

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

# Technologické procesy se spalovací turbínou

bakalářská práce

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Pavel Neuberger, Ph.D.

Vypracoval: Petr Novák

PRAHA 2011

# ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

**Petr Novák**

obor Silniční a městská automobilová doprava

Vedoucí katedry Vám ve smyslu Studijního a zkušebního řádu ČZU v Praze  
čl. 16 určuje tuto bakalářskou práci.

Název práce: **Technologické procesy se spalovací turbínou**

## **Osnova bakalářské práce:**

1. Úvod
2. Literární rešerše
3. Cíl práce a metodika
4. Závěr
5. Seznam literatury
6. Přílohy

Rozsah hlavní textové části: 30 - 40 stran

Doporučené zdroje:

Veselý, S. 2002. Parní turbíny pro výrobu elektrické energie při spalování biomasy a odpadů. In: Mezinárodní konference Kotle, energetická zařízení a spalovny odpadů, Brno, 2002.

Krbek, J. 1982. Tepelné turbíny a turbokompresory. VUT-FS Brno, 1982.

TÓTH A. 2009. Některé způsoby využití spalovacích turbín ve speciálních technologiích. In: Dny kogenerace 2009, Cogen -Czech, Praha, 2009.

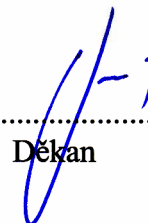
Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Pavel Neuberger, Ph.D.**

Termín zadání diplomové práce: listopad 2009

Termín odevzdání bakalářské práce: duben 2011



.....  
Vedoucí katedry



.....  
Děkan

V Praze dne: 30. 11. 2009

---

### **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením doc. Ing. Pavla Neubergera, Ph.D. a použil jen pramenů citovaných v příložené bibliografii.

Podpis:

## **Poděkování**

Velice rád bych touto cestou poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Pavlu Neubergerovi, Ph.D. za odborné a užitečné rady, cenné připomínky, vstřícný přístup, ochotu a čas, který mi věnoval při zpracovávání mé práce. Dále pak mé rodině za podporu ve studiu.

## **Abstrakt**

Tato práce je primárně zaměřena na problematiku využití spalovací turbíny v technologických procesech. V úvodní části krátce seznamuje s její historií, dále pak s jednotlivými komponenty a palivy, která lze pro její provoz využít. Následně poukazuje na rozdělení spalovacích turbín podle konstrukční koncepce a poté její využití v jednotlivých oblastech. V závěru práce je rozebráno několik, výše zmíněných technologických procesů, kde je využita spalovací turbína. Práce je doplněna o dílčí zmapování výhod, ale i nevýhod spalovacích turbín z hlediska jejich praktického využití.

## **Klíčová slova**

Spalovací turbína, technologický proces, kogenerace, paroplynová elektrárna, mikroturbína.

## **Summary**

This work is primarily focused on the issue of the using of a combustion turbine in technological processes. In the introductory section it is briefly introduced its history, then the individual components and fuel, which can be used for its operation. Next part is about resolving of combustion turbines according to constructions and using them in various kinds of applications. Several the above mentioned technological processes, where the combustion turbine is used, are discussed at the end of this work. The work is supplemented by a partial recap of advantages and disadvantages of combustion turbines according to their practical using.

## **Key words**

Combustion Turbine, technological process, cogeneration, gas-fired power station, microturbine.

# Obsah

<b>1. ÚVOD</b> .....	<b>9</b>
<b>2. CÍL PRÁCE</b> .....	<b>11</b>
<b>3. SPALOVACÍ TURBÍNA</b> .....	<b>12</b>
3.1 VYMEZENÍ POJMU SPALOVACÍ TURBÍNA .....	12
3.2 ČLENĚNÍ SPALOVACÍCH TURBÍN PODLE HLAVNÍCH PRAKTICKÝCH HLEDISEK .....	12
3.3 ZÁKLADNÍ KOMPONENTY SPALOVACÍ TURBÍNY .....	13
3.3.1 Kompresor .....	13
3.3.2 Spalovací komory .....	15
3.3.3 Plynová turbína .....	16
3.3.4 Regenerační výměníky spalovacích turbín .....	17
3.4 ÚČINNOST PŘEMĚNY ENERGIE V TEPELNÝCH MOTORECH .....	18
3.5 PALIVA SPALOVACÍCH TURBÍN .....	19
3.5.1 Plyná paliva .....	19
3.5.2 Kapalná paliva .....	20
3.5.3 Pevná paliva .....	20
3.6 DĚLENÍ SPALOVACÍCH TURBÍN PODLE KONSTRUKČNÍ KONCEPCE .....	21
3.6.1 Spalovací turbíny průmyslového typu .....	21
3.6.2 Spalovací turbíny druhého typu .....	21
3.6.3 Mikroturbíny .....	21
3.7 DĚLENÍ SPALOVACÍCH TURBÍN PODLE OBLASTI POUŽITÍ .....	22
3.7.1 Spalovací turbína pro pohon elektrického generátoru .....	22
3.7.2 Spalovací turbína pro mechanický pohon .....	24
3.7.3 Spalovací turbína pro pohon vozidel .....	25
3.7.4 Spalovací turbína pro pohon letadel .....	30
3.7.5 Spalovací turbína pro pohon lodí .....	32
3.8 TECHNOLOGICKÉ PROCESY SE SPALOVACÍ TURBÍNOU .....	33
3.8.1 Teplárna čisticí stanice odpadních vod se spalovací turbínou na kalový plyn .....	34
3.8.2 Výroba kyseliny dusičné .....	35
3.8.3 Sušení soli chloridu draselného spalínami ze spalovací turbíny .....	36
3.8.4 Výroba el. energie z odpadního tepla, která vzniká při výrobě ferosilicia .....	37
3.8.5 Kogenerační způsoby zapojení spalovacích turbín .....	39
3.8.6 Provedení tepláren se spalovacími turbínami .....	41
3.8.7 Paroplynová elektrárna .....	42
<b>4. ZÁVĚR</b> .....	<b>43</b>
<b>5. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY</b> .....	<b>45</b>

<b>6.</b>	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ</b> .....	<b>48</b>
<b>7.</b>	<b>SEZNAM PŘÍLOH</b> .....	<b>50</b>
<b>8.</b>	<b>PŘÍLOHY</b> .....	<b>51</b>



# 1. Úvod

## Krátká exkurze do historie

Dá se začít jako v dějepise: ...již staří Řekové... Jisté znalosti principů reaktivních pohonů (lépe řečeno dnešního „zákona akce a reakce“) můžeme nalézt již u antických učenců (například Heronova rotující koule je doložena již 150 let před naším letopočtem). Prvním, kdo v novověku použil mechanickou práci proudu páry v oběžném kole, byl roku 1629 Ital Giovanni deBranca. Nedlouho po něm, roku 1680, konstruoval anglický génius Isaac Newton svůj reakční parovůz (vůz měla pohánět tryskou unikající pára), což lze patrně považovat za první pokus o uplatnění reaktivního pohonu v dopravě. Další teoretické a praktické práce na toto téma přineslo až 19. století jako odpověď na požadavky tehdejší bouřlivé industrializace. Historii hnacích proudových strojů a především turbín tehdy psali vynálezci Parsons, Laval, Rateau, Curtis a mnozí další. Za zamýšlení stojí fakt, že myšlenka (parní) turbíny je vlastně starší než myšlenka pístového parního stroje. [18]

Pochopitelně zejména vynález nejrozšířenější parní turbíny je pro nás velice důležitý a později s vývojem tepelně odolných materiálů i plynové a spalovací turbíny. Vynález a především praktické uplatnění turbíny znamenal obrovský přelom v technice. Tehdejší využití našla zejména v pohonech vysokootáčkových strojů a od přelomu 19. a 20. století i v energetice. [18]

## Spalovací a plynové turbíny

Princip spalovací turbíny byl patrně poprvé patentován roku 1791 jistým Angličanem Johnem Barberem, ovšem k praktickému využití bylo příliš daleko. Roku 1902 Dr. Sanford Moss v USA uvedl do pokusného provozu první plnicí dmyhadlo pro pístový motor poháněné plynovou turbínou. První pokusnou spalovací turbínu vyrobila pařížská firma Sociétés anonymes des Turbomoteurs roku 1905, pracovala s rovnotlakým spalováním (tj. spalovací turbína taková, jakou ji známe dnes nejčastěji, byť tehdy s účinností zoufalých 3%!), palivem byl petrolej a výkon okolo 300 kW při 4250 ot/min. Zkonstruovali ji inženýři Armangeu a Lemal. Své znalosti firma dále využila pro konstrukci malé turbíny pro pohon torpéd. Roku 1909 postavil inženýr

Holzwarth spalovací turbínu se spalováním za konstantního objemu. Pokusil se využít faktu, že výbušné spalování (tj. periodické, podobně jako u spalovacího motoru) má vyšší tepelnou účinnost než spalování rovnotlaké (tj. v tomto případě kontinuální). Jeho soustrojí mělo skutečně vyšší účinnost (cca 14%), ovšem pro technické komplikace se nakonec používalo a používá jen zřídka. [18]

Dalším významným počinem byla první konstrukce turbíny poháněné výfukovými plyny leteckého motoru pro pohon přeplňovacího turbokompresoru na konci první světové války. Dalšími oblastmi pro uplatnění turbín se ukázaly být stavba lodí a dokonce i výroba lokomotiv (švýcarský Brown Boveri & Cie roku 1941). [18]

Zajímavé použití pro spalovací turbíny se našlo ve 30. letech 20. století v energetice. Vlastnosti spalovacích turbínových soustrojí byly vhodné pro pokrytí špičkových odběrů, což vedlo k rozvoji a výstavbě elektráren.

Principy proudových strojů, turbín a reaktivních pohonů si hledaly cestu i do bouřlivě se rozvíjejícího letectví. Za druhé světové války se konstrukce pístových motorů a vrtulí dostala na své maximum a pro dosažení větších rychlostí letadel bylo nutné použít vhodnější pohon. To vyvolalo pokusy s raketovými, pulzačními a především turbínovými motory. Zpočátku šlo o jednoduché motory vyrobené z málo odolných materiálů, které trpěly velkou poruchovostí, měly malý poměr tahu k hmotnosti, vysokou spotřebu paliva a životnost dosahující jen několika desítek hodin. Po válce šel vývoj velmi rychle kupředu, zvětšoval se počet stupňů kompresoru, čímž stoupl tlak nasávaného vzduchu a tím i účinnost celého motoru. Objevily se dvou a tříhřídelová provedení, dvouproudové motory, přídavné spalování. Nové slitiny a technologie umožnily provoz při vyšších teplotách a tím opět zvýšení účinnosti. Turbíny postupně ovládly nebe. Vrtule se již používá pouze u lehkých a pomalých letadel. [19]

## **2. Cíl práce**

Předložená bakalářská práce si klade za cíl seznámit s vývojem a definicí spalovací turbíny. Přináší přehled typologie, principy činností, poukazuje na současné uplatnění a především na aplikaci spalovacích turbín v technologických procesech různých oborů.

Dílčím cílem práce je prostřednictvím bližšího studia daného tématu zmapování výhod, ale i nevýhod spalovacích turbín z hlediska jejich praktického využití pro současné i budoucí generace.

## **3. Spalovací turbína**

### **3.1 Vymezení pojmu spalovací turbína**

Spalovací turbínu označíme jako lopatkové soustrojí, které tvoří minimálně kompresor, spalovací komora a plynová turbína s příslušenstvím a další pomocná zařízení. Užitečný výkon hřídele turbíny se získává expanzí spalin vzniklých spalováním paliva v jedné nebo v několika spalovacích komorách v proudu stlačeného vzduchu, který dodává kompresor.

Jiná definice nám říká, že jde o tepelný stroj, jehož pracovní látkou jsou spaliny vzniklé spalováním paliva ve spalovací komoře a základní pracovní proces probíhá při rotačním pohybu. Spalovací turbína je jednoduchým a zároveň velmi rozšířeným druhem plynových turbínových zařízení.

Spalovací turbíny lze detailněji členit do kategorií podle různých praktických i teoretických hledisek. Rozvoj výroby spalovacích turbín vedl k ustálení určitých oblastí použití s typickými znaky vyráběných druhů.

