

Diverzifikace zdrojů v systémech centrálního vytápění

Radek Lachman

Bakalářská práce
2024



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby;
- beru na vědomí, že bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k prezenčnímu nahlédnutí, že jeden výtisk bakalářské práce bude uložen v příruční knihovně Fakulty aplikované informatiky Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen připouští-li tak licenční smlouva uzavřená mezi mnou a Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně s tím, že vyrovnání případného přiměřeného příspěvku na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše) bude rovněž předmětem této licenční smlouvy;
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem na bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Ve Zlíně, dne

.....
podpis studenta

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá analýzou a návrhem začlenění inovativních technologií do systému centralizovaného zásobování teplem (CZT) v Teplárně Otrokovice (TOT). Práce je rozdělena do několika částí, které postupně řeší rešerši na dané téma, popis základního obecného principu fungování výroby tepelné a elektrické energie, výběr a popis konkrétního reálného systému CZT a analýzu potenciálu začlenění inovativních technologií.

Klíčová slova:

Centralizované zásobování teplem, teplárna, kogenerace, kombinovaná výroba, paroplynová elektrárna, snížení emisí, vodík.

ABSTRACT

This bachelor's thesis focuses on the analysis and proposal for the integration of innovative technologies into the district heating system (DHS) at the Otrokovice Heating Plant (TOT). The work is divided into several parts, gradually addressing a literature review on the topic, describing the basic general principles of heat and electricity production, selecting and describing a specific real-world DHS system, and analyzing the potential for integrating innovative technologies.

Keywords: Centralized heat supply, heating plant, cogeneration, combined heat and power production, combined cycle power plant, emission reduction, hydrogen.

Rád bych poděkoval panu Ing. Viliam Dolinay, Ph.D., za jeho trpělivost a věcné připomínky, které přispěly k dokončení této práce.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD.....	8
1 PRINCIP VÝROBY TEPELNÉ A ELEKTRICKÉ ENERGIE V CZT	9
1.1 OBNOVITELNÉ ZDROJE	10
1.1.1 Spalování biomay	10
1.1.2 Vodní elektrárny.....	11
1.1.3 Větrné elektrárny	12
1.1.4 Solární elektrárny	12
1.2 NEOBNOVITELNÉ ZDROJE	13
1.2.1 Uhelové elektrárny	13
1.2.2 Plynové elektrárny	14
1.2.3 Jaderné elektrárny	14
1.2.4 Kogenerace.....	15
1.3 PRŮMĚRNÁ ÚČINNOST	16
1.4 DISTRIBUCE.....	17
1.5 KOMBINOVANÁ VÝROBA TEPLA A ENERGIE	17
1.5.1 Rankine-Clausiusův Cyklus.....	18
1.6 PRVKY TECHNOLOGIE VÝROBY	19
1.6.1 Parní turbína	19
1.6.2 Kondenzační turbína	21
1.6.3 Protitlaká turbína	22
1.6.4 Odběrová turbína.....	23
1.6.5 Základní termodynamické děje	25
1.7 DĚLENÍ PARNÍCH TURBÍN.....	26
1.7.1 Podle počtu stupňů	26
1.7.2 Podle parametrů páry	26
1.8 PŘEHLED ZÁKLADNÍCH PARNÍCH KOTLŮ POUŽÍVANÝCH V ENERGETICE	27
1.8.1 Horkovodní kotle	27
1.8.2 Kotle s přirozenou cirkulací	28
1.8.3 Rozdělení kotlů dle spalovaného paliva.....	29
1.8.4 Specifické kotle pro určité typy paliv	29
1.9 ČERPADLA, OHŘÍVAČE, NAPÁJECÍ NÁDRŽE, ODPLYŇOVÁKY	30
1.9.1 Vysokotlaká čerpadla	30
1.9.2 Nízkotlaká čerpadla.....	30
1.9.3 Napájecí nádrže a odplyňovávky	31
1.9.4 Vysokotlaké ohřívače.....	32
1.10 OKRUH VÝROBY ELEKTRICKÉ ENERGIE	32
1.10.1 Alternátor	32
1.10.1 Zvýšení výkonu turboalternátoru	33
1.10.3 Budič	33
1.10.4 Blokový transformátor	33
1.11 TRENDY U VÝROBCŮ PRŮMYSLOVÝCH TURBÍN.....	34
2 POPIS SOUČASNÉHO STAVU.....	37

