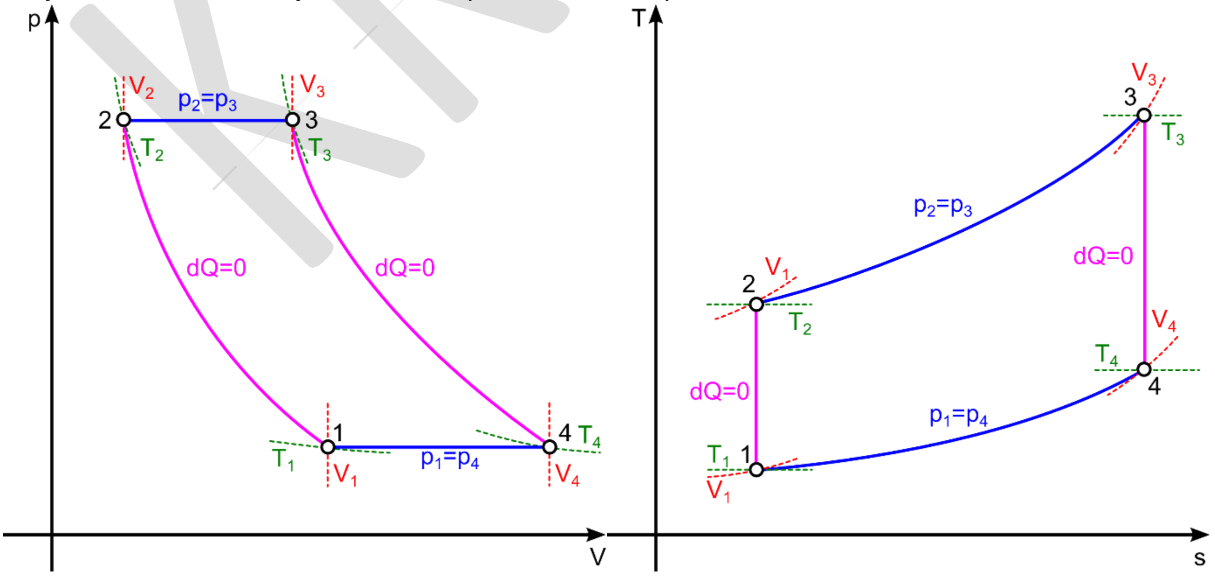
1 – 2 Kompresor 2 – 3 Spalovací komora

3 – 4 Turbína 4 – 1 Ochlazování média G – Generátor



Obr. 2 Schéma plynové turbíny bez bez rekuperačního výměníku

Jak je uvedeno v zadání, jedná se o Brayton-Ericsonův cyklus:



Obr. 3 p-V (vlevo) a T-s (vpravo) diagram Brayton-Ericsonova cyklu bez rekuperačního výměníku

Ze zadání plyne, že se má vypočítat měrná práce cyklu a tepelná účinnost. V předchozích úlohách jsme již postup ukázali, proto se pustíme rovnou do výpočtu.

Udělejme si tedy seznam rovnic, které musíme vypočítat. Začněme od konce…
Pro výpočet účinnosti použijeme již známou rovnici:

$$\eta_t = \frac{a_c}{q_p}$$

Do ní potřebujeme dosadit měrnou práci cyklu, která je daná rozdílem velikosti přivedeného a odvedeného tepla:

$$a_c = q_p - |q_o|$$

Velikost přivedeného tepla po zjednodušení z prvního zákona termodynamiky (viz předchozí příklady) dostaneme z rovnice:

$$q_p = c_p.(T_3 - T_2) = \frac{\kappa.r}{\kappa - 1}.(T_3 - T_2)$$

Velikost odvedeného tepla po zjednodušení z prvního zákona termodynamiky (viz předchozí příklady) dostaneme z rovnice:

$$q_o = c_p.(T_1 - T_4) = \frac{\kappa.r}{\kappa - 1}.(T_1 - T_4)$$

Po spojení jednotlivých rovnic dostaneme finální verzi rovnice pro účinnost:

$$\eta_t = \frac{a_c}{q_p} = \frac{q_p - |q_o|}{q_p} = 1 - \frac{|q_o|}{q_p} = 1 - \frac{|c_p(T_1 - T_4)|}{c_p(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{\left|\frac{\kappa.r}{\kappa - 1}(T_1 - T_4)\right|}{\frac{\kappa.r}{\kappa - 1}(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{|(T_1 - T_4)|}{(T_3 - T_2)}$$

Z rovnice plyne, že nám chybí hodnoty teplot v bodech T_2 a T_4. Známe ale hodnoty teplot v bodech T_1 a T_3 a známe také hodnoty tlakového spádu v kompresoru π.