### **3.2 Členění spalovacích turbín podle hlavních praktických hledisek**

a) Konstrukční koncepce:

- průmyslový typ
- odvozené z leteckých proudových motorů
- malých výkonů (mikroturbíny)

b) Oblasti použití:

- pohon elektrického generátoru
- mechanický pohon
- pohon vozidel

- pohon letadel
- pohon lodí

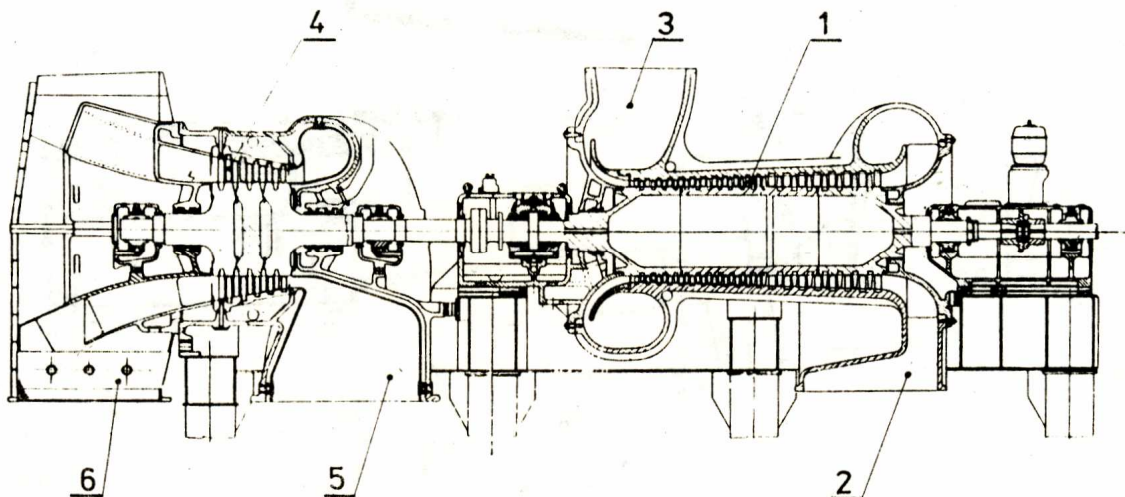
c) Dispoziční provedení:

- stacionární v budově
- venkovní provedení
- převozná

### 3.3 Základní komponenty spalovací turbíny

**Obr. 1 Spalovací turbína o výkonu 7 MW**

*1 kompresor, 2 vstupní hrdlo vzduchu, výstup stlačeného vzduchu, 4 turbína, 5 vstup spalin do turbíny, 6 výstup spalin z turbíny*



Zdroj: [2]

#### 3.3.1 Kompresor

U kompresorů použitých ve spalovacích turbínách se dosahuje stlačení plynu jeho zrychlováním a následnou přeměnou kinetické energie plynu v energii tlakovou. U turbokompresorů se tato přeměna děje při průtoku činnou částí stroje: u radiálních kompresorů oběžným kolem a za ním zařazeným difuzorem (tj. při proudění převážně odstředivým směrem), u axiálních kompresorů v rotorové a satorové lopátkové části (tj. při proudění převážně axiálním směrem). V turbokompresorech se udělí nasávanému

plynu v oběžném kole částečné stlačení a vysoká rychlost a v následujícím pevném difuzoru se změní kinetická energie plynu v energii tlakovou. [5]

### **Radiální kompresor**

U radiálního turbokompresoru proudí nasávaný plyn do oběžného kola ve směru přibližně axiálním a v oběžném kole se změní směr na radiální. Obvodová rychlost kola je podle kritické rychlosti plynu a dovoleného namáhání kola odstředivou silou v mezích 115 až 380 m.s<sup>-1</sup>, u leteckých turbokompresorů 350 až 450 m.s<sup>-1</sup>. Při vysoké obvodové rychlosti kola působí na plyn odstředivá síla, která vyvolá jeho částečné stlačení. Po výstupu z oběžného kola následuje zpomalení plynu v difuzoru s výsledným zvýšením tlaku. [5]

### **Axiální kompresor**

U axiálního turbokompresoru má rotor nejčastěji válcovitý nebo mírně kuželovitý buben a do drážek na jeho obvodu jsou vsazeny oběžné lopatky, zatímco difuzorové lopatky jsou vetknuty do tělesa skříně (statoru). Věnc oběžných lopatek se po délce průtočné části kompresoru střídá s věncem pevných difuzorových lopatek. K zmenšení rázu v prvním oběžném kole a k zvýšení hltnosti kola je před ním vestavěn předrozvaděč, tj. lopatková mříž pro vhodné usměrnění proudu plynu. [5]

Pro stejné poměrné stlačení vyžaduje axiální kompresor větší počet stupňů než kompresor radiální. Jak oběžné, tak difuzorové lopatky mají u axiálních kompresorů přibližně tvar úzkých šroubových ploch s aerodynamickými profily. Obvodové rychlosti lopatek jsou nižší (pro vzduch a lehké plyny) 240 až 260 m.s<sup>-1</sup>, vzhledem k tomu, že lopatky nejsou vyztuženy diskem jako u radiálních kompresorů. [5]

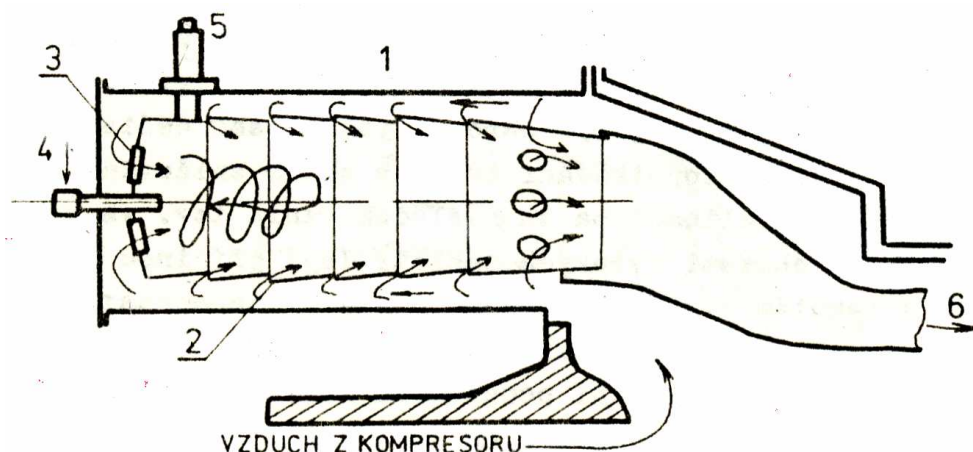
Výhodami turbokompresorů proti pístovým kompresorům jsou: velmi klidný chod, jednodušší obsluha a údržba, vysoká spolehlivost provozu (dlouhá životnost, malé opotřebení činných částí, atd.), bezmaznost (olej nepřichází do styku s plynem) a jednodušší projekt kompresorové stanice. Naopak mezi nevýhody patří: vysoká hladina hluku, vysoké otáčky, pro dosažení vyšších tlaků je nutný větší počet oběžných kol a velká citlivost na změnu tlaku. [5]

### 3.3.2 Spalovací komory

Ve spalovací komoře spalovací turbíny se přivádí tepelná energie kontinuálním spalováním paliva v proudu vzduchu za konstantního tlaku. Spalovací proces je charakterizován poměrně velkým přebytkem vzduchu, neboť teplota na výstupu ze spalovací komory je značně nižší než adiabatická teplota spalování. Aby byla zaručena stabilita hoření, provádí se spalovací komory tak, jak je nakresleno na obr. 2. Proud vzduchu se dělí na dvě části. Primární vzduch se vede přes lopatky víříče do vlastního spalovacího prostoru, kam se zároveň přivádí palivo. Rotační proudění umožňuje vytváření recirkulace horkých spalin, jež je potřebná pro zapálení vstříkovaného paliva a pro udržení vysoké teploty ve spalovací zóně. Zbylý sekundární vzduch se používá pro chlazení plamence spalovací komory a zavádí se do proudu spalin ve směšovací prostor ve výstupní části spalovací komory. [2]

**Obr. 2 Spalovací komora**

*1 plášť komory, 2 plamenec, 3 víříč, 4 přívod paliva, 5 zapalovací zařízení, 6 výstup spalin*



Zdroj: [2]

Důležitým požadavkem a obtížným konstrukčním problémem je dosažení rovnoměrného pole teploty spalin na výstupu ze spalovací komory. U stacionárních spalovacích turbín průmyslového typu bývají obvykle jedna nebo dvě spalovací komory válcového tvaru s protiproudým uspořádáním, umístěné buď nad soustrojím nebo těsně vedle něho. U leteckých spalovacích turbín a u spalovacích turbín, jejichž konstrukce je do značné míry z těchto odvozena, se vzduch za kompresorem dělí do několika (6 až 18) samostatných spalovacích komor, uspořádaných paralelně a symetricky kolem osy

stroje tak, že výstup z nich plynule navazuje po celém obvodu na lopatkování turbíny. Tyto komory se někdy spojují, takže se vytvoří prstencová (anuloidní) komora. [2]

### 3.3.3 Plynová turbína

Pracovní stupeň je základním prvkem plynové turbíny, umožňujícím přeměnu vnitřní tepelné energie proudu spalin v mechanickou práci. Hlavními částmi každého stupně jsou pevné rozváděcí ústrojí a systém rotujících kanálů, tvořených turbínovými lopatkami upevněnými v rotoru. Podle toho, v jakém směru proudí spaliny vzhledem k ose rotoru turbíny, rozdělujeme turbínové stupně na axiální a radiální. U čistě axiálních stupňů proudí spaliny po válcových plochách, jejichž osa je shodná s osou rotoru. Mezi axiální stupně se však zařazují také stupně, u nichž spaliny proudí po kuželových plochách s nepříliš velkým vrcholovým úhlem kužele. V radiálních stupních je směr proudění kolmý k ose rotoru. [2]

Turbínové stupně spalovacích turbín pracují v oblasti značně vyšších teplot než u parní turbíny, ale při nízké tlakové hladině a při relativně velkém objemovém toku spalin. Vzhledem k tomu, že vysoké teploty vyžadují velmi kvalitní materiál lopatek, rotoru i ostatních částí turbíny a komplikovanou konstrukci umožňující chlazení nejexponovanějších částí, je snaha omezit počet stupňů na minimum a volit tedy takový typ turbínového stupně, který dovoluje zpracování co možná největšího entalpického spádu. Tento požadavek splňuje rovnotlaký stupeň. [2]

Typickým rozdílem turbíny ve spalovacím soustrojí oproti parní turbíně je provedení co nejdokonalějšího chlazení rotoru, skříně a lopatek. Pro chlazení se používá vzduch odebíraný ve vhodném místě z lopatkování kompresoru nebo na jeho výstupu. Povrch rotoru v oblasti vysokých teplot se obvykle chrání krycími segmenty ze žáruvzdorného materiálu, přičemž mezerou mezi nimi a rotorem se prohání chladící vzduch. Přestupu tepla z lopatek do rotoru se zabraňuje profukováním závěsů lopatek. Rovněž nosič statorových lopatek se intenzivně chladí vzduchem odebíraným z kompresoru. [2]

Rozhodujícím a nejchoulostivějším prvkem spalovací turbíny jsou lopatky, zejména vysoce namáhané rotorové. Nejjednodušším způsobem chlazení je tzv. konvekční chlazení vzduchem, protékajícím podélnými kanálky v lopatce. Nedostatkem



tohoto způsobu chlazení je v jeho malé účinnosti a dále v tom, že kanály není možno provést dostatečně blízko nejvíce teplotně zatížené vstupní hrany lopatky. Rovněž výstupní hrana je prakticky nechlazena. Značného vylepšení je možno dosáhnout pomocí plechové vložky, umístěné v dutině lopatky, kdy náporový účinek vzduchu zlepšuje chlazení vstupní hrany. Chlazení výstupní hrany je dosaženo vypouštěním chladícího vzduchu otvory uspořádanými po celé výšce lopatky. Moderní technologie přesného lití umožňuje provedení statorových lopatek ve formě miniaturních výměníků s bohatě žebrovaným vnitřním povrchem. Obdobně jsou provedeny i rotorové lopatky špičkové úrovně. Vypouštěním chladícího vzduchu otvory ve výhodných místech po celé výšce lopatek se dosahuje tzv. závojevého chlazení. Ve vývoji jsou další dokonalejší typy chlazení a perspektivně se uvažuje i o chlazení vodou. [2]

### **3.3.4 Regenerační výměníky spalovacích turbín**

Pro zvýšení tepelné účinnosti oběhu spalovací turbíny je možno zvolit několik metod a jednou z nich je regenerace tepla. Regenerace tepla je založená na využití energie výstupních spalin ve vlastním oběhu. Horkými spalinami vystupujícími z turbíny se předehřívá stlačený vzduch před vstupem do spalovací komory. Při stejné měrné práci oběhu se tak o toto sdělené teplo zmenšuje teplo přivedené do oběhu, čímž termická účinnost oběhu výrazně vzroste. [2]

Dosažení požadované termické účinnosti oběhu je otázkou správného dimenzování výměníku, který kromě stupně regenerace a malých tlakových ztrát musí mít dobré provozní vlastnosti. Jsou to zejména těsnost výměňkových ploch, vysoká spolehlivost a také vysoká životnost. Z hlediska konstrukčního provedení se regenerační ohříváky turbín dělí na trubkové a deskové. [2]

**Trubkové výměníky** vykazují dobré vlastnosti z hledisek pevnostních i provozních (těsnost, výměna poškozených částí, čištění atd.), avšak z hledisek výměny tepla jsou málo účinné. Snaha dosáhnout větší kompaktnosti vede k zvětšování teplosměnných ploch žebrováním trubek a používání intenzifikačních prostředků sdílení tepla. [2]

**Deskové výměníky** dosahují ve srovnání s trubkovými výměníky menších rozměrů a menších hmotností. Vyžadují však dokonalou technologii výroby.

