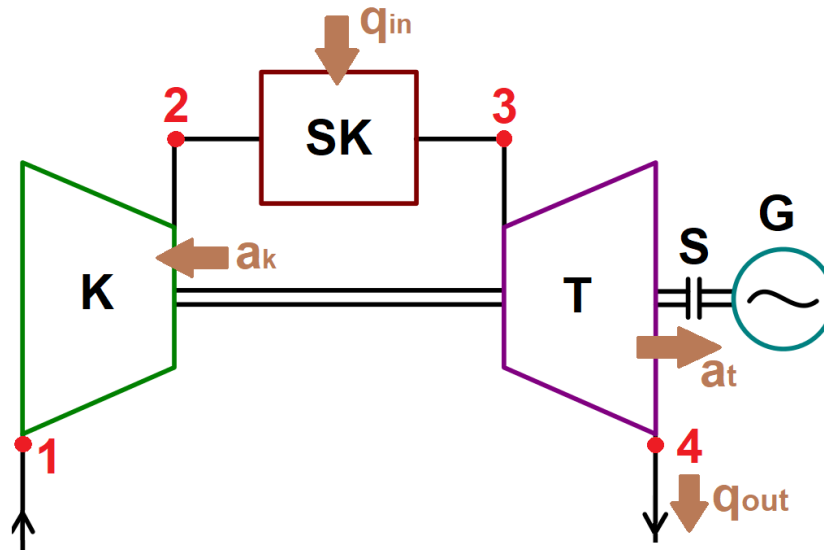




Braytonův cyklus – odvození účinnosti

Braytonův cyklus je porovnávací tepelný oběh, pomocí kterého je popsána funkce plynových a spalovacích turbín. Plynové a spalovací turbíny běžně slouží pro pohon lodí, letadel či elektrárenských generátorů za účelem výroby elektrické energie. Pomocí následující příkladu je obecně odvozena termická účinnost Braytonova cyklu, který je využit v elektrárně spalující zemní plyn. Protože spalování plynu v těchto elektrárnách probíhá za konstantního tlaku, některé literární prameny Braytonův cyklus označují také jako rovnotlaký cyklus.



Uvedené technologické schéma zobrazuje základní komponenty plynové elektrárny. Kompresor (K) přes vstupní filtr nasává atmosférický vzduch, který má později sloužit jako vzduch spalovací. Již samotné parametry atmosférického vzduchu (tlak, teplota a vlhkost) ovlivňují termickou účinnost cyklu, a proto plynové elektrárny dosahují typicky vyšší účinnost v zimě. Kompresor stlačuje vzduch na požadovaný tlak, čímž vytváří kompresní poměr, jehož hodnota přímo ovlivňuje účinnost.