2.1	KOTELNY	38
2.1.1	Kotel K4	38
2.1.2	Kotel K8	38
2.2	TURBÍNY	39
2.2.1	Odběrová turbína	39
2.2.2	Kondenzační	39
2.2.3	Systém paralelního řazení protitlaké a kondenzační turbíny	39
2.3	REDUKČNÍ STANICE A DISTRIBUCE PÁRY	40
2.4	VYSOKOTLAKÝ OHŘÍVÁK	40
2.5	NAPÁJECÍ NÁDRŽ	41
2.6	REDUKČNÍ STANICE	41
2.6	VYSOKOTLAKÉ OHŘÍVÁKY	41
2.7	TURBONAPAJEČKA	42
	PRAKTICKÁ ČÁST.....	44
3	VHODNÉ INOVATIVNÍ TECHNOLOGIE DO STÁVAJÍCÍHO SYSTÉMU	45
3.1	POPIS PAROPYLNOVÉHO SYSTÉMU	45
3.1.1	Plynová část - otevřený Braytonuv cyklus	46
3.1.2	Parní část - uztavřený Rankine-Calusiův cyklus	49
4	POROVNÁNÍ PAROPLYNOVÉHO A PARNÍHO CYKLU	51
4.1	PRVKY NÁVHRU PAROPLYNOVÉHO CYKLU	52
4.1.1	Pinch Point	51
4.1.2	Emise	52
5	ZÁKLADNÍ KOMPONENTY SYSTÉMU PAROPLYNOVÉHO CYKLU	53
5.1	HRSG	54
5.2	TURBÍNY	54
6	VODÍK	56
6.1	VÝROBA VODÍKU - ELEKTROLÝZY	57
6.1.1	Alkalický elektrolyzér	57
6.1.2	PEM elektrolyzér	58
6.1.3	Vysokoteplotní elektrolyza	59
6.1.4	Parní reforming	60
7	PAROPLYNOVÝ CYKLUS SPALOVÁNÍ VODÍKU	61
7.1	VLASTNOSTI ZEMNÍHO PLYNU A VODÍKU	62
7.1.1	Wobbeho index	63
7.1.2	Rychlost planeme	63
7.2	PARAMATRY VODÍKU	64
8	QUICK START	62
8.1	DESIGNOVANÉ UPRAVY PRO RYCHLÝ START	67
8.2	QUICK START - VYUŽITÍ	67
9	VYUŽITÍ INOVACÍ A PAROPLYNOVÉHO CYKLU	69

9.1	CYKLY	69
9.2	IMPLEMENTACE TECHNOLOGIE SGT-400 A SST-400.....	69
9.3	SPOLUSPALOVÁNÍ VODÍKU	70
9.3	QUICK START TECHNOLOGIE	70
ZÁVĚR		73
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....		74
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK		77
SEZNAM OBRÁZKŮ		78
SEZNAM TABULEK.....		79

ÚVOD

Energetický sektor hraje klíčovou roli v moderní společnosti, protože zajišťuje dodávky tepla a elektrické energie pro domácnosti, průmyslové podniky a komerční objekty. Současná globální situace však klade stále větší důraz na udržitelnost a snižování emisí skleníkových plynů. Tento tlak je motivován snahou zmírnit negativní dopady změny klimatu a zlepšit kvalitu ovzduší.

Centralizované zásobování teplem (CZT) je jedním z efektivních způsobů, jak dosáhnout vyšší energetické efektivity a snížit environmentální dopady. CZT systémy umožňují centralizovanou výrobu tepla a jeho distribuci do více odběrných míst, což přináší řadu výhod, včetně lepší kontroly nad emisemi a vyšší účinnosti výroby.

Teplárna Otrokovice (TOT) představuje významný příklad CZT systému, který zajišťuje dodávky tepla pro region Otrokovice. TOT využívá kombinaci technologií pro výrobu tepla a elektrické energie, včetně spalování fosilních paliv a biomasy. Přestože tyto technologie dosahují vysoké úrovně efektivity, současná situace vyžaduje další inovace a modernizaci, aby se snížila závislost na fosilních palivech a minimalizovaly emise skleníkových plynů.