V opačném případě vykazují provozní nedostatky soustředěné do oblasti tepelných pnutí a s tím souvisejících netěsností. [2]

### 3.4 Účinnost přeměny energie v tepelných motorech

Pojmem tepelný motor rozumíme hnací zařízení, které pracuje v termodynamickém uzavřeném oběhu a koná mechanickou práci následkem přívodu tepla  $Q_1$  tepelného zásobníku o vyšší teplotě  $T_1$  při současném odvodu tepla  $Q_2$  ze zásobníku o nižší teplotě  $T_2$ . Pracovní látka se po proběhnutí vrací do výchozího stavu. Přestože u otevřeného oběhu spalovací turbíny tato podmínka není splněna, výstupní spaliny se termodynamicky od vzduchu s palivem na vstupu podstatně neliší, takže další úvahy o tepelných motorech můžeme aplikovat s dobrou přesností i na spalovací turbíny s tím, že přívod tepla spalováním paliva považujeme za teplo sdělené pracovní látce oběhu z venku. [1]

Dokonalost přeměny energie v tepelném oběhu udáváme obecně poměrem výsledné energie užitečné (chtěné) k energii vynaložené, takže termickou účinnost pracovního oběhu definujeme jako

$$\eta_t = \frac{A_{už}}{Q_1} = \frac{(Q_1 - |Q_2|)}{Q_1} = 1 - \frac{|Q_2|}{Q_1}. \quad (\text{Rovnice č. 1})$$

Pro vratný Carnotův oběh s vratným izotermickým přívodem i odvodem tepla při teplotě  $T_1$  a  $T_2$ , mezi nimiž probíhá izoentropická expanze a komprese ideálního plynu, dostaneme vzorec

$$\eta_{tC} = 1 - \frac{T_1}{T_2}. \quad (\text{Rovnice č. 2})$$

Termická účinnost tepelného motoru definovaná rovnicí č. 1 nehodnotí číselnou hodnotou úměrně kvalitě stroje, protože i vratný Carnotův oběh dosahuje hodnoty  $\eta_{tC} = (\eta_t)_{\max} < 1$ . Proto se vedle termické účinnosti oběhu tepelného motoru zavádí energetickou účinnost oběhu jako poměr rovnocenných energií, tj. výsledné užitečné energie (práce  $A_e$ ) a exergie  $E_Q$  vynaložené přivedením tepla:

$$\eta_{ex,c} = \frac{A_e}{E_Q} = \frac{(E_Q - E_Z)}{E_Q} = 1 - \frac{E_Z}{E_Q}. \text{ (Rovnice č. 3)}$$

Energická účinnost hodnotí přeměnu energie v tepelném motoru na základě prvního i druhého termodynamického zákona a umožňuje poznat hlubší souvislosti. Protože pro vratný oběh  $E_Z = 0$  a  $\eta_{ex,c} = 1$ , je  $\eta_{ex,c}$  přímým měřítkem ztrát v oběhu způsobených nevratnostmi, které lze v zásadě vhodným řešením snižovat. Ztráty v oběhu závisí na dokonalosti jednotlivých dílčích pochodů. Protože v nich nastává přeměna energií za trvalé změny stavu pracovní látky, posuzujeme je jako děje v jednotlivých otevřených termodynamických soustavách. [1]

### 3.5 Paliva spalovacích turbín

Palivo má velmi podstatný vliv na technicko-ekonomické vlastnosti spalovacích turbín a tím i oblasti a způsob jejich uplatnění. Během mnohaletého vývoje spalovacích turbín byly vyzkoušeny téměř všechny druhy energetických paliv, ale ne všechna jsou pro tento účel vhodná. Nejvhodnějšími palivy pro využití všech výhodných vlastností spalovacích turbín jsou kvalitní kapalná a plynná paliva. Naproti tomu však nedostatek a s ním rostoucí cena těchto paliv vede k vývoji strojů na využití i méně kvalitních paliv i pevných fosilních paliv. [1, 2]

#### 3.5.1 Plynná paliva

Rozdělujeme je na vysokovýhřevná a nízkovýhřevná. Nejvhodnějším palivem z první skupiny je zemní plyn, jehož hlavní složkou o obsahu 92 až 98 % je metan ( $\text{CH}_4$ ). Zbývající obsah připadá na vyšší uhlovodíky, oxid uhličitý ( $\text{CO}_2$ ) a dusík ( $\text{N}_2$ ). Zemní plyn s výhřevností 42 000 až 49 000  $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$  lze spalovat bez jakýchkoliv úprav, pokud poměrný obsah tuhých částic včetně vody, naftalenu a dalších látek je nižší než asi  $(15 \text{ až } 30) \times 10^{-6}$ . Palivový systém je levný a jednoduchý, ale podléhá přísným bezpečnostním předpisům, protože metan se vzduchem v rozmezí koncentrací 4,9 až 15,4 % objemu tvoří výbušnou směs. Dále je třeba zabezpečit, aby plyn na vstupu do palivového systému na spalovací komoře byl za všech provozních stavů bez jakýchkoliv kapalných frakcí, jejichž nahromadění by mohlo vést k vážnému poškození soustrojí. Plyn také nesmí obsahovat žádné složky kondenzující v rozmezí

tlaků, které se vyskytují v provozu v palivovém systému turbíny. Toho docílíme zařazením odlučovačů, ohříváků apod. do rozvodu paliva. K nízkovýhřevným palivům řadíme vysokopeční plyn o výhřevnosti 2 100 až 3 300 kJ.kg<sup>-1</sup>. Obsahuje jedovatý oxid uhelnatý (CO) a mechanické nečistoty, které je třeba nákladně čistícím zařízením odstranit, což je nevýhodou při použití tohoto paliva ve spalovací turbíně. Vzhledem k výhřevnosti mezi výše uvedené skupiny paliv zařadíme kalový plyn. Ten vzniká hnilobou organických látek ve vyhnívacích nádržích čistíren odpadních vod, přičemž metan, tvořící 70% jeho objemu, má výhřevnost 21 000 až 23 000 kJ.kg<sup>-1</sup>. [1, 2]

### 3.5.2 Kapalná paliva

Z převážné části jsou ropného původu. Běžně používaná paliva jsou letecký petrolej, lehký a těžký topný olej. První dvě jmenovaná jsou velmi vhodná paliva, ale oproti zemnímu plynu vyžadují komplikovanější palivové hospodářství. Těžký topný olej není příliš vhodným palivem, protože se vyznačuje vyšším obsahem síry, popelovin a při běžných teplotách má poměrně vysokou viskozitu, proto je nutné ho předeřhřívát na teplotu 120°C i více a celý palivový systém je nutno ohřívát, ideálně parou. Vyšší obsah síry a nečistot zapříčiňuje poněkud zvýšené zanášení spalínového traktu a to zejména lopatkování turbíny a tím pádem snižování celkové účinnosti soustrojí. Přítomnost vanadu ve spalínách způsobuje vznik tzv. vanadové koroze, ke které dochází v turbíně v oblasti vysokých teplot. Příčinou vanadové koroze je oxid vanadičný (V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>), který má v tekutém stavu značnou oxidační schopnost vůči kovům. Pro omezení jeho vlivu se do paliva přidávají přísady zvané inhibitory. Inhibitory obvykle jsou na bázi hořčíku a zvyšují bod tavení popela nad teplotu spalín při jejich vstupu do turbíny a zabraňují tak popelovinám nalepovat se na lopatky. Síra v palivu způsobuje nízkoteplotní korozi a je zdrojem nežádoucích exhalací jejich oxidů. Pokud teploty klesnou pod rosný bod spalín, tak na povrchu kovových částí spalínového vedení kondenzuje kyselina sírová (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), která má velmi silné korozivní účinky, což značně ztěžuje využití tepla ze spalín spalovací turbíny. [1, 2]

### 3.5.3 Pevná paliva

Jejich využití pro spalovací turbíny ve vzdálenější minulosti byla nepříliš úspěšná především proto, že spaliny nedokonale zbavené pevných částic způsobují velice rychlé erozní opotřebení lopatek turbíny. V poslední době se systémy využívající

zplyňování uhlí jeví jako perspektivní. Ve zplyňovacím generátoru se pomocí vhodného zplyňovacího média produkuje nízkovýhřevný plyn, který se čistí a odsiřuje. Odsiřování stlačeného paliva, jehož objem je podstatně menší, než objem odpovídajících spalin při atmosférickém tlaku je podstatně méně nákladné, než odsiřování spalin. [1, 2]

### **3.6 Dělení spalovacích turbín podle konstrukční koncepce**

Tepelná účinnost spalovací turbíny je tím větší, čím větší je teplota spalin na výstupu ze spalovací komory. Vysoká teplota spalin vyžaduje ovšem dokonalou konstrukci plynové turbíny a materiály nejvyšší kvality. Teploty spalin na výstupu ze spalovací komory se dnes pohybují v rozpětí 950–1 250 °C u turbín průmyslového typu, u turbín odvozených z leteckých motorů dosahují až 1 380 °C. Tlak za kompresorem bývá u turbín průmyslového typu nejčastěji 0,6–1,2 MPa (u turbín největšího výkonu ovšem až 2,2 MPa), u druhého typu dosahuje až 4 MPa. [4]

#### **3.6.1 Spalovací turbíny průmyslového typu**

Spalovací turbíny průmyslového typu jsou charakterizované robustní konstrukcí. Vycházejí původně ze zkušeností výrobců parních turbín. Jsou konstruovány obvykle jako jednohřídelové. Najdeme je v celém výkonovém rozsahu vyráběných jednotek, od zařízení o výkonu řádově jednotek megawatt až po největší turbíny s výkonem řádu stovek megawatt. Kompresory u nejmenších výkonových typů se provádějí s radiálními stupni, u větších výkonů jsou zpravidla axiální. [4]

#### **3.6.2 Spalovací turbíny druhého typu**

Spalovací turbíny druhého typu jsou odvozeny z leteckých proudových motorů doplněných o výkonovou plynovou turbínu, napojenou na elektrický generátor. Konstrukce je odlehčená a využívá dlouholetých zkušeností výrobců leteckých motorů. Bývají dvou a někdy i tříhřídelové. Poslední vývoj ve světě vede ke sbližování obou konstrukčních provedení. [4]

#### **3.6.3 Mikroturbíny**

Mikroturbína je plynový kotel, který navíc vyrábí elektřinu. Technologie mikroturbín se pro široké možnosti zdá být velmi univerzální. Lze ji použít na výrobu

elektriny a tepla v městském tepelném hospodářství, v malé výrobě polystyrenu, ve fit-centru, velkém bazénu stejně jako v nemocnici, administrativní budově nebo statku pro využití energie odpadů od zvířat a z polí. V ekologických elektrobusech mikroturbíny pohání elektromotory a dobíjejí baterie. [7]

Dobře splňují některé požadavky malých kogeneračních jednotek (rychlý start, minimální údržba, malé rozměry apod.) s jejich výkony od 30 do cca 500 kW. Takové jednotky jsou lehčí než jednotky se spalovacím motorem. Nevýhodou jsou vysoké otáčky od 20 000 až 150 000  $\text{min}^{-1}$ , které znamenají komplikaci jak v pohonu samotného vysokofrekvenčního generátoru, tak v převodu vysokofrekvenčního proudu na proud střídavý o frekvenci 50 Hz. To klade vysoké technické nároky na ložiska generátoru a vysoké finanční nároky na výkonovou elektroniku. Vzhledem k jejich malé hmotnosti je možné s nimi mnohem lépe manipulovat než s centrálou s pístovými spalovacími motory, používají se jako záložní zdroje schopné rychlého spuštění při požadavku na výkon. Malé jednotky se někdy skládají do skupin se společným řídicím systémem pro zvýšení a optimalizování celkového výkonu. [6]

### **3.7 Dělení spalovacích turbín podle oblastí použití**

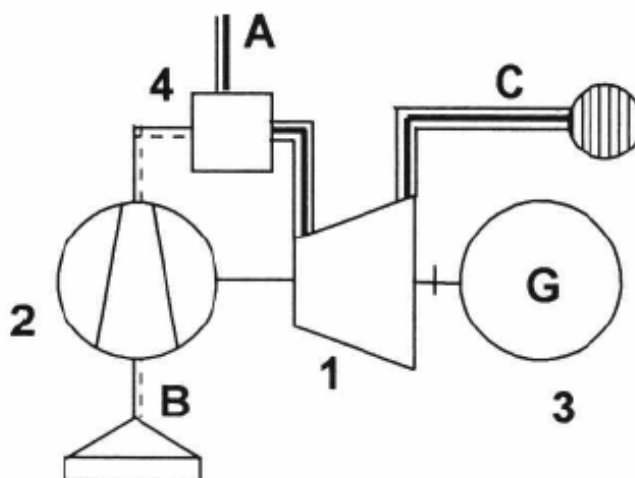
#### **3.7.1 Spalovací turbína pro pohon elektrického generátoru**

Spalovací turbína s jednoduchým otevřeným oběhem pro pohon elektrického generátoru se skládá z kompresoru, spalovací komory, plynové turbíny, elektrického generátoru a pomocných zařízení. Schéma zapojení těchto komponent je nakresleno na obr 3. Kompresor nasává vzduch z atmosféry a stlačuje jej na požadovaný tlak. Stlačený vzduch je veden do spalovací komory, kde se v jeho proudu při stálém tlaku spaluje palivo. Tím vzniknou spaliny o vysoké teplotě a tlaku, které pak expandují v plynové turbíně. Po průchodu turbínou, již s nízkou teplotou, jsou odváděny do atmosféry. Plynová turbína pohání přímo kompresor. Přebytek výkonu je použit pro pohon elektrického generátoru. [4]

### Obr. 3 Schéma uspořádání spalovací turbíny s elektrickým generátorem

1 turbína, 2 kompresor, 3 elektrický generátor, 4 spalovací komora

A přívod paliva, B přívod vzduchu, C odvod spalin

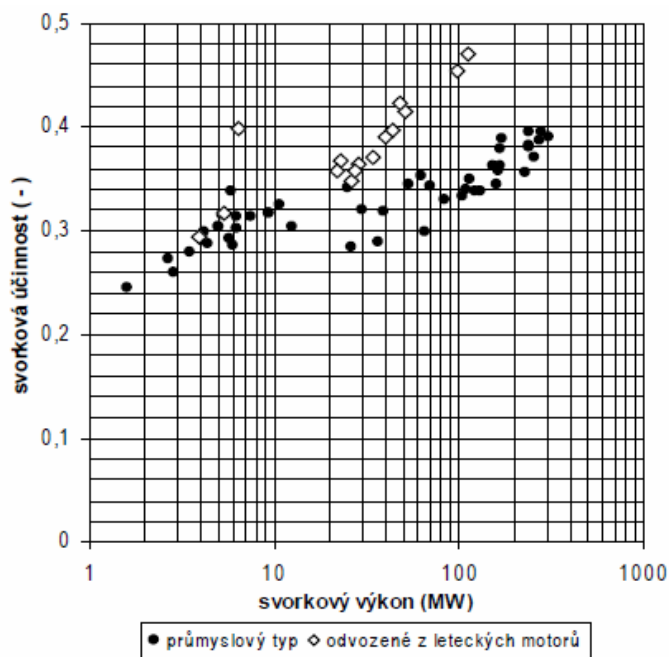


Zdroj: [4]