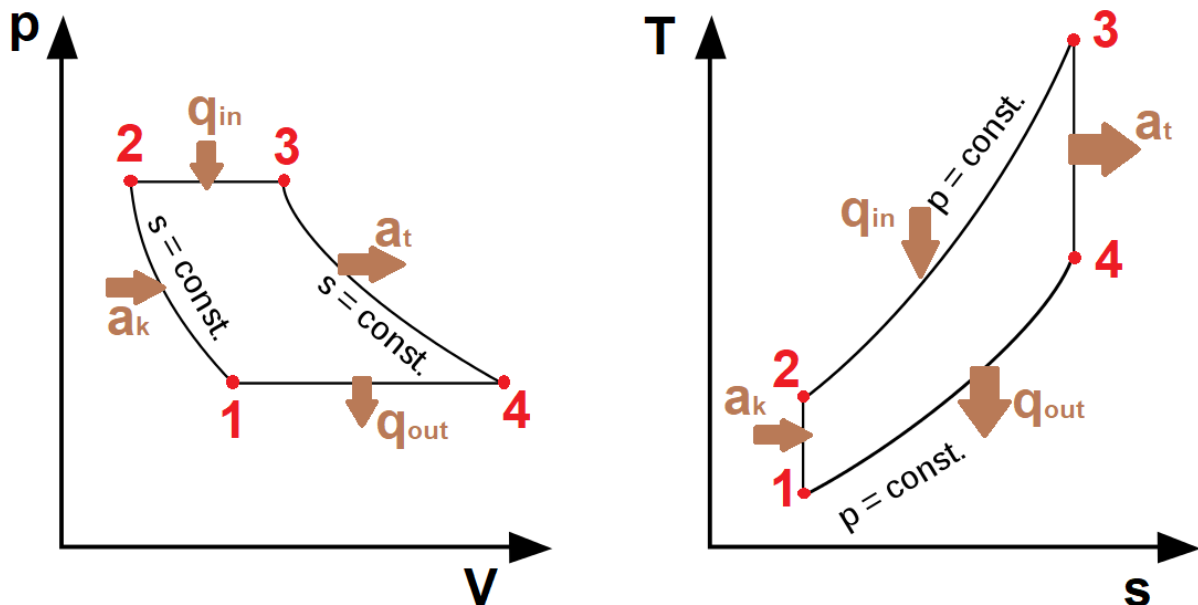
Spalovací vzduch o vysokém tlaku míří dále do spalovací komory (SK), kde je smíchán s palivem, čímž vzniká palivová směs, která se zapálí a vyhoří při konstantním tlaku. Vyhořením vznikají velmi horké spaliny, které o vysokém tlaku dále míří do turbíny, kde expandují. V případě plynových elektráren bývá palivem zemní plyn, nicméně možná jsou i další plynná a kapalná paliva jako například letecký benzín. Ve spalovací komoře dochází k dodávání vstupní energie – dodaného tepla q_{in} , které je charakterizované průtokem paliva a jeho výhřevností.

Na turbíně (T) expandují horké spaliny, čímž vzniká krouticí moment na hřídeli, a tedy mechanická práce. Turbína (T) a kompresor (K) pracují většinou na společné hřídeli, tudíž je část získané mechanické práce ihned použita pro pohon kompresoru (kompresní práce a_k). Užitečná technická práce a_t se přes spojku (S) přenáší na generátor (G), který mechanický pohyb přemění na elektrickou energii. Spojka slouží jako rozpojovací prvek zejména při najíždění a odstavování elektrárny, neboť generátor je do sítě



možné přifázovat až po njetí turbíny na plný výkon. Expandované spaliny z turbíny pak v případě otevřeného cyklu míří tradičně do komína. Spaliny na výstupu z turbíny bývají stále značně horké. Vypuštěním těchto spalin je tedy odváděno odvedené teplo q_{out} do okolí. S ohledem na teplotu těchto spalin (400–500 °C) nicméně bývá z důvodu energetické účinnosti výhodné použít citelné teplo spalin pro regeneraci nebo pro realizaci paroplynového oběhu.

Pro stanovení termické účinnosti je nicméně klíčové popsání záležitosti zobrazit pomocí termodynamických změn ve stavových diagramech p-V a T-s.



Jedná se o porovnávací cyklus, a to znamená, že jsou v diagramech zobrazené ideální vratné termodynamické procesy. Ve skutečnosti je nutné zohlednit 2. termodynamický zákon, který popisuje nevratnost termodynamických procesů, které zpravidla probíhají při změně entropie s . Popis dílčích termodynamických změn:

- **1–2:** Adiabatická (izoentropická) komprese, při které je do termodynamické soustavy dodávána kompresní práce a_k .
- **2–3:** Izobarický ohřev, během kterého se do termodynamické soustavy dodává teplo q_{in} .
- **3–4:** Adiabatická (izoentropická) expanze, během které termodynamická soustava koná práci a_t .
- **4–1:** Izobarický odvod tepla, během kterého okolí termodynamické soustavy přijímá teplo q_{out} .