Budoucí vývoj v oblasti energetiky se zaměřuje na integraci obnovitelných zdrojů energie, jako jsou solární a geotermální systémy, a na implementaci pokročilých technologií, které zvyšují účinnost výroby a distribuce tepla. Kogenerace s využitím bioplynu a inteligentní řídicí systémy představují další perspektivní technologie, které mohou přispět k dosažení těchto cílů.

Tato práce se zabývá analýzou a návrhem začlenění inovativních technologií do systému CZT v Teplárně Otrokovice. Cílem je zvýšit efektivitu, snížit emisní zátěž a zlepšit ekonomickou návratnost provozu. V následujících kapitolách bude provedena podrobná analýza současného stavu TOT, navrhované technologie budou detailně popsány a bude diskutován jejich potenciální přínos pro systém CZT.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 PRINCIP VÝROBY TEPELNÉ A ELEKTRICKÉ ENERGIE V CZT

Teplárenstvím se označuje veškerá činnost spojená se zásobováním teplem, zahrnující výrobní a distribuční společnosti, které nevyrábějí elektrickou energii. Teplárenství je považováno za součást energetiky a zahrnuje zásobování domů, bytů a průmyslových závodů teplem prostřednictvím soustav centralizovaného zásobování teplem (CZT)

Soustavy CZT zahrnují tepelné zdroje propojené tepelnými sítěmi, které mohou být napojeny na předávací stanice nebo vnitřní spotřebitelská zařízení. Tyto tepelné zdroje jsou samostatné výrobní energie, z nichž alespoň jedna vyrábí tepelnou energii dodávanou do tepelných sítí CZT. Tepelné sítě propojují tepelné zdroje a spotřebitele, a mohou být propojeny také mezi sebou nebo napojeny na předávací stanice, kde se upravují parametry teplotnosné látky tak, aby odpovídaly požadavkům spotřebitelů.

Elektrická energie je důležitou složkou našeho každodenního života, a k její výrobě proto existuje řada metod. Mezi zdroje, které využívají obnovitelné zdroje, patří vodní, biomasy, větrné, solární a geotermální elektrárny.

Na druhé straně stojí elektrárny, které spoléhají na neobnovitelné zdroje, jako jsou tepelné, jaderné, uhelné a paroplynové elektrárny. Tyto zařízení fungují na principu zahřívání vody, která se přeměňuje na páru a pohání turbíny k výrobě energie.

1.1 Obnovitelné zdroje

1.1.1 Spalování biomasy.

Spalování biomasy je proces, při kterém se organický materiál, získaný z rostlin nebo živočichů, přeměňuje na energii v podobě tepla nebo elektrické energie. Biomasa může zahrnovat různé materiály, jako jsou dřevo, zbytky zemědělských plodin, odpadky z lesnictví, a dokonce i speciálně pěstované energetické rostliny.

Princip spalování biomasy

Základní chemický proces spalování biomasy je podobný spalování jakéhokoli jiného uhlíkovodíku a je popsán následujícím zjednodušeným rovnicemi:

Spalování dřeva : $C_6H_{10}O_5 + 6O_2 \rightarrow 6CO_2 + 5H_2O$ - rovnice ukazuje, že celulóza (jedna z hlavních složek dřeva) reaguje s kyslíkem (O_2) ve vzduchu a produkuje oxid uhličitý (CO_2), vodu (H_2O) a uvolňuje energii ve formě tepla.

Obecné spalování biomasy: $CH_2O + O_2 \rightarrow CO_2 + H_2O$ - obecný vzorec představuje zjednodušený způsob, jakým se biomasa spaluje na oxid uhličitý a vodu.

Spalování biomasy představuje ekologičtější alternativu, jelikož jde o obnovitelný zdroj energie, který má obecně nižší produkci skleníkových plynů ve srovnání s fosilními palivy. Nicméně, velké elektrárny, které spalují biomasy, se potýkají s logistickými výzvami

spojenými s nutností přepravovat velké objemy biomasy často z větších vzdáleností, což může přesahovat 100 kilometrů. Dále nákupní cena biomasy je problematická z pohledu cenové regulace na trhu. Z tohoto důvodu se použití biomasy ve velkých energetických zdrojích jeví jako méně optimální řešení.