Elektrická účinnost se může pohybovat v rozsahu 20 až 48 % (obr. 4) a závisí na typu spalovací turbíny a především na teplotě spalin za spalovací komorou. Spalovací turbíny jsou k dispozici ve výkonovém rozsahu 250 kW až 300 MW. Zařízení o výkonu pod 3 MW se příliš neuplatňují z ekonomických důvodů, protože mají poměrně nízkou účinnost a vyšší měrnou investiční cenu. [4]

Spalovací turbíny jsou obvykle montovány na rám spolu s alternátorem a převodovkou, která upravuje otáčky turbíny na hodnotu potřebnou pro použitý alternátor. Protože tato zařízení jsou velice hlučná, musí se zvukově izolovat do speciálních krytů i uvnitř provozních hal. Kryty mají také za úkol minimalizovat nebezpečí vzniku požáru. Sání vzduchu a jeho filtry, včetně tlumičů hluku, jsou uspořádány vně budovy nebo krytu. Výfukové spaliny jsou odváděny izolovaným potrubím (komínem) do vnější atmosféry. Odstávky turbín za účelem údržby se provádí v dlouhodobých intervalech. Větší opravy se provádí ve výrobních závodech. [4]

**Obr. 4 Svorková účinnost spalovacích turbín**



Zdroj: [4]

### 3.7.2 Spalovací turbína pro mechanický pohon

Vedle elektrických spalovacích turbosoustrojí tvoří druhou hlavní oblast, v níž se úspěšně uplatňují stacionární spalovací turbíny, aplikace převážně s proměnnými otáčkami hřídele, jež nazýváme souborně mechanické pohony. V této oblasti má co do počtu instalovaných jednotek a celkových výkonů zcela převažující postavení průmysl těžby a zejména dálkové dopravy ropy a zemního plynu. [1]

Při těžbě ropy se na některých odlehlých vrtných polích zvyšuje výtěžnost ložiska jeho tlakováním doprovodným zemním plynem. Plyn se komprimuje speciálními, technicky velmi náročnými kompresorovými agregáty s několika sériově řazenými plynovými kompresory s pohonem spalovací turbínou. Při těžbě zemního plynu je jedním ze závažných provozně ekonomických požadavků vyrovnávat zejména sezónní rozdíly v odběru plynu tak, aby využití rozvodné soustavy jako zařízení s typicky převládající kapitálovou složkou bylo během celého roku co nejrovnoměrnější. K tomu se nejčastěji používají přírodní podzemní tlakové zásobníky, do nichž se přečerpávají přebytky plynu zvláštními kompresorovými agregáty. U větších výkonů se uplatňují vícestupňové odstředivé kompresory s možností sériově paralelního řazení oběžných kol, poháněné spalovacími turbínami. [1]



Podstatně závažnější je však doprava vytěžených paliv dálkovým potrubím. Spalovací turbíny se zde uplatnily v zásadě především proto, že na rozdíl od elektrických pohonů umožňují regulaci změnou otáček. Investičně se ukázaly v širokém rozsahu vůbec nejvýhodnějším řešením a z hlediska provozu a údržby jsou zejména proti pístovým motorům podstatně méně náročné. Stále větší jednotkové výkony spalovacích turbín, jež jsou vyvíjeny hlavně pro pohon kompresních stanic plynovodů, umožňují zvětšovat i výkony dopravní soustavy nad možnosti ostatních druhů pohonů, což přirozeně ekonomickou výhodnost pohonu spalovací turbínou ještě dále podporuje.

### 3.7.3 Spalovací turbína pro pohon vozidel

Spalovací turbíny našly uplatnění pro pohon některých kolejových, vojenských i silničních vozidel.

**Kolejová vozidla:** Turbínová trakce se v době svého vzniku považovala za možnou budoucí alternativu elektrické trakce na hlavních tratích, ovšem s velikou úsporou mědi na elektrifikaci tratí. Koncem 50. let minulého století se začaly všude ve světě stavět prototypy turbínových lokomotiv, jejichž sláva však obvykle vyhasla stejně rychle, jako přišla. [10]

Asi nejúspěšnější aplikací turbínového pohonu na železnici jsou francouzské turbovlaky – jednotky pro rychlou osobní dopravu, které se používaly ve Francii a v USA (v USA dosud v provozu). Na druhém místě žebříčku úspěšnosti pak stojí mohutné nákladní turbínové lokomotivy, které provozovala dráha Union Pacific. [11]

Turbínové lokomotivy Union Pacific měly elektrický přenos výkonu (na rozdíl například od lokomotivy plzeňské Škody TL 659.0 ČSD). Turbína spalující mazut poháněla čtyři stejnosměrné hlavní generátory. Z důvodu vysokých provozních otáček turbíny byla mezi ni a generátory vložena redukční převodovka. Strojvedoucí ovládal přítok paliva do turbíny dvacetistupňovým kontrolérem. Lokomotivy řady 50-75 měly výkon 3 355 kW, při rozjezdu vykazovaly tažnou sílu až 614 kN. Při plném výkonu spotřebovaly cca 2 270 l paliva za hodinu, při běhu naprázdno "jen" 750 l paliva. Pro pomocné pohony měla lokomotiva malý spalovací motor o výkonu 186 kW. Kromě pohonu kompresoru a ventilátorů sloužil také ke startování turbíny a bylo jej také možné použít jako nouzový pohon při vypnuté turbíně. Umožňoval jízdu rychlostí až

40 km/h, což přinášelo (vzhledem k vysoké volnoběžné spotřebě turbíny) nemalé úspory paliva, například při jízdě samotné lokomotivy. [11, 17]

### **Obr. 5 Turbínová lokomotiva Union Pacifik**



Zdroj: [<http://farm4.static.flickr.com>]

Lokomotiva Škoda řady TL659.0 byla skříňová se dvěma koncovými kabinami pro obsluhu a kromě samotného faktu, že byla turbínová, vynikala mezi lokomotivami také tím, že měla mechanický přenos výkonu. Ten byl totiž v našich krajích typický pouze pro lokomotivy nejmenších výkonů, obvykle pro stroje určené k posunu na vlečkách a v lokomotivních depech. Právě mechanický přenos výkonu, použitý u řady TL659.0, vynesl tuto Českou lokomotivu na post nejvýkonnější lokomotivy s mechanickým přenosem výkonu na světě. Zdrojem výkonu lokomotiv řady TL659.0 byla spalovací turbína na topný olej. Ten stroje čerpaly z nádrže, která ale objemově nestačila, a tak byl za lokomotivu připojen malý kotlový vůz s dostatečnou zásobou paliva. Princip práce turbínového pohonu lze rozdělit do více stupňů. Prvním byla spalovací komora, kde se spaloval olej. Vzniklé spaliny uváděly do pohybu turbínu o výkonu 2 355 kW, jejíž maximální otáčky byly 5 800 ot.min<sup>-1</sup>. Spalovací turbína pak poháněla mechanickou převodovku a ta pomocí kloubových hřídelů a nápravových převodovek šestici náprav. Mimo spalovací turbíny měla lokomotiva ještě generační turbínu, určenou k pohonu kompresoru pro stlačování vzduchu ke spalování. Tento vzduch se předehříval ve výměníku výfukovými plyny po průchodu plynovými turbínami. Spaliny se využívaly také v parním generátoru pro vytápění lokomotivy a vlaku. Dále byl v lokomotivách přítomen ještě malý naftový motor TATRA 111

z řady T211.0 o výkonu 160 kW pro roztáčení turbíny a posun lokomotivy po depu.  
[10]

**Obr. 6 Lokomotiva Škoda TL659.002**



Zdroj: [<http://www.prototypy.cz>]

JetTrain je lokomotiva americké firmy Bombardier, která je velice podobná lokomotivám jednotek TGV a Acela, na něž v mnohém konstrukčně navazuje, ale již na první pohled se liší tím, že nemá žádný sběrač. Namísto naftového motoru, obvyklého u lokomotiv nezávislé trakce, ji pohání spalovací turbína PW150 kanadské firmy Pratt & Whitney. Vysoký výkon při nízké hmotnosti tuto jednotku předurčuje pochopitelně hlavně pro stavbu letadel a vrtulníků, ale konstruktéři JetTrainu si ji vybrali ze stejných důvodů. Bylo třeba, aby nová lokomotiva byla výkonná, přitom relativně lehká (asi o 20 % lehčí než ostatní americké osobní lokomotivy) a s nízko umístěným těžištěm. Zatímco hmotnost turbíny PW 150 činí necelých 550 kg, hmotnost dráhového motoru EMD 16-710G srovnatelného výkonu (pro lokomotivu s výkonem 2 980 kW) je bezmála 18 tun. Nízké těžiště v kombinaci s naklápěcím zařízením navíc umožňuje dosáhnout rychlosti 160 km/h ve většině oblouků, jaké se vyskytují v USA na hlavních tratích. Turbína dává na hřídeli výkon 3 730 kW (ale jsou dostupné i modifikace s výkonem až 5 220 kW). Lokomotiva má elektrický přenos výkonu, trakční motory jsou střídavé. Při zkouškách byla dosažena nejvyšší rychlost 251 km/h. Lokomotiva je označena číslem 2200. [12]

**Obr. 7 Lokomotiva Bombardier JetTrain**



*Bombardier JetTrain locomotive*



Zdroj: [<http://tra.tms.us>]

**Vojenská vozidla:** Příkladem vojenského vozidla s využitím spalovací turbíny je hlavní bojový tank armády USA M1 Abrams. V konstrukci tohoto bojového vozidla je kladen především důraz na bezpečnost osádky a moderní způsob boje. Tento 61,4 tuny těžký tank pohání dvoukompresorový turbínový benzinový motor AGT-1500 o výkonu 1 120 kW. Převody zajišťuje hydrokinetická plně automatická převodovka, která nabízí 4 rychlosti vpřed při maximální rychlosti 67,72 km/h (v terénu pak "jen" 48,3 km/h), 2 rychlosti vzad, otočení na místě a neutrál. Maximální rychlost při jízdě zpět je 40 km/h. Existuje několik verzí tohoto tanku a probíhají modernizace již vyrobených kusů. [13]

**Silniční vozidla:** Jako příklad silničního automobilu s využitím spalovací turbíny bych uvedl koncept C-X75 značky Jaguar. Toto supersportovní kupé, které vzniklo na oslavu 75. výročí značky, pohání čtveřice elektromotorů, z nichž každý pohání jedno kolo a má výkon 145 kW. Celkový výkon elektromotorů je tedy 580 kW a maximální točivý moment má hodnotu 1 600 N.m. Elektrickou energii dodávají lithium-iontové akumulátory s kapacitou 19,6 kWh, jejichž hmotnost je 230 kg. Dojezd čistě na elektrickou energii je okolo 110 km. Pro zvýšení dojezdu až na 900 km slouží dvojice turbín, jejichž otáčky jsou až 80 000 ot.min<sup>-1</sup>. Celkový výkon těchto dvou turbín poskytuje výkon 140 kW. Prostřednictvím generátorů tyto spalovací turbíny, z nichž

každá váží 25 kg, dobíjejí akumulátory. Jaguar C-X75 akceleruje z 0 na 100 km/h za 3,4 s a maximální rychlost tohoto vozu je 330 km/h. [8]

**Obr. 8 Jaguar C-X75**



Zdroj: [8]

Dalším příkladem pohonu silničního vozidla spalovací turbínou je nyní jednostopý stroj. Jedná se o motocykl MTT Y2K Superbike. Je to první, pro provoz homologovaný, turbínou poháněný motocykl. Srdcem stroje je naftový motor Rolls Royce Allison 250, jenž se používá pro pohon vrtulníků. Výkon tohoto motocyklu je více než 130 kW při 52 000 ot.min<sup>-1</sup>, výstupní otáčky jsou 6 000 ot.min<sup>-1</sup> a točivý moment 576 N.m při 2 000 ot.min<sup>-1</sup>. Pohon zajišťuje převodovka, která je pouze dvoustupňová a je možné manuální i automatické provedení. Zrychlit z 0 na 365 km/h dokáže tento motocykl za 15 sekund a maximální rychlostí je více než 400 km/h. [9]

**Obr. 9 Motocykl MTT Y2K**



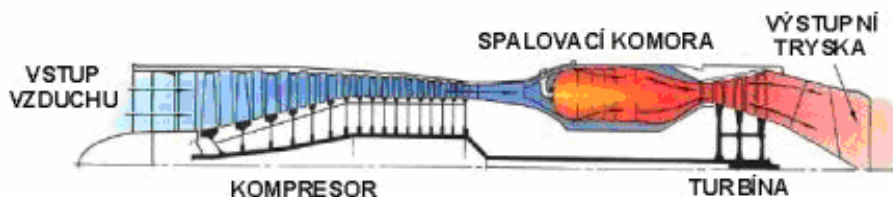
Zdroj: [<http://www.virginmedia.com>]