Z výše uvedeného je patrné, že se Braytonův cyklus skládá ze dvou dějů adiabatických a dvou dějů izobarických. Při adiabatickém ději nedochází k tepelné výměně, jelikož je termodynamická soustava od okolí dokonale tepelně izolovaná – žádné teplo se nepřivádí ani neodvádí. Diferenciál entropie je při vratném adiabatickém ději nulový (nulovost integrálu dějů 1-2 a 3-4), tudíž lze vratný adiabatický děj označit za zároveň izoentropický. Pro ohřev při konstantním tlaku lze z analýzy 1. termodynamického zákona stanovit, že dodané teplo se z části využije na zvýšení vnitřní energie a z



části k vykonání práce. Z toho vyplývá, že ohřát látku o jeden teplotní stupeň je při izobarickém ohřevu obtížnější než při ději izochorickém, při kterém se veškeré dodané teplo přemění na vnitřní energii, protože se práce nekoná ($V = konst.$). Pro oba typy ohřevů lze pomocí analýzy 1. termodynamického zákona stanovit tepelnou kapacitu při konstantním tlaku c_p a tepelnou kapacitu při konstantním objemu c_v . Z výše uvedeného musí platit, že je hodnota c_p větší než hodnota c_v .

Účinnost lze obecně definovat jako podíl výkonu – získané energie a příkonu – dodané energie. V případě tepelného oběhu je výkonem rozdíl přivedeného a odvedeného tepla, který se přemění na užitečnou práci. Příkonem je pak dodané teplo:

$$\eta = \frac{a}{q_{in}} = \frac{q_{in} - q_{out}}{q_{in}}$$

Pro vyjádření dodaného a odvedeného tepla je potřeba vyjít z 1. termodynamického zákona, který dává do souvislosti 3 veličiny – teplo, vnitřní energii a objemovou práci:

$$dQ = dU + dA_o$$

Uvedený zápis představuje první formu zápisu, která nepostačuje pro uvedený příklad, neboť je plyn v uzavřeném objemu a práce, kterou plyn vykoná je důsledkem změny tlaku plynu proudícího strojem, respektive uvažovaným kontrolním objemem, který se nemění. Z objemové práce je tedy nutné přejít k technické práci. První formu zápisu je nejprve vhodné rozepsat pomocí měrných veličin, přičemž změna vnitřní energie je dána pouze změnou teploty a tepelnou kapacitou při konstantním objemu c_v :

$$dq = c_v \cdot dT + p \cdot dv$$

Pro získání technické práce na místo objemové je potřeba vyjít ze stavové rovnice ve tvaru, kde r je specifická plynová konstanta:

$$p \cdot v = r \cdot T$$

Následuje derivování celé rovnice. Na levé straně je derivován součin a na pravé pouze teplota, neboť r je konstanta.

$$dp \cdot v + p \cdot dv = r \cdot dT$$

$$p \cdot dv = r \cdot dT - v \cdot dp$$

Součin $p \cdot dv$ je nyní možné dosadit do první formy zápisu s měrnými veličinami:

$$dq = c_v \cdot dT + r \cdot dT - v \cdot dp$$

$$dq = (c_v + r) \cdot dT - v \cdot dp$$



S využitím Mayerova vztahu je nyní možné přepsat výraz v závorce na měrnou tepelnou kapacitu při konstantním tlaku:

$$dq = c_p \cdot dT - v \cdot dp$$

Tím se získává druhá forma zápisu 1. zákona termodynamiky, který dává do souvislosti teplo, entalpii a technickou práci:

$$dq = dh + da_t$$

S využitím tohoto zápisu je nyní možné zanalyzovat v T-s diagramu děje, během kterých je dodáváno, respektive odebíráno teplo (děj 2-3 a 4-1). Tyto děje jsou izobarické, tedy probíhají při konstantním tlaku, a proto se technická práce během těchto dějů nekoná. Závěrem je tedy možné prohlásit, že dodané a odvedené teplo je možné vyjádřit pouze pomocí entalpií v příslušných bodech:

$$\eta = \frac{a}{q_{in}} = \frac{q_{in} - q_{out}}{q_{in}} = \frac{(h_3 - h_2) - (h_4 - h_1)}{(h_3 - h_2)} = 1 - \frac{h_4 - h_1}{h_3 - h_2}$$