1.1.2 Spalování biomasy.

Vodní elektrárny

Elektrická energie se vyrábí přeměnou kinetické energie tekoucí vody v elektrárny, kde pohyb vody pohání vodní turbínu spojenou s generátorem. Existují různé typy vodních elektráren, které se odlišují podle konstrukce a způsobu využití vodního toku:

1. **Jezové elektrárny:** Tyto elektrárny jsou postaveny přímo na jezu vodního toku. Využívají malý výškový rozdíl mezi hladinami, který obvykle nepřesahuje 10 metrů. Jde o využití přirozeného průtoku řeky bez výraznějšího zásahu do krajiny.
2. **Derivační elektrárny:** Tento typ elektrárny vytváří spád vody pomocí umělého kanálu, který odvádí vodu z řeky a vede ji do elektrárny umístěné níže, čímž se získává potřebný spád pro pohon turbín.
3. **Přehradní elektrárny:** přehrada je zde akumulací nádrží. Principem je využití velkého výškového rozdílu mezi hladinami, což může dosahovat desítek metrů. Přehradní elektrárny jsou schopné vyrábět významné množství energie díky velkému objemu akumulované vody a vysokému spádu.
4. **Přečerpávací elektrárny:** Tyto elektrárny pracují s dvojicí nádrží na různých výškových úrovních. Voda se čerpá z dolní nádrže do horní nádrže v době, kdy je nízká spotřeba energie a levnější elektrická energie. Během energetických špiček se voda uvolňuje zpět dolů přes turbínu, kde se vyrábí elektřina. Výškový rozdíl mezi nádržemi může být i přes sto metrů, což umožňuje efektivní výrobu energie během špičkového zatížení. [5]

V České republice jsou vodní elektrárny relativně dobře využívány, zejména v horských a podhorských oblastech, kde jsou podmínky pro jejich provoz ideální díky dostatečnému spádu a průtoku vody. Využití akumulacích vodních elektráren, které umožňují regulaci výroby elektřiny podle aktuální poptávky, také přispívá k vyšší efektivitě těchto zařízení.

Celkově, vodní a větrné elektrárny v České republice představují důležité složky v energetickém mixu země, přičemž jejich účinnost a výkonnost se může dále zlepšovat s pokračujícím technologickým vývojem a optimalizací provozu.

Zvláště přehradní a přečerpávací vodní elektrárny jsou ceněny pro svou schopnost rychlého spuštění na plný výkon. Tato vlastnost umožňuje efektivně vyrovnávat fluktuace v nabídce a spotřebě elektřiny a pokrývat energetické špičky

1.1.3 Větrné elektrárny

využívají energii větru, což je kinetická energie vzduchu proudícího mezi oblastmi s rozdílným atmosférickým tlakem. Energie větru je přeměněna na elektrickou energii prostřednictvím vrtule, která roztáčí generátor. Na území České republiky je využitelnost větrných elektráren omezena na maximálně 1 800 hodin ročně.

Hlavní předností větrných elektráren je jejich obnovitelný zdroj energie. Naopak jednou z hlavních nevýhod větrných elektráren je nestabilita dodávek energie, která je přímo závislá na měnících se povětrnostních podmínkách.

Teoretický výkon jehož můžeme dosáhnout je vyjádřen touto rovnicí:

$$P_t = k_B \cdot \rho \cdot \frac{v^3}{2} \quad (1)$$

P_t – výkon elektrárny [W]

k_B – Betzův koeficient, roven 0,59

ρ – hustota vzduchu [kg/m³]

v – rychlost proudění vzduchu [m/s]

Reálné větrné turbíny

$$P = c_p \cdot \rho \cdot \frac{v^3}{2} \cdot \pi \cdot \frac{D^2}{4} \quad (2)$$

c_p – součinitel výkonnosti, v ideálním případě rovný 0,59

D – průměr rotoru [m]

1.1.4 Solární elektrárny

Fotovoltaické články jsou základními součástmi solárních panelů. Jsou vyrobeny z polovodičových materiálů, jako je krystalický křemík. Fotony ze slunečního záření dopadají na tyto články a uvolňují elektrony, které vytvářejí elektrický proud. Tento proud je stejnosměrný a umožňuje přeměnu slunečního světla na elektrickou energii použitelnou pro napájení různých spotřebičů.