### 3.7.4 Spalovací turbína pro pohon letadel

Proudové motory mají méně pohyblivých součástí než pístové motory, z čehož vyplývá jejich snadnější údržba a menší poruchovost. Vyzívají se především k pohonu letadel. Hromadně se v letectví prosadily v 60. letech, kde umožnily zrychlení a zlevnění dopravy. [14]

**Turbokompresorový motor** (TK, jednoproudový, turbojet) je "nejjednodušší" turbínový motor. Zjednodušeně řečeno se skládá pouze z generátoru plynu a vhodné trysky. Vzduch je nasáván vstupním ústrojím, v kompresoru je stlačen, ve spalovací komoře je mu při konstantním tlaku dodána tepelná energie. Na rozváděcím kole turbíny (statoru) je část tepelné energie převedena na energii kinetickou. Rychle proudící plyny předávají svou energii turbíně, pohánějící kompresor. Tlak za turbínou je ještě vysoký a tak jsou plyny vedeny do výstupní trysky, která část zbývající energie převede na energii kinetickou – rychle vystupující plyny z motoru vyvozují vlastní tah. Nadzvukové letouny mají motory s přídavným spalováním. [15]

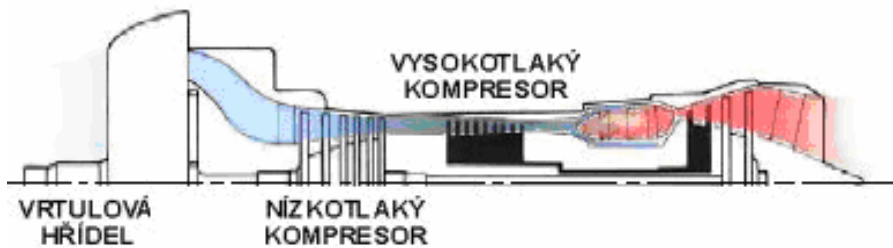
**Obr. 10 Turbokompresorový motor**



Zdroj: [15]

**Turbovrtulový motor:** Jednoproudové motory pracují při nízké rychlosti letu s nižší účinností, proto pro pomalé letouny vznikly motory turbovrtulové (TV, turbo-prop). Generátor plynu zůstává zachován jako u předchozího typu, ale byl přidán reduktor otáček a vrtule. Vrtule (přesněji jen reduktor) je poháněna buď stávající nebo vlastní turbínou. Je snaha o to, aby turbíny využily veškerou energii spalin, protože tah není vyvoláván proudem horkého plynu, ale vrtulí urychleným vzduchem. Tlak za turbínou tak klesá až na hodnotu tlaku atmosférického. Tyto motory stále jsou a budou to nejlepší pro řadu dnešních a budoucích letounů, u kterých není prioritou vysoká rychlost, ale ekonomičnost provozu. [15]

**Obr. 11 Turbovrtulový motor**



Zdroj: [15]

**Turbohrádelový motor** je obdoba turbovrtulového motoru s tím rozdílem, že k němu není přímo napojena vrtule, ale z převodovky (reduktoru otáček) vystupuje jen hřídel, na kterou se až v konkrétní aplikaci napojují hnací ústrojí – rotory vrtulníků. Turbohrádelové motory (TH, turbo-schaft) se objevily v době počátku rozvoje moderních vrtulníků – koncem 50. let. [15]

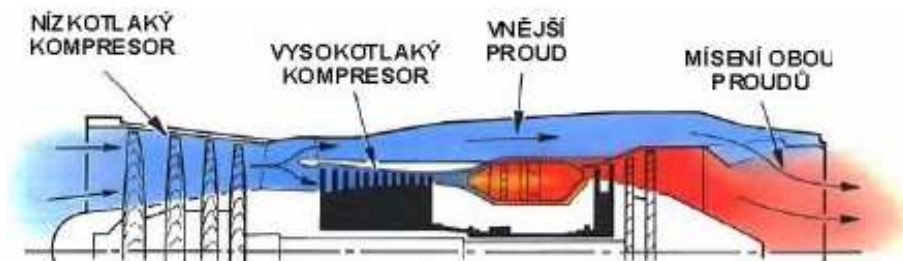
**Obr. 12 Turbohrádelový motor**



Zdroj: [15]

**Turbodmychadlový motor** (TD, dvouproudový, turbofan, by-pass jet engine) kombinuje ekonomičnost provozu turbovrtulových motorů při nízkých rychlostech s efektivností provozu turbokompresorových motorů při vyšších rychlostech. Generátor plynu zůstává stejný, je však přidán nízkotlaký kompresor a turbína. Činnost motoru je podobná jako u turbokompresorového. Za první turbínou, pohánějící vysokotlaký kompresor, je umístěna druhá turbína, využívající část zbývající energie plynu k pohonu nízkotlakého kompresoru. Nízkotlaký kompresor je umístěn před generátorem plynu. Část vzduchu z nízkotlakého kompresoru proudí do jádra motoru, zbývající část stlačeného vzduchu protéká kolem jádra a ve výstupní trysce je urychlena, čímž je vyvozen tah. v mnoha případech bývají TD motory vybaveny přídatným spalováním. [15]

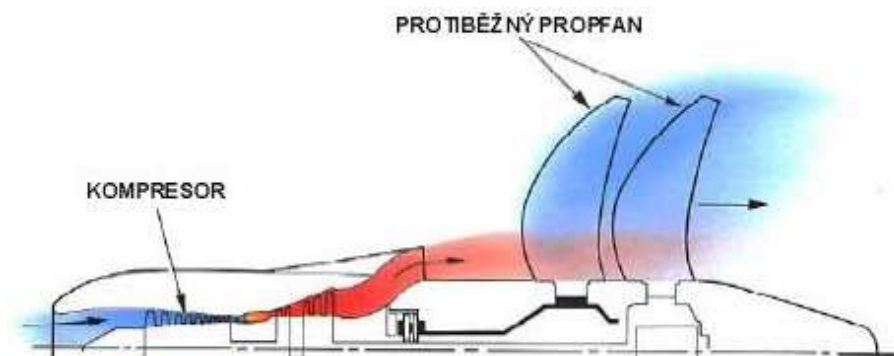
**Obr. 13 Turbodmychadlový, dvouhřídelový motor**



Zdroj: [15]

**Propfan** je další variací dvouproudového a turbovrtulového motoru, ale je ještě efektivnější. Jeho efektivnost je do 500 km/h stejná jako u turbovrtulových motorů a dokonce i za touto rychlostí roste, největší je při rychlosti okolo 900 km/h, což je mezní rychlost provozu tohoto typu motoru. Díky těmto velice příznivým vlastnostem se propfany (stejně jako předchozí motory s protiběžným dmychadlem) stávají ideální náhradou starších turbodmychadlových a turbovrtulových motorů třeba u civilních a transportních letounů. Propfany (od slova prop – vrtule a fan – dmychadlo) mají nezvykle široké listy. Jsou poháněny jednou turbínou, obě vrtule se díky reverzoru točí proti sobě. [15]

**Obr. 14 Propfan s protiběžnými vrtulemi**



Zdroj: [15]

### 3.7.5 Spalovací turbína pro pohon lodí

Plynové turbíny se podobně jako parní používají pro pohony lodí. Většinou nahrazují pístové spalovací motory tam, kde je potřebné rychlé zvýšení výkonu mimo obvyklé zatížení, proto se často vyskytují u vojenských plavidel již od 60. let 20. století. Pohon lodního šroubu je buď přímo hřídelí přes převodovku, nebo častěji turbína pohání elektrický generátor a lodní šrouby jsou poháněny elektromotory. [6]



**Queen Marry 2** je jedna z největších lodí světa s délkou 345 m a výtlakem 150 000 BRT. Její pohon je tvořen kombinací pístových spalovacích motorů a dvěma jednotkami se spalovací turbínou LM2500. Tyto jednotky vyrábí elektřinu, která slouží k pohonu lodních šroubů elektrickými motory umístěnými v gondolách mimo trup lodi. Celkový výkon pohonu je 117,2 MW, z toho dvě jednotky LM2500 dodávají 50 MW. LM2500 je tvořen aeroderivátem odvozeným z leteckého motoru GE CF6–6 o tahu 234 kN, který je například používán u Boeingu 747. Turbína s generátorem jsou umístěny ve speciálním kontejneru, který je odhlučněn a zároveň konstruován pro utlumení vibrací. Průtočné části turbíny jsou z materiálu odolávajícím koroznímu prostředí nasávaného mořského vzduchu. Jednotky LM2500 jsou umístěny v nadpalubní části lodi blízko sání vzduchu a výfuku. Těžší klasické spalovací motory jsou umístěny pod těžištěm lodi. [6]

**Obr. 15 Výletní loď Queen Marry 2**



Zdroj: [<http://www.smittenbybritain.com>]

### **3.8 Technologické procesy se spalovací turbínou**

Spalovací turbíny se uplatnily i při řešení energetické rovnováhy řady technologických procesů, např. v hutích, v chemickém průmyslu i jinde. Zejména procesy pracující s tlakovým vzduchem vyžadují pro jeho kompresi často značné příkony, takže je z hlediska hospodárnosti naopak nezbytné využívat tepelné

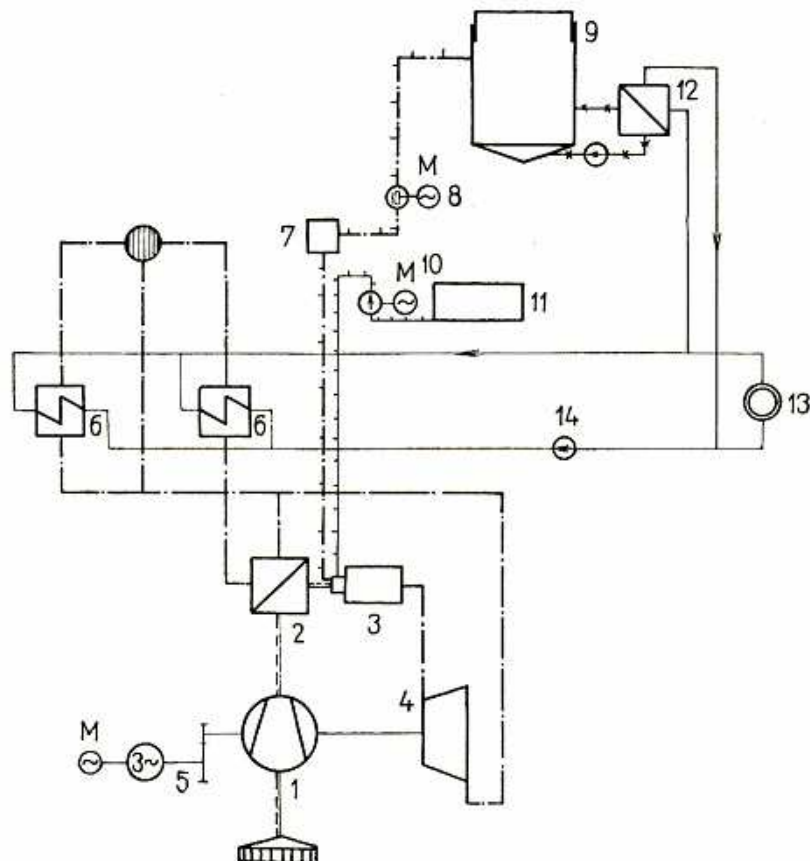
i potenciální energie koncových plynů procesu expanzí v turbíně. Pokud je produktem procesu ještě výhřevný plyn vhodný pro spalování ve spalovací komoře, jsou dány podmínky pro účelné začlenění oběhu spalovací turbíny do technologického procesu, jímž lze dosáhnout z větší části i energetické soběstačnosti výroby. Přestože je snaha využívat typových soustrojí, individuální podmínky vazby spalovací turbíny s jednotlivými procesy vyžadují často úpravy, popř. další přídatná zařízení. [1]

### **3.8.1 Teplárna čistící stanice odpadních vod se spalovací turbínou na kalový plyn**

Na obrázku 16 je uvedeno zjednodušené schéma průmyslové teplárny se spalovací turbínou v čistící stanici odpadních vod. Produktem technologického procesu čistírny je kalový plyn o výhřevnosti  $22\,000\text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ , jenž slouží jako palivo pro spalovací turbínu. Odpadního tepla ze spalovací turbíny se využívá k ohřevu kalu ve vyhřívacích nádržích na optimální teplotu vyžadovanou biologickým procesem. Elektrická energie slouží k pohonu provzdušňovacích dmýchadel, dopravních čerpadel a ostatního technologického zařízení. Dodávku tepla do technologického oběhu lze zvýšit obtokem regeneračního výměníku až asi 2,5–3krát. Dvoupalivový systém spalovacích komor umožňuje provoz i při přechodném nedostatku plynu. [1]

**Obr. 16 Schéma zapojení teplárny čistící stanice odpadních vod se spalovací turbínou na kalový plyn**

1 kompresor, 2 výměník spaliny – vzduch, 3 spalovací komora, 4 turbína, 5 elektrický alternátor, 6 ohřívák spaliny – voda, 7 vyrovnávací plynojem, 8 pístový kompresor na kalový plyn, 9 vyhřívací nádrž, 10 palivové čerpadlo, 11 nádrž pomocného kapalného paliva, 12 výměník horká voda – kal, 13 spotřebič tepla, 14 oběhové čerpadlo



Zdroj: [1]