Pro stanovení účinnosti je možné rovněž využít zmíněný kompresní poměr, což je podíl tlaků, mezi kterými cyklus pracuje, tedy podíl tlaků v bodě 2 a 1:

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

Účinnost pomocí kompresního poměru:

$$\eta = 1 - (\varepsilon_k)^{\frac{1-\kappa}{\kappa}}$$

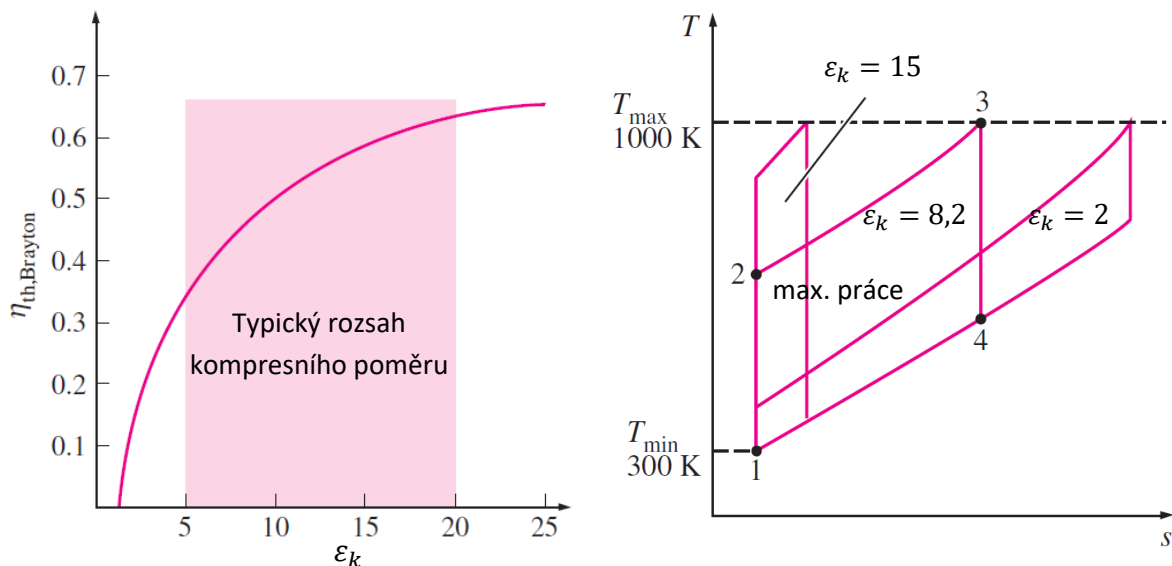
Kde κ je Poissonova konstanta:

$$\kappa = \frac{c_p}{c_v} \quad \wedge \quad c_p > c_v \quad \Rightarrow \quad \kappa > 1$$

Stanovit optimální kompresní poměr je možné pomocí teplot, mezi kterými má cyklus pracovat:

$$\varepsilon_k = \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} = \left(\frac{T_3}{T_1} \right)^{\frac{\kappa}{2 \cdot (\kappa-1)}}$$

Je patrné, že termická účinnost Braytonova cyklu je funkcí kompresního poměru, respektive podílu teplot T_3/T_1 a konstanty κ . Maximální tlakový poměr je tedy prakticky omezen materiálovými limity plynové turbíny z hlediska maximálního tepelného zatížení. Běžné hodnoty kompresního poměru se pohybují cca 11–16. Účinnost oběhu se zvyšuje s rostoucím kompresním poměrem, nicméně od jisté hodnoty kompresního poměru dojde k nasycení křivky a později k poklesu účinnosti.