Teplotu v bodě T_2 můžeme tedy jednoduše odvodit z rovnice adiabaty:

$$T_2 = T_1\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = T_1(\pi)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = 288{,}15.(7)^{\frac{1{,}4-1}{1{,}4}} = 502{,}43\ [K]$$

Z grafu je jasné, že poměr tlaků mezi body 2 a 1 je stejný jako mezi body 3 a 4. Teplotu v bodě T_4 můžeme taky odvodit z rovnice adiabaty:

$$\frac{T_3}{T_4} = \left(\frac{p_3}{p_4}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = (\pi)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}$$

$$T_4 = T_3\left(\frac{p_4}{p_3}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = T_3\left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = T_3\left(\frac{1}{\pi}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = 1273{,}15.\left(\frac{1}{7}\right)^{\frac{1{,}4-1}{1{,}4}} = 730{,}17\ [K]$$

Máme tedy všechny hodnoty potřebné k výpočtu.

Měrná práce cyklu bude rovna:

$$a_c = q_p - |q_o| = \frac{\kappa.r}{\kappa - 1}.(T_3 - T_2) - \left|\frac{\kappa.r}{\kappa - 1}.(T_1 - T_4)\right| =$$

$$= \frac{1{,}4\,.\,287{,}04}{1{,}4-1}.\,(1273{,}15-502{,}4) - \left|\frac{1{,}4\,.\,287{,}04}{1{,}4-1}.\,(288{,}15-730{,}17)\right| = 330255{,}31\ [J.kg^{-1}]$$

Účinnost cyklu bude:

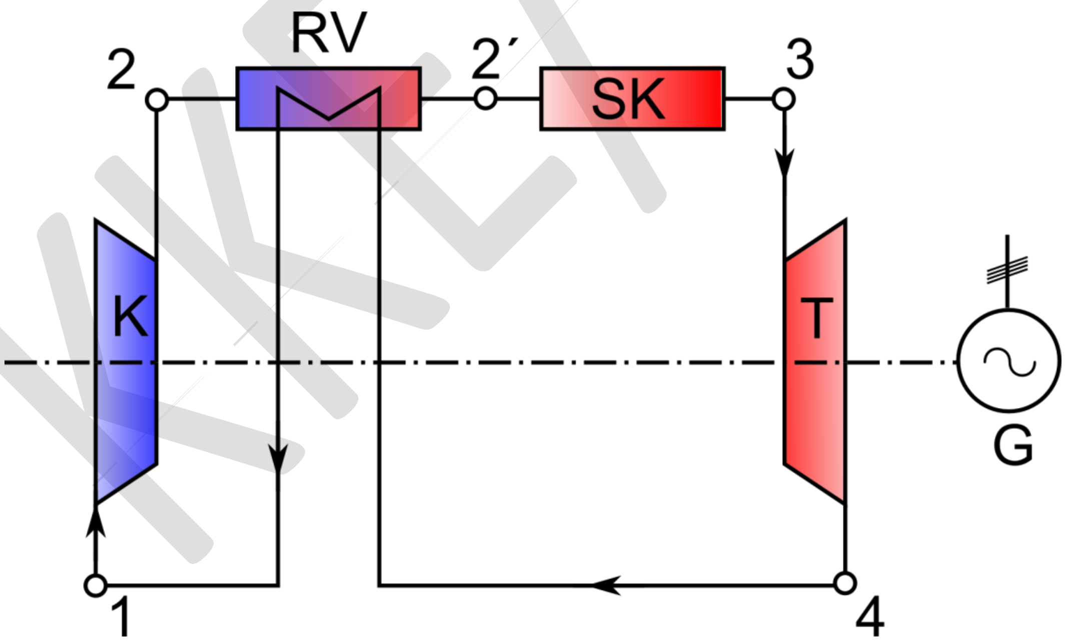
$$\eta_t = \frac{a_c}{q_p} = \frac{a_c}{\frac{\kappa.r}{\kappa-1}.(T_3-T_2)} = \frac{330255{,}31}{\frac{1{,}4\,.\,287{,}04}{1{,}4-1}.\,(1273{,}15-502{,}43)} = 0{,}427\ [-] = 42{,}7\ [\%]$$