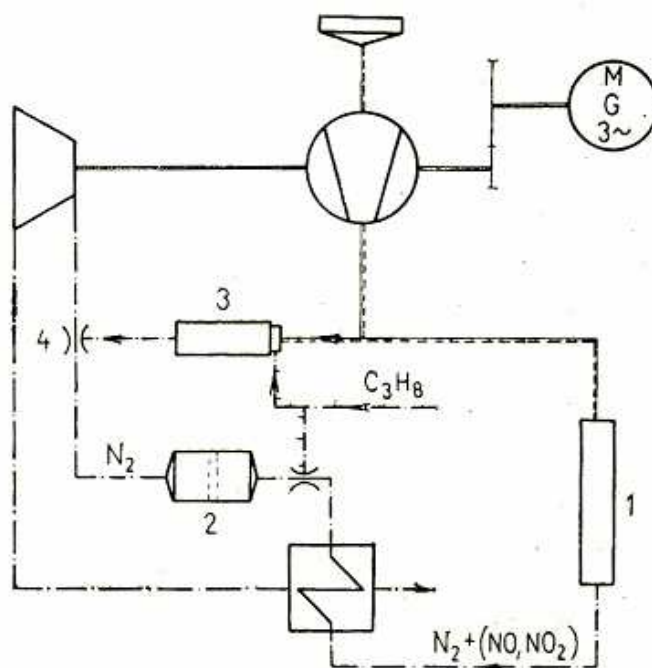
### 3.8.2 Výroba kyseliny dusičné

Příkladem velmi těsné vazby spalovací turbíny s technologickým procesem je její aplikace ve středotlakých výrobnách kyseliny dusičné. Jak je patrné z obr. 17, kompresor dodává soustrojí tlakový vzduch do technologie (přibližně 5 t vzduchu/1t HNO<sub>3</sub> 100%), z níž vystupují tlakové koncové plyny s obsahem 0,2 až 0,5 % objemu jedovatých oxidů dusíku NO<sub>x</sub>. Z hygienických důvodů je nutno plyny čistit katalytickou redukcí ve speciálním reaktoru. Uvolněným teplem se koncový plyn ohřeje, takže expanze v turbíně stačí zhruba pokrýt potřebný výkon vzduchového

kompresoru. Výkonová rovnováha soustrojí, jež během roku kolísá v závislosti na teplotě nasávaného vzduchu, se vyrovnává motorgenerátorem. Předností uvedeného zařízení je zneškodnění jedovatých exhalací na úroveň připouštěnou hygienickými předpisy za současného účelného využití odpadní energie, odváděného z tlakového technologického procesu. [1]

**Obr. 17 Schéma zapojení spalovací turbíny do technologického oběhu výroby kyseliny dusičné**

*1 technologické zařízení výroby  $HNO_3$ , 2 katalytický reaktor, 3 pomocná spalovací komora, 4 mísič*



Zdroj: [1]

### 3.8.3 Sušení soli chloridu draselného spalinami ze spalovací turbíny

Chlorid draselný je v čistém stavu bílá krystalická látka, slané chuti, dobře rozpustná ve vodě. V přírodě se vyskytuje jako minerál sylvín a používá se k výrobě draselných hnojiv. Spalovací turbína je použita k výrobě elektrické energie a k sušení vlhké soli KCl odcházejícími spalinami z turbíny. Schéma technologie je na obr. 18, odkud je vidět, že v technologii jsou použity celkem 3 spalovací komory, z nichž SK1 je spalovací komora vlastní spalovací turbíny, SK2 je přihřívací spalovací komora ve výstupním spalinovém traktu spalovací turbíny (v podstatě mřížkový hořák) a SK3 je

spalovací komora autonomního ohřívacího systému, který pracuje pouze při odstavené spalovací turbíně. Důležitou součástí uvedené technologie je i rotační vysoušecí buben, kam vstupuje vlhká vstupní směs KCl, obsahující 91,5 % soli KCl a 8,5 % vody a vystupuje vysušená sůl o teplotě cca 70 °C a vychlazené spaliny o teplotě cca 100 °C. [16]

K vysoušení vlhké soli KCl se nevyužívá plný průtok vystupujících spalin z turbíny, nýbrž pouze její část (viz příloha č. 1), která je pomocí spalinových klapek zavedena do spalovací komory SK2, ohřátá na teplotu 950 °C a pak zavedena do rotačního vysoušecího bubnu. Zbývající spaliny jsou pak zavedeny do parního spalinového kotle, vyrábějící sytou vodní páru a horkou užitkovou vodu nebo obtokem do volné atmosféry. Odcházející spaliny z technologie, tj. jak vychlazené spaliny z bubnu, tak i spaliny ze spalinového kotle jsou monitorovány z hlediska emisí NO<sub>x</sub> a CO a musí splňovat normou předepsané hodnoty. [16]

### **3.8.4 Výroba elektrické energie z odpadního tepla, která vzniká při výrobě ferosilicia**

Ferosilicium (FeSi) je předslitina z křemíku, železa a cca 1–2 % hliníku a vápníku a používá se k výrobě ocelí a litin. Obvykle jsou na trhu slitiny FeSi s obsahem 15, 45, 75 a 90 % křemíku, zbytek pak tvoří železo a cca 2 % jiné prvky jako hliník a vápník. Křemík přitom hraje v metalurgii ocelí důležitou roli, neboť kromě toho, že má deoxidační vlastnosti je i důležitým legujícím prvkem při výrobě žárupevných ocelí. Ferosilicium se vyrábí buď v kysele vyzdřených nebo v elektrických pecích při vysokých teplotách. Bod tání ferosilicia je totiž 1 210 až 1 380 °C v závislosti na obsahu křemíku. Je proto pochopitelné, že při tomto technologickém procesu vzniká i značné množství tepelné energie, která je doposud úplně ztracená nebo jen částečně využita. V našem případě bylo stanoveno, že pro využití technologického tepla, vznikajícího při výrobě ferosilicia, bude použita jednohřídelová spalovací turbína s otevřeným oběhem tak, jak je schematicky znázorněno v příloze č. 2. Z obrázku je patrné, že použitá spalovací turbína má všechny komponenty, které jsou standardně používané u stroje tohoto typu, tj. sací filtr, kompresor, spalovací komora, turbína, výfukový trakt, převodovka a elektrický generátor. Paralelně se spalovací komorou je

zapojena i elektrická pec, která spolu se spalovací komorou reprezentují ty komponenty, pomocí kterých je do pracovního cyklu přiváděno teplo. [16]

Atmosférický vzduch je kompresorem nasáván přes filtr a stlačován na tlak cca 12 bar a veden přes rekuperátor do pece, kde se ohřívá na teplotu  $t_6=750$  až  $850$  °C. Menší část zkomprimovaného vzduchu (12 % až 18 %) je zavedena do malé spalovací komory, ve které se spaluje zemní plyn, přičemž v primární zóně spalovací komory teplota spalin dosahuje hodnoty až  $1\,500$  °C. Vzniklé spaliny se pak míchají ve směšovací komoře s ohřátým vzduchem z pece tak, aby výsledná teplota spalin dosahovala hodnoty  $t_3 = 980$  °C a po smíchání s chladícím vzduchem  $m_{CH_3}$  hodnoty  $t_{3L} = 950$  °C, což je jmenovitá teplota spalin před turbínou u použité spalovací turbíny. Spaliny pak expandují v turbíně, čímž se získává na svorkách generátoru výkon cca  $2\,500$  kW. Spaliny po expanzi odchází výfukovým traktem do volné atmosféry s emisemi, které musí splňovat přísné emisní normy platné pro spalovací turbínu ( $75$  mg/Nm<sup>3</sup> NO<sub>x</sub>,  $100$  mg/Nm<sup>3</sup> CO). Další spaliny o složení CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> vznikají v peci a po vychlazení a odprášení odchází rovněž do volné atmosféry. Mezní emisní hodnoty jsou však pro metalurgické provozy podstatně větší než u spalovacích turbín ( $400$  mg/Nm<sup>3</sup> NO<sub>x</sub>,  $1\,000$  mg/Nm<sup>3</sup> CO,  $250$  mg/Nm<sup>3</sup> SO<sub>2</sub>,  $50$  mg/Nm<sup>3</sup> TZL-tuhé znečišťující látky). [16]

Navržená technologie však může pracovat i bez zapálené spalovací komory, tj. se zavřenými armaturami V1 a V2. V tomto případě úlohu nositele tepla do cyklu plně přebírá pec, ve které se pracovní látka (čistý vzduch) ohřívá na teplotu  $t_6=750$  °C až  $850$  °C. Jelikož jmenovitá teplota pracovní látky na vstupu do turbíny je vyšší ( $t_{3L} = 950$  °C), získáváme na svorkách generátoru v tomto případě menší výkon, který dosahuje hodnot cca  $P_{SV}=650$  až  $1\,600$  kW. Na druhé straně nasávaný průtok axiálním kompresorem, který pro chlazení pece hraje důležitou roli, se mění z důvodu strmé charakteristiky kompresoru jen velmi málo a dosahuje hodnoty  $16,5$  kg/s. [16]

Režim práce s nezapálenou spalovací komorou, avšak s otevřeným regulačním ventilem V1, se použije při startování spalovací turbíny. Startování spalovací turbíny se provádí vždy až po uvedení vlastní technologie výroby ferosilicia do provozu, které trvá nepoměrně déle (až 2 dny), než startování spalovací turbíny (několik minut). Regulovaný průtok (armaturou V1) stlačeného vzduchu nezapálenou spalovací komorou

bude nyní sloužit k nastavení vstupní teploty do turbíny tak, aby přebytek výkonu na spojce turbíny byl pouze tak malý, aby plynule roztáčet rotorový systém (po odpojení startovacího motoru) až do okamžiku, kdy jsou dosaženy synchronní otáčky generátoru, při kterých lze generátor připojit do elektrické sítě. [16]

### **3.8.5 Kogenerační způsoby zapojení spalovacích turbín**

Při výrobě elektřiny spalováním fosilních paliv nebo biomasy vždy vzniká teplo. Principem kogenerace, tj. kombinované výroby tepla a elektrické energie, je toto teplo využít a zvýšit tak účinnost využití paliv. Při výrobě elektřiny v současných velkých tepelných (uhelných a jaderných) elektrárnách se využije zhruba 32 % energie obsažené v palivu, zbytek bez užitku odchází do vzduchu chladicími věžemi. Na druhé straně u nás existují tisíce městských výtopen a větších kotelen, které z uhlí vyrábějí pouze teplo, ačkoli by mohly zároveň produkovat i elektřinu. [3]

V teplárnách a jiných kogeneračních zařízeních, kde se teplo vyrábí společně s elektřinou, je spotřeba paliv na jednotku vyrobené energie nižší. Tomu odpovídá i snížení emisí škodlivin v globálním měřítku. Kogeneraci lze velmi dobře využít ke zvýšení efektivity malých zdrojů a k decentralizaci výroby elektřiny, která s sebou nese také snížení ztrát v elektrorozvodné síti a vyšší bezpečnost dodávek – výpadek jednoho menšího zdroje nemá významný vliv. [3]

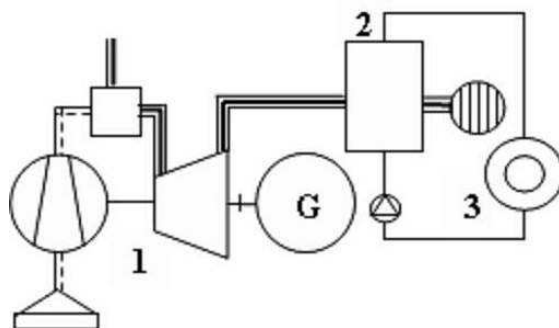
Kogenerační jednotka se spalovací turbínou se skládá ze soustrojí spalovací turbína – generátor vyrábějícího elektřinu a ze spalínového kotle. Spaliny z turbíny jsou přiváděny do spalínového kotle k výrobě tepla ve formě páry nebo horké resp. teplé vody. Při požadavku na zvýšení tepelného výkonu spalínového kotle je instalován tzv. dohořivací (přihřívací) hořák na zemní plyn, který je vřazen do spalín proudících z turbíny do kotle – spaliny používá jako okysličovadlo a zvyšuje jejich teplotu z cca 450-600 °C na maximální teplotu 900 °C. Hlavní výhodou kogeneračních jednotek se spalovací turbínou proti jednotkám se spalovacím motorem je možnost volby média, kterým je odváděno teplo ze spalínového kotle. Kogenerační jednotky se spalovacími turbínami se dodávají o elektrickém výkonu v rozsahu od cca 1 MW do 200 MW. [3]

Stupeň konverze energie obsažené v primárním palivu na elektřinu je oproti parní kogeneraci podstatně vyšší, cca 23–41%, účinnost výroby tepla je cca 35–57 %. Celková účinnost využití energie v palivu činí cca 68–90 %. Cenou za vyšší podíl vyráběné elektřiny je ale nutnost spalování plynného paliva, většinou drahého zemního plynu. [3]

Základní příklady kogeneračního zapojení spalovacích turbín jsou patrné na obr. 18 a obr. 19. Kotle na odpadní teplo mohou být teplovodní, horkovodní nebo parní. [4 str. 28]

**Obr. 18 Princip kogeneračního zapojení spalovací turbíny**

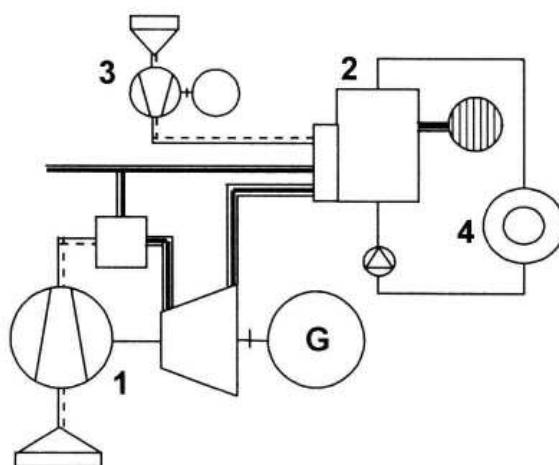
*1 spalovací turbína, 2 kotol na odpadní teplo, 3 spotřebič tepla*