Zvyšovat účinnost Braytonova oběhu je možné zejména zvýšením teploty spalin před turbínou (T_3). Takový přístup s sebou nese rostoucí nároky na konstrukci turbíny a na materiály, kterou jsou použité. Postupný vývoj nových materiálů umožnil dosažení teplot kolem $1400 \text{ }^\circ\text{C}$. S pokračujícím rozvojem nových materiálů lze očekávat i nadále snahu dosahovat vyšších teplot na vstupu do turbíny. Za perspektivní materiály se v současné době dají označit slitiny na bázi molybdenu (bod tání $2617 \text{ }^\circ\text{C}$) s částicemi silicidu. Tyto slitiny mají velmi dobré vlastnosti při vysokých teplotách, avšak paradoxně křehnou při nízkých teplotách. Další alternativu představuje například niob nebo rhenium s podobnými vlastnostmi vůči molybdenu. Za zmínku stojí také materiály na bázi keramiky jako je například karbid křemíků, jenž je už v současnosti používán pro turbinové části, které nepodléhají velkému mechanickému namáhání (například dýzy a kryty). Ve vývoji se nachází také další materiál na bázi keramiky – eutektický oxid.

Kromě vývoje materiálů se bere zřetel rovněž na kompresor, který v praxi spotřebovává až 50 % mechanické práce vyrobené turbínou. Spotřeba kompresoru a jeho účinnost je tedy důležitým parametrem, pokud jde o plynové oběhy. V současné době, kdy jsou v globálním měřítku nasazovány zdroje s nestabilním profilem výroby (solární a větrné zdroje), jsou stále více rozvíjeny technologie akumulace. Pokud je na hřídeli mezi kompresorem a turbínou umístěna další spojka, pak může být Braytonův cyklus využit pro uskladnění energie (CAES systémy). V době nízké poptávky, například v noci, turbína pohání pouze kompresor vyrábějící stlačený vzduch, který je vháněn do přírodních nebo umělých zásobníků. V době zvýšené poptávky se tento vzduch použije pro pohon turbíny, čímž dojde ke snížení kompresní práce (kompresor je přes spojku odpojen) a tedy ke zvýšení účinnosti systému. Nevýhoda spočívá v tom, že se kompresí vzduch ohřeje a během následného skladování stlačeného vzduchu dochází velmi rychle k tepelným ztrátám. Z tohoto důvodu se vyvíjí systémy, které využívají



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



rovněž úložiště tepelné energie, aby se teplo neztrácelo, a naopak bylo použito pro ohřev vzduchu před turbínou, či spalovací komorou.

Je-li uvažován paroplynový oběh, plynová část je hlavní oblast zájmu, pokud jde o zvyšování účinnosti. Účinnost parního oběhu je přímo ovlivněna parametry plynového oběhu, který určuje množství zbytkového tepla pro parní oběh. Nejmodernější oběhy s vodní parou již prakticky dosáhly svých termodynamických limitů, nicméně určitý prostor spočívá ve spalinových výměnících, jejichž ztráta v praxi dosahuje více než 10 %. Pokud by se v parním oběhu použila jiná pracovní látka (například Kalinův cyklus nebo ORC), pak by se mohl snížit teplotní spád mezi spaliny a pracovní látkou parního oběhu.

Otázky k procvičení látky:

- Jaké jsou základní komponenty plynové elektrárny?
- Při jakém termodynamickém ději probíhá spalování?
- Nakreslete $p - v$ a $T - s$ diagram cyklu.
- Jak lze obecně definovat účinnost?
- Napište 1. termodynamický zákon.
- Jaké jsou možnosti zvyšování účinnosti Braytonova cyklu?

Reference

1. CENGEL, Yunus A.; BOLES, Michael A. Thermodynamics: An Engineering Approach. 5th Edition. New York, NY 10020-1095: McGraw-Hill, 2006. 1016 s. ISBN 9780071257718.
2. Matmatch. The Future Of High-Temperature Materials For Gas Turbines. Matmatch GmbH. Available at: <https://matmatch.com/blog/the-future-of-high-temperature-materials-for-gas-turbines/>