Účinnost cyklu je tedy bez rekuperačního výměníku 42,7 [%]. Z rovnice pro účinnost plyne, že abychom mohli zvýšit účinnost cyklu, musíme snížit velikost přivedeného tepla. Což je v praxi mnohokrát obtížné. Všimněme si ale jedné skutečnosti z předchozího výpočtu. Teplota T_2 je nižší než teplota T_4. Jak se to dá využít?
Shrňme si některé fakty:

- Teplo mezi body *2* a *3* se přivádí z okolí a mezi *4* a *1* odvádí do okolí
- Platí, že teplo může přestupovat s míst vyšší teplotou na místa s nižší teplotou
- Z předchozího výpočtu je vidět, že teplota T_2 je nižší než teplota T_4
- Teplo z bodu 4 tedy může přestupovat směrem k bodu 2

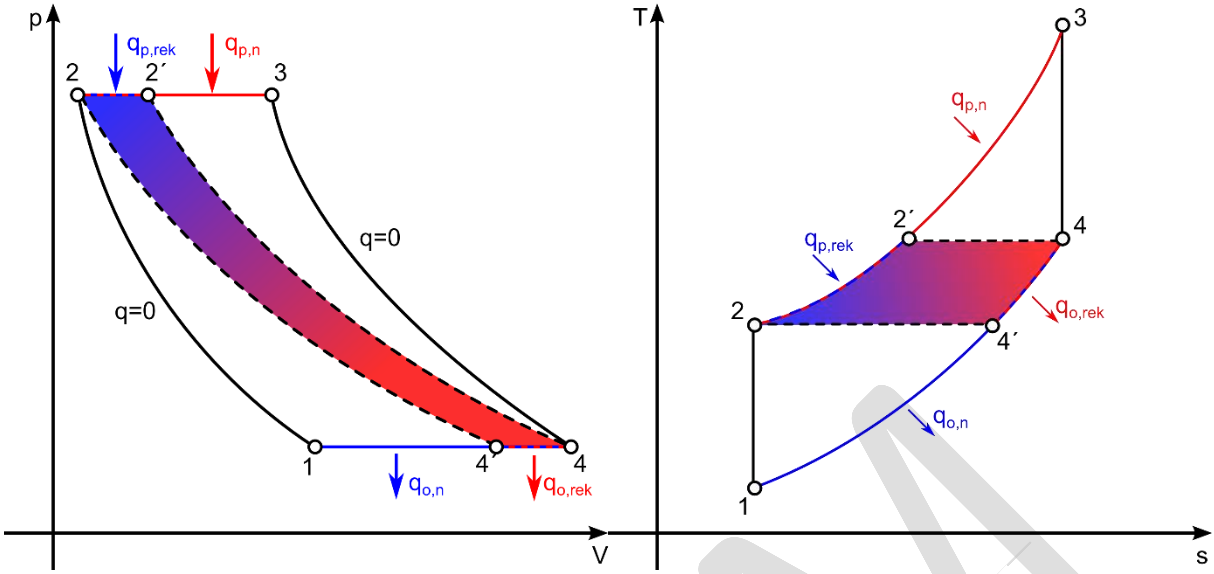
Využitím rekuperačního výměníku (tepelného výměníku), je možné zmíněného přestupu tepla mezi body 4 a 2 lehce dosáhnou. Ukažme si, jak schéma takového systému vypadá:

1 – 2	Kompresor	2 – 2´	Rekuperační výměník	2 – 3	Spalovací komora
3 – 4	Turbína	4 – 1	Ochlazování média	G – Generátor	



Obr. 4 Schéma plynové turbíny s rekuperačním výměníkem

Jak je uvedeno v zadání, jedná se o Brayton-Ericsonův cyklus. V tomto případě si ho ale zobrazíme trochu jinak. Půjde hlavně o procesy, které souvisí s přívodem a odvodem tepla a proto upustíme od klasických barev křivek. Křivky nebo přímky, které prochází body, kde se teplo přivádí, budou značeny červeně a křivky nebo přímky, které prochází body, kde se teplo odvádí, budou značeny modrou barvou. Brayton-Ericsonův cyklus tedy bude vypadat následovně:



Obr. 5 p-V (vlevo) a T-s (vpravo) diagram Brayton-Ericsonova cyklu s rekuperačním výměníkem

Jak je ze schématu vidět, teoreticky (to znamená beze ztrát) by bylo možné přenést teplotní spád mezi teplotami T_4 a T_2. Tedy část tepla, které by se odvádělo normálně do okolí přečerpat do místa, kde by se normálně přivádělo z okolí. Jak by tato úvaha vypadala matematicky?