Systém koncentrace slunečního (CSP) záření využívá sluneční energii nepřímo a je běžný v komerčních solárních elektrárnách. CSP používá čočky nebo zrcadla k soustředění slunečního světla na malou plochu, nazývanou horký bod. Tento horký bod se pak využívá k ohřevu vody a produkci páry, která pohání turbínu generující elektrickou energii. Systémy CSP jsou obzvláště efektivní v oblastech s vysokou úrovní slunečního záření, jako jsou pouště

1.2 Neobnovitelné zdroje výroby elektrické energie

Parní elektrárny jsou zařízení, kde se k výrobě elektrické energie používá energie získaná spalováním fosilních paliv jako uhlí a zemní plyn, nebo alternativně biomasy. Spalování uhlí, které je stále rozšířené, s sebou přináší významné množství emisí škodlivých látek, včetně oxidů dusíku (NO_x), oxidu uhličitého (CO₂), oxidu siřičitého (SO₂), prachových částic a polycyklických aromatických uhlovodíků. Převážná část těchto škodlivin musí být efektivně odfiltrována před uvolněním do atmosféry, avšak technologie pro zachytávání CO₂ jsou stále ve vývoji a nejsou běžně aplikovány.

Tepelné elektrárny spalující uhlí jsou historicky nejrozšířenějším zdrojem elektrické energie na světě. Jejich popularita sahá až do doby průmyslové revoluce, kdy bylo energetické využití uhlí považováno za značný technologický průlom. Tento typ elektráren byl tradičně upřednostňován kvůli snadné dostupnosti uhlí, relativně jednoduché konstrukci oproti moderním zdrojům a schopnosti stavět velkokapacitní bloky na malém území, které dokázaly zásobovat elektřinou celá města.

1.2.1 Uhelné elektrárny

fungují na principu spalování uhlí, přičemž vzniklá tepelná energie se transformuje na energii mechanickou, která se následně mění na energii elektrickou. Tento spalovací proces využívají také elektrárny na zemní plyn. Každá elektrárna se skládá z několika výrobních bloků, které obsahují kotel, turbínu, generátor, zařízení na odlučování popílku a blokový transformátor. Všechny bloky jsou vybaveny také odsiřovacím zařízením.

Uhlí je do elektrárny dopravováno pásovými dopravníky, přičemž hnědé uhlí je často těženo z povrchových dolů v bezprostřední blízkosti. Uhlí se nejprve rozemele na prášek, vysuší a poté je společně se vzduchem vháněno do hořáků kotle. Spotřeba uhlí závisí na jeho výhřevnosti, kde na výrobu 1 MWh elektrické energie se spálí přibližně 1 t uhlí.

Po spálení paliva část popela padá do spodní části ohniště jako struska a je odváděna na odpadní skládky. Další část popela unášená ve spalinách je zachycována elektro odlučovací. Téměř všechny české tepelné elektrárny jsou vybaveny zařízením na odstranění oxidů síry a dusíku ze spalin. Kotel je napájen přehřátou a chemicky upravenou vodou, která se v ekonomizéru přeměňuje na sytou páru. Tato pára je následně přehřívána až na teploty kolem 550 °C a používá se k pohonu parní turbíny, což umožňuje výrobu elektrické energie. Využitá pára se poté vrací zpět do systému pro další využití a konečně se kondenzuje a vrací zpět do kotle.

Střídavý proud v elektrárnách nahradil původní stejnosměrné generátory, a to třífázovými synchronními alternátory o napětí 10-15 kV s frekvencí 50 Hz.