Zdroj: [4]

**Obr. 19 Princip kogeneračního zapojení spalovací turbíny s přitápěním**

*1 spalovací turbína, 2 kotol na odpadní teplo s přitápěním, 3 ventilátor pro přidavný vzduch, 4 spotřebič tepla*



Zdroj: [4]



### 3.8.6 Provedení tepláren se spalovacími turbínami

Při návrhu teplárny se spalovacími turbínami je nutno respektovat požadavek spolehlivosti dodávky tepla během topného období. Teplárna musí zabezpečovat dodávku tepla pro vytápění při výpadku největší instalované jednotky ve výši potřeby tepla při průměrné venkovní teplotě nejchladnějšího měsíce v roce a rovněž musí pokrývat nutné technologické potřeby. Jedná-li se o samostatný tepelný zdroj, lze tento požadavek splnit doplněním tepelného zdroje dvěma až třemi klasickými kotelními jednotkami na zemní plyn nebo instalací více kogeneračních jednotek se spalovacími turbínami a kotli na odpadní teplo s přitápěním. [4]

U malých teplárenských zdrojů se volí obvykle první z uvedených možností, vzhledem k tomu, že měrné investiční náklady malých spalovacích turbín velmi rychle rostou při zmenšování jmenovitého výkonu a současně se výrazně snižuje jejich účinnost. Základními technologickými bloky teplárny se spalovacími turbínami jsou vlastní turbosoustrojí na základovém rámu včetně elektrického generátoru a budiče (na stavbu je dopravováno v kompletním smontovaném stavu); blok pomocných zařízení (olejové hospodářství, čerpadla); blok chlazení (chlazení oleje popř. generátoru) a to nejčastěji v provedení se vzduchovým chladičem; blok sacího traktu, obsahující žaluzie, filtry, tlumiče hluku; blok výstupního traktu (výstupní spalinové potrubí, odtok spalin přímo do atmosféry, uzavírací klapky, tlumič hluku); blok základního silnoproudého zařízení (vývod elektrického výkonu, tyristorová regulace, spouštěcí zařízení); kotel na odpadní teplo včetně komína; plynové kotle vč. hořáků a komínů; zařízení úpravy napájecí a doplňovací vody; systém řízení a regulace vč. dozorny s centrálním počítačem; plynová regulační stanice a vnější elektrotechnické zařízení (transformátor, napojení na rozvodnou síť). [4]

Soustrojí spalovací turbíny se umísťují nejčastěji do lehkého přenosného krytu s ventilací a akustickou ochranou. Kotle na odpadní teplo bývají ve venkovním nebo polovenkovním provedení (viz příloha č. 3). Pokud jsou spalovací turbíny instalovány v budově, pak na základním podlaží bez podsklepení a s co nejjednodušší stavební konstrukcí. [4]

### 3.8.7 Paroplynová elektrárna

Paroplynová elektrárna je technologické zařízení, které využívá zemní plyn pro získání tepelné a elektrické energie. Tato cesta výroby energie je čistější, než v uhelné elektrárně, protože se neprodukuje žádné emise oxidů síry či prachu, navíc jsou z hlediska emisí oxidu uhličitého považovány za nízkoemisní zdroje. Principem je spalení zemního plynu v plynové turbíně, ta vyrobí první část energie a vzniklé horké spaliny ještě vyrobí páru v kotli, podobně jako v uhelné elektrárně. Tato dvojitá výroba podstatně zvyšuje dosahovanou čistou účinnost paroplynového cyklu, tato garantovaná účinnost je 57,4 %. [21, 22, 23]

Paroplynová elektrárna je ve světě velmi užívaný ekologický zdroj výroby elektrické energie a má několik výhod. Mimo jiné dokáže stejně tak jako například vodní elektrárna velmi rychle naběhnout do špičkového výkonu. Elektrárna také rozšíří portfolio výroby elektřiny s vysokou účinností. Neméně významným hlediskem je energetická bezpečnost, kterou můžeme dosáhnout jen diverzifikací zdrojů, a to jak z hlediska zemí, ze kterých zdroje energie dovážíme, tak i rozhodnutím v jakých typech elektráren budeme elektřinu vyrábět. Výroba elektřiny ze zemního plynu je v ČR zatím na minimální úrovni, tímto způsobem se v současnosti vyrobí jen cca 1,5 % elektřiny ročně. [21, 22]

## 4. Závěr

Za posledních 5 let se celosvětová energetická síť rozrostla řádově o stovky nových paroplynových zařízení (včetně těch ve výstavbě) a celkový počet instalovaných jednotek o výkonu nad 400 MW jde do tisíců. Vedoucím tandemem v instalaci nových paroplynových zařízení jsou USA a Japonsko, v Evropě jsou průkopníky především Itálie, Španělsko a Velká Británie. Nejnákladnější částí paroplynových zařízení je spalovací turbína. Dlouhodobě je jedním z hlavních témat zvyšování teploty spalin na vstupu do spalovací turbíny. Očekává se postupné zvyšování na 1 500 °C během příštích pěti let a tím i zvýšení čisté tepelné účinnosti paroplynového oběhu na 60 %.

[21]

Energetická společnost ČEZ v pátek 25. března 2011, slavnostně zahájila výstavbu paroplynové elektrárny v Počeradech. Jedná se o první velkou elektrárnu v ČR, která bude spalovat zemní plyn. Uhelná elektrárna v Počeradech ze sedmdesátých let 20. století má výkon 1 000 MW, nová na zemní plyn, která vyroste v jejím areálu, bude mít výkon 840 MW. „Vývoj v energetice směřuje k nízkoemisním či zcela bezemisním zdrojům, právě plynové elektrárny do nich můžeme zahrnout. Jsou vysoce ekologickým zdrojem pro výrobu elektřiny, které svým provozem příliš neovlivňují životní prostředí. Díky nejnižším nákladům na instalovanou megawattu, krátké době realizace a vysoké tepelné účinnosti jsou paroplynové elektrárny výrazně zvýhodněny oproti ostatním zdrojům na fosilní paliva,“ říká na toto téma Martin Roman, předseda představenstva a generální ředitel ČEZ. Tento druh výroby elektřiny totiž v České republice není významně zastoupen, ze zemního plynu se v Česku ročně v současnosti vyrobí jen cca 1,5% elektřiny. Velkou výhodou projektu je i skutečnost, že nový zdroj se postaví v areálu současné elektrárny a jen minimálně ovlivní stávající uhelnou elektrárnu. Předpokládá se, že nová elektrárna bude ve 100 % výkonu provozována pouze v pracovní dny od 6 do 22 hodin. O víkendech a v nočních hodinách bude paroplynový cyklus odstaven. První elektřinu by pak elektrárna mohla vyrobit již v červnu 2013. [21, 22]

Je zřejmé, že spalovací turbíny se v poslední době rozšířily všude tam, kde se mohou uplatnit jejich výhody, například nízký obsah škodlivin ve spalinách, vysoká

pravidelnost chodu a malá nevyváženost, poměrně snadná startovatelnost za všech podmínek, nízká hmotnost v poměru k výkonu a s růstem teplot a tlaků i vysoká účinnost. Spalovací turbína není dokonalý stroj a bohužel má i svá slabá místa a nevýhody. Kupříkladu vyšší měrná spotřeba paliva z důvodu nízkých teplotních spádů, vysoké tepelné namáhání lopatek a z toho vyplývající jejich nižší životnost, včetně vyšší hlučnosti celého soustrojí.

Domnívám se, že bez sestrojení spalovací turbíny, jejího využití a souvisejících technologických procesů by byl moderní svět jiný, než jaký jej známe dnes. Je zřejmé, že spalovací turbína má pro svou užitečnost, všestrannost a spolehlivost značný potenciál širokého využití inspirujícího další generace.

## 5. Seznam použité literatury

- [1] KOUSAL, Milan. *Spalovací turbíny*. Vydání druhé. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1980. 624 s.
- [2] KRBEK, Jaroslav. *Tepelné turbíny a turbokompresory*. Třetí vydání. Brno: Rektorát Vysokého učení technického v Brně, 1990. 241 s. ISBN 80-214-0236-9.
- [3] EkoWATT. EkoWATT [online]. 2007 [cit. 2011-04-04]. Kombinovaná výroba elektřiny a tepla. Dostupné z WWW:  
<<http://www.ekowatt.cz/cz/informace/kombinovana-vyroba-elektriny-a-tepla>>.
- [4] KRBEK, Jaroslav; POLESNÝ, Bohumil. *Kogenerační jednotky: Zřízení a provoz*. 1. vydání. Praha: GAS s.r.o., 2007. 201 s. Dostupné z WWW:  
<[http://www.mpo-efekt.cz/upload/7799f3fd595eeee1fa66875530f33e8a/Kogeneracni\\_jednotky\\_zri\\_zovani\\_provoz\\_2220047233.pdf](http://www.mpo-efekt.cz/upload/7799f3fd595eeee1fa66875530f33e8a/Kogeneracni_jednotky_zri_zovani_provoz_2220047233.pdf)>. ISBN 978-80-7328-151-9.
- [5] VECHET, Stanislav. *Kompresory*. [online]. Brno, 1999 [cit. 2011-04-04]. Dostupné z WWW:  
<<http://www.umt.fme.vutbr.cz/~svechet/main/storage/vp2/kompresory.pdf>>.
- [6] ŠKORPÍK, Jiří. *Transformační technologie* [online]. 2010 [cit. 2011-04-04]. Tepelná turbína a turbokompresor. Dostupné z WWW:  
<<http://oei.fme.vutbr.cz/jskorpik/tepelna-turbina-a-turbokompresor.html>>. ISSN 1804–8293.
- [7] ŠUROVSKÝ, Jan. *Mikroturbína: Energetická revoluce pro 21. století*. 1. vydání. Praha: Instalace Praha, 2003. 220 s.
- [8] PAVLŮSEK, Ondřej. Jaguar C-X75: Čtyři elektromotory a dvě turbíny. *AUTO CZ* [online]. 2010-10-04, 10/2010, [cit. 2011-04-04]. Dostupný z WWW:  
<<http://www.auto.cz/jaguar-c-x75-ctyri-elektromotory-a-dve-turbiny-51744>>.

- [9] MTT – Y2K: motorka s motorem z vrtulníku. *MZONE: Magazín nejen pro muže* [online]. 2010-01-31, 01/2010, [cit. 2011-04-04]. Dostupný z WWW: <<http://www.mzone.cz/2010/01/auto-moto/mtt-y2k-motorka-s-motorem-z-vrtulniku/>>.
- [10] *Stránky o prototypch a lokomotivních unikátech v ČR a SR* [online]. 2006-09-17 [cit. 2011-04-04]. Řada TL659.0 ČSD. Dostupné z WWW: <<http://www.prototypy.cz/?rada=TL659.0>>.
- [11] LITOMYSKÝ, Petr. *Litomyský* [online]. 2001 [cit. 2011-04-04]. Turbínovky UP. Dostupné z WWW: <<http://www.litomysky.cz/drahy/lokoUSAturb.htm>>.
- [12] LITOMYSKÝ, Petr. *Litomyský* [online]. 2001 [cit. 2011-04-04]. JetTrain. Dostupné z WWW: <<http://www.litomysky.cz/drahy/lokoUSABomjet.htm>>.
- [13] BÉZA, Michal. *MILITARY.CZ* [online]. 2001 [cit. 2011-04-04]. M1A1/2 Abrams. Dostupné z WWW: <[http://www.military.cz/usa/armour/tanks/m1\\_abrams/M1-Abrams.htm](http://www.military.cz/usa/armour/tanks/m1_abrams/M1-Abrams.htm)>.
- [14] DRAGON, Adam. *Ing. Adam Dragon: Školní výukové web* [online]. 2005 [cit. 2011-04-04]. Proudové motory. Dostupné z WWW: <[http://dragon.web2001.cz/fyzika/tepelnestroje/proudove\\_motory.htm](http://dragon.web2001.cz/fyzika/tepelnestroje/proudove_motory.htm)>.
- [15] KUSSIOR, Zdeněk. *LeteckeMotory.cz* [online]. 2002 [cit. 2011-04-04]. Typy leteckých motorů. Dostupné z WWW: <<http://leteckemotory.cz/teorie/teorie-02.php>>.
- [16] TÓTH, Alexander. Některé způsoby využití spalovacích turbín ve speciálních technologiích. In: *Dny kogenerace 2009*, Cogen-Czech, Praha, 2009.
- [17] *The American Railroads: a Long and Storied History* [online]. 2007 [cit. 2011-04-04]. The Union Pacific's Gas Turbine Locomotive Fleet. Dostupné z WWW: <<http://www.american-rails.com/gas-turbine-locomotive.html>>.
- [18] ADAM, Tomáš. *Fronta.cz* [online]. 2005-06-11 [cit. 2011-04-04]. Co předcházelo použití proudových motorů v letadlech. Dostupné z WWW: <<http://www.fronta.cz/co-predchazelo-pouziti-proudovych-motoru-v-letadlech>>.