Velikost odvedeného tepla do okolí bez rekuperačního výměníku spočítá:

$$q_o = \left|\frac{\kappa . r}{\kappa - 1} . (T_1 - T_4)\right|$$

Jak je vidět, teplotní spád mezi body 1 a 4 se kompletně odvádí do okolí. Teoreticky můžeme teplotní spád mezi 4 a 4´využít. Velikost tohoto teplotního spádu (označíme indexem „rek“), se vypočítá následovně:

$$|q_{o,rek}| = \left|\frac{\kappa . r}{\kappa - 1} . (T_4' - T_4)\right|$$

Jelikož víme, že body 4´ a 2 leží na stejné izotermě, tak můžeme napsat…

$$|q_{o,rek}| = \left|\frac{\kappa . r}{\kappa - 1} . (T_2 - T_4)\right| = \left|\frac{1{,}4 \,.\, 287{,}04}{1{,}4 - 1} . (502{,}41 - 730{,}17)\right| = 228796{,}71 \; [J.kg^{-1}]$$

Toto teplo můžeme za pomoci rekuperačního výměníku přivést mezi body 2 a 3 (viz obr. 5). Přičemž bude platit, že se teplo přivádí beze ztrát, tedy:

$$q_{p,rek} = |q_{o,rek}|$$

Tyto hodnoty nazýváme „rekuperační teplo“.
Jaký to má dopad?
Původně jsme museli mezi body 2 a 3 přivádět teplo z okolí. Množství tohoto tepla bylo vyčísleno následovně:

$$q_p = \frac{\kappa . r}{\kappa - 1} . (T_3 - T_2) = \frac{1{,}4 \,.\, 287{,}04}{1{,}4 - 1} . (1273{,}15 - 502{,}43) = 774296{,}14 \; [J.kg^{-1}]$$

Jelikož ale využijeme teplo, které by se mělo odvádět do okolí a přivedeme ho mezi body 2 a 3, tak nám klesne množství tepla, které musíme přivést z okolí. Tedy po rekuperaci (index „n“) musíme z okolí přivést pouze teplo $q_{p,n}$, tj. mezi body 2´ a 3:

$$q_{p,n} = q_p - q_{p,rek} = 774296{,}14 - 228796{,}71 = 545499{,}43\ [J.kg^{-1}]$$

Původně jsme mezi body 4 a 1 odváděli teplo do okolí. Množství tohoto tepla bylo vyčísleno následovně:

$$|q_o| = \left|\frac{\kappa.r}{\kappa-1}.(T_1 - T_4)\right| = \left|\frac{1{,}4\ .\ 287{,}04}{1{,}4-1}.(288{,}15 - 730{,}17)\right| = 444070{,}97\ \ [J.kg^{-1}]$$

Část odvedeného tepla ($q_{o,rek}$) byla zpět přivedena do cyklu ($q_{p,rek}$), tak množství tepla, které se odvede do okolí, bude nižší. Po rekuperaci (index „n“) do okolí pouze odvedeme:

$$|q_{o,n}| = \left|\frac{\kappa.r}{\kappa-1}.(T_1 - T_4{}')\right| = \left|\frac{\kappa.r}{\kappa-1}.(T_1 - T_2)\right| = \left|\frac{1{,}4\ .\ 287{,}04}{1{,}4-1}.(288{,}15 - 502{,}43)\right| =$$
$$= 215274{,}26\ \ [J.kg^{-1}]$$

Plocha grafu oproti grafu bez rekuperačního výměníku se nezměnila, tedy se předpokládá, že ani práce cyklu se nezměnila. S novými parametry odvedeného a přivedeného tepla, bude práce cyklu:

$$a_{c,n} = q_{p,n} - |q_{o,n}| = 545499{,}43 - 215274{,}26 = 330224{,}74\ [J.kg^{-1}]$$

Výsledky při výpočtu jsou stejné, tedy práce cyklu zůstala beze změn.

Všimněme si, jaký dopad měla rekuperace na účinnost. Práce cyklu zůstala neměnná, ale z okolí musíme přivádět méně tepla, tedy účinnost se zvýší:

$$\eta_{t,n} = \frac{a_{c,n}}{q_{p,n}} = \frac{330224{,}74}{545499{,}43} = 0{,}605\ [-] = 60{,}5\ [\%]$$