- [19] BROŽ, Vladislav. *JET-CONTROL* [online]. 2003 [cit. 2011-04-04]. MODEL Y SE SPALOVACÍMI TURBINAMI-01. Dostupné z WWW: <<http://jetcontrol.wz.cz/turb01.html>>.
- [20] Spalovací turbína. In *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida): Wikipedia Foundation, 2006-11-25, last modified on 2011-04-03 [cit. 2011-04-04]. Dostupné z WWW: <[http://cs.wikipedia.org/wiki/Spalovací\\_turbína](http://cs.wikipedia.org/wiki/Spalovací_turbína)>.
- [21] v Počeradech začala výstavba paroplynové elektrárny. *All for Power* [online]. 2011-03-28, 1/2011, [cit. 2011-04-04]. Dostupný z WWW: <<http://www.allforpower.cz/clanek/v-poceradech-zacala-vystavba-paroplynov-elektrarny>>.
- [22] KINŠT, Petr. v Počeradech slavnostně začala výstavba nové paroplynové elektrárny. *Deník.cz* [online]. 2011-03-25, [cit. 2011-04-04]. Dostupný z WWW: <[http://zatecky.denik.cz/zpravy\\_region/elektrarna\\_paroplyn\\_pocerady\\_20110325.html](http://zatecky.denik.cz/zpravy_region/elektrarna_paroplyn_pocerady_20110325.html)>.
- [23] Paroplynová elektrárna. In *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida): Wikipedia Foundation, 2011-03-29, last modified on 2011-04-03 [cit. 2011-04-04]. Dostupné z WWW: <[http://cs.wikipedia.org/wiki/Paroplynová\\_elektrárna](http://cs.wikipedia.org/wiki/Paroplynová_elektrárna)>.
- [24] KOCÁB, Jindřich; ADAMEC, Josef. *Letadlové motory*. Vydání I. Praha: KANT cz s.r.o., 2000. 176 s. ISBN 80-902914-0-6.
- [25] HANUS, Daniel. *Pohon letadel*. Vydání první. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1997. 201 s. ISBN 80-01-01647-1.

## 6. Seznam obrázků

Obr. 1 Spalovací turbína o výkonu 7 MW.....	13
Obr. 2 Spalovací komora .....	15
Obr. 3 Schéma uspořádání spalovací turbíny s elektrickým generátorem .....	23
Obr. 4 Svorková účinnost spalovacích turbín.....	24
Obr. 5 Turbínová lokomotiva Union Pacifik.....	26
Dostupné z: [ <a href="http://farm4.static.flickr.com/3254/3149994138_01dbe3b830.jpg">http://farm4.static.flickr.com/3254/3149994138_01dbe3b830.jpg</a> ]	
Obr. 6 Lokomotiva Škoda TL659.002 .....	27
Dostupné z: [ <a href="http://www.prototypy.cz/zobrobr.php?filename=TL659002d.jpg">http://www.prototypy.cz/zobrobr.php?filename=TL659002d.jpg</a> ]	
Obr. 7 Lokomotiva Bombardier JetTrain .....	28
Dostupné z: [ <a href="http://tra.tms.us/bombardier/JetTrain.jpg">http://tra.tms.us/bombardier/JetTrain.jpg</a> ]	
Obr. 8 Jaguar C-X75.....	29
Obr. 9 Motocykl MTT Y2K .....	29
Dostupné z: [ <a href="http://www.virginmedia.com/images/y2k-400x300.jpg">http://www.virginmedia.com/images/y2k-400x300.jpg</a> ]	
Obr. 10 Turbokompresorový motor .....	30
Obr. 11 Turbovrtulový motor .....	31
Obr. 12 Turbohřídelový motor .....	31
Obr. 13 Turbodmychadlový, dvouhřídelový motor.....	32
Obr. 14 Propfan s protiběžnými vrtulemi.....	32



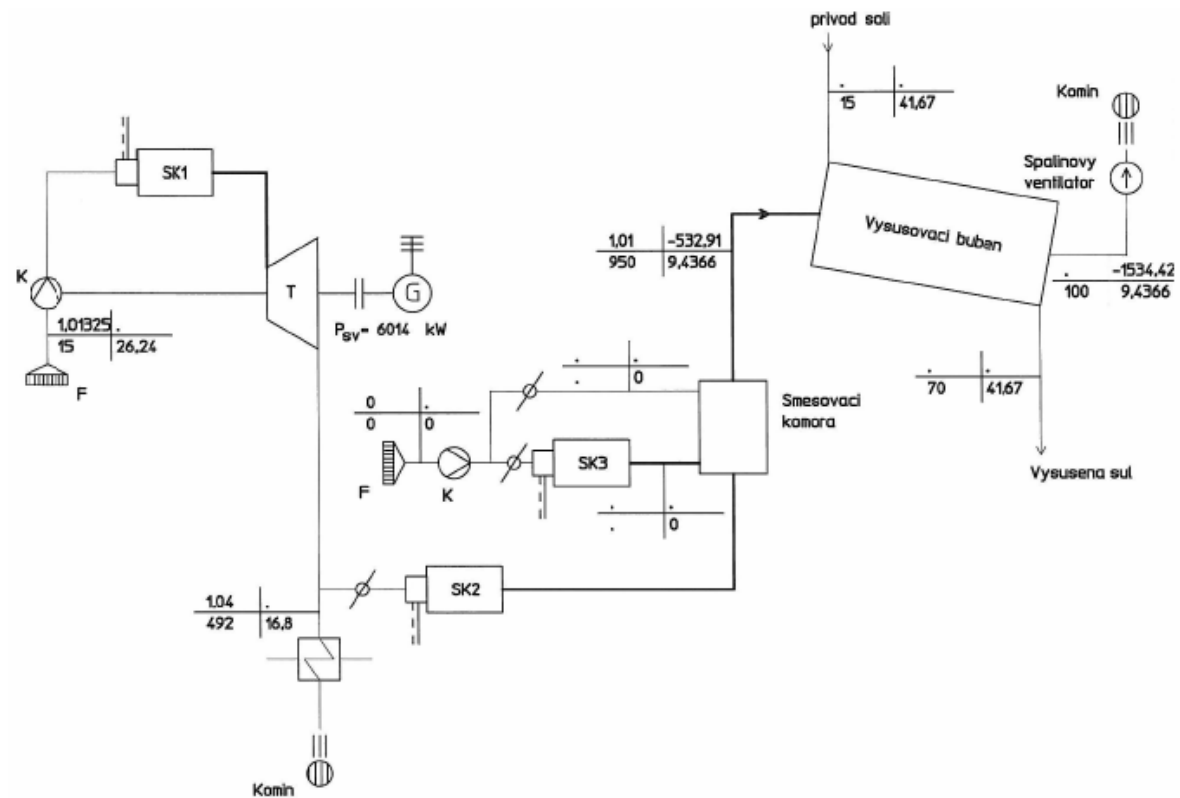
Obr. 15 Výletní loď Queen Mary 2.....	33
Dostupné z: [ <a href="http://www.smittenbybritain.com/wp-content/uploads/2010/11/portside.jpg">http://www.smittenbybritain.com/wp-content/uploads/2010/11/portside.jpg</a> ]	
Obr. 16 Schéma zapojení teplárny čistící stanice odpadních vod se spalovací turbínou na kalový plyn .....	35
Obr. 17 Schéma zapojení spalovací turbíny do technologického oběhu výroby kyseliny dusičné.....	36
Obr. 18 Princip kogeneračního zapojení spalovací turbíny.....	40
Obr. 19 Princip kogeneračního zapojení spalovací turbíny s přitápěním.....	40

## **7. Seznam příloh**

Příloha č. 1: Schéma zapojení spalovací turbíny při sušení chloridu draselného.....	51
Příloha č. 2: Schéma zapojení spalovací turbíny při výrobě ferosilicia .....	52
Příloha č. 3: Dispoziční řešení kogenerační jednotky se spalovací turbínou .....	53

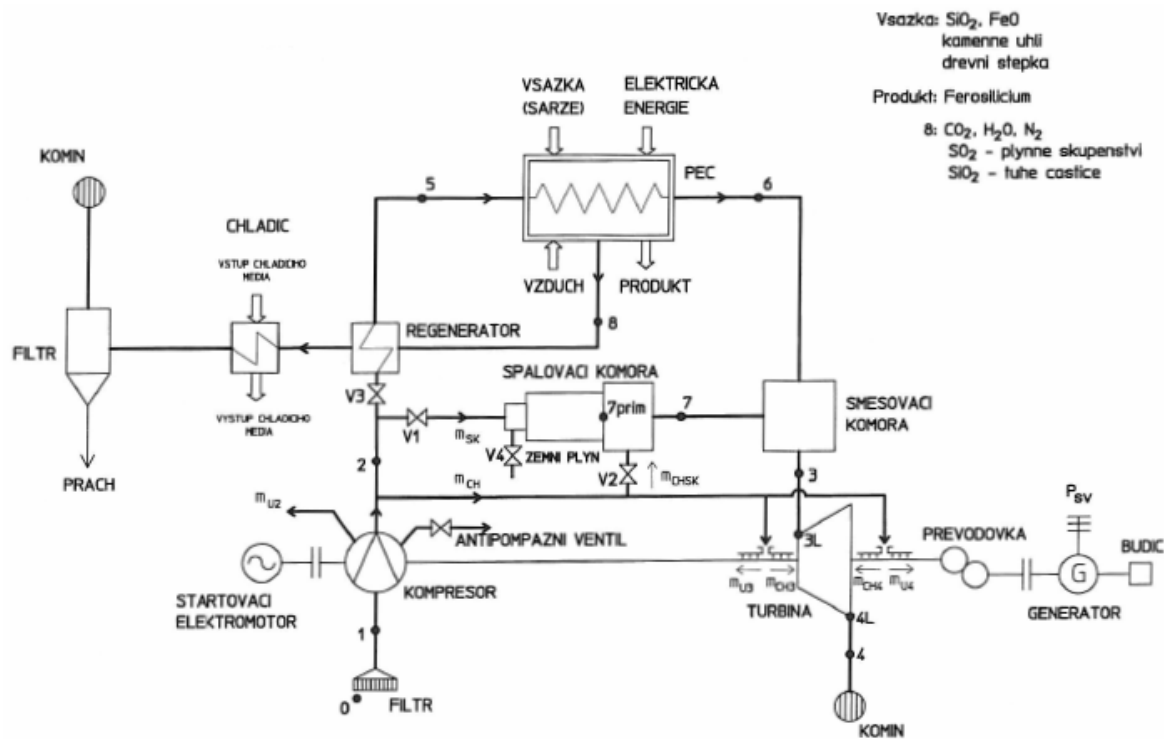
## 8. Přílohy

Příloha č. 1: Schéma zapojení spalovací turbíny při sušení chloridu draselného



Zdroj: [16]

## Příloha č. 2: Schéma zapojení spalovací turbíny při výrobě ferosilicia

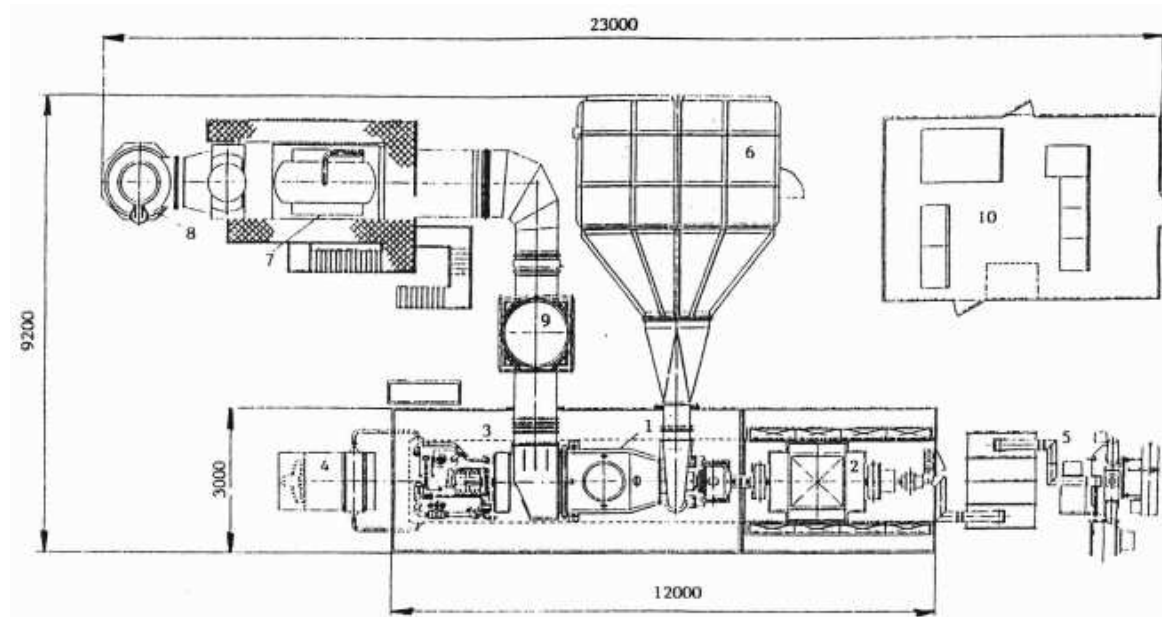


Zdroj: [16]

### Příloha č. 3: Dispoziční řešení kogenerační jednotky se spalovací turbínou

*Spalovací turbína o výkonu 4,7 MW, parní kotel na odpadní teplo pro výrobu 10 t/h páry o tlaku 1,2 MPa.*

*1 spalovací turbína, 2 elektrický generátor, 3 startovací zařízení, 4 vzduchový chladič oleje, 5 vývody elektrického výkonu, 6 vzduchový trakt se žaluziemi, fi ltry a tlumičem hluku, 7 kotel na odpadní teplo, 8 komín, 9 komín pro samostatný provoz spalovací turbíny, 10 dozorná a rozvodna*



Zdroj: [4]