Z hlediska **budoucnosti** je provoz parních elektráren založených na uhlí považován za neudržitelný, což je způsobeno i potřebou nákupu emisních povolenek. V souladu s evropskými politickými směry existuje snaha o výrazné snižování využívání uhelných elektráren. Navzdory tomu, že rostoucí poptávka po elektrické energii a nedostatečný růst výroby z obnovitelných zdrojů vede k zásadnímu nárůstu cen elektrické energie, je obtížné určit přesný časový horizont, kdy dojde k úplnému ukončení provozu uhelných parních elektráren vzhledem k těmto faktorům.

1.2.2 Plynové elektrárny

V plynových elektrárnách a paroplynových spalovacích elektrárnách se energie potřebná k pohonu generátoru elektrické energie získává spalováním zemního plynu v plynové turbíně.

Parní turbína je rotační motor využívající teplo, ve kterém se mechanická práce získává expanzí vodní páry v jednom nebo více turbínových stupních, přičemž se přeměňuje její vnitřní a kinetická energie. Každý turbínový stupeň se skládá z lopatek rozváděcího a oběžného kola. V lopatkách rozváděcího kola pára expanduje, což vede k přeměně její tlakové energie na energii kinetickou. Tato pára s vysokou kinetickou energií pak působí na lopatky oběžného kola, které se tím dostávají do rotačního pohybu. Pokud má pára po expanzi stále dostatečnou energii (tepelnou, tlakovou, kinetickou), je výhodné pokračovat v expanzi v dalším stupni. Tento typ turbíny se nazývá vícestupňová parní turbína.

V paroplynových elektrárnách se navíc využívá odpadní teplo z plynové turbíny pro produkci páry, která následně pohání parní turbínu. Tento proces zvyšuje účinnost výroby elektrické energie až na přibližně 85 %. Paroplynové elektrárny jsou považovány za neekologičtější způsob využití zemního plynu k produkci elektrické energie, protože emise CO₂ jsou oproti spalování uhlí v parních elektrárnách sniženy až o 70 %.

Tyto elektrárny také nabízejí potenciál pro budoucí využití vodíku jako paliva. Hlavní přednosti paroplynových elektráren zahrnují vysokou termickou účinnost (přibližně 50 %), relativně nízké kapitálové výdaje, krátkou dobu potřebnou pro výstavbu a splnění ekologických standardů.

V současné době se s paroplynovými elektrárnami se počítá pro vyrovnávání nesouladů mezi poptávkou po elektřině a její produkcí z obnovitelných zdrojů energie.

Spalovací plynové turbíny pracují v otevřeném cyklu. Nasátý atmosférický vzduch kompresor stlačuje a vhání do spalovací komory, kde se vzduch míchá se zemním plynem. Spálením plynu vzniknou horké spaliny, které expandují v turbíně. Teplo výstupních spalin se využívá ve spalínovém kotli.

1.2.3 Jaderné elektrárny

Jsou speciálním typem kondenzačních parních elektráren, kde proces výroby páry je realizován odpařováním vody, která je ohřívána teplem získaným z jaderného reaktoru. V těchto zařízeních dochází k uvolňování energie prostřednictvím jaderné štěpné reakce, při které se uvolňuje vazebná energie z jader těžkých prvků, jako jsou uran 235 a plutonium 239.

Základní princip fungování jaderné elektrárny je podobný tomu v uhelné elektrárně, obě využívají teplo k výrobě elektrické energie. Hlavní rozdíl mezi nimi spočívá v zdroji tohoto tepla. Zatímco uhelné elektrárny spalují fosilní paliva, jaderné elektrárny získávají teplo prostřednictvím řízené štěpné reakce, která probíhá v jaderném reaktoru. Současné jaderné elektrárny se skládají běžně ze 3 okruhů.

Primární okruh : umístěný v reaktoru, ohřev vody bez spalování. Cirkulace vody, která odebírá teplo přímo z reaktoru a tím snižuje jeho teplotu. Teplo je potrubím převedeno do výměníku tepla (parogenerátoru), kde je předáno do sekundárního okruhu.

Sekundární okruh: umístěn ve výměníku, hlavní funkcí je přeměna tepelné energie na mechanickou a následně na elektrickou energii. Voda v sekundárním okruhu se mění na páru, protože zde nepůsobí vysoký tlak jako v primárním okruhu. Pára pohání turbínu a poté je vedena do kondenzátorů, kde kondenzuje zpět na vodu. Voda se vrací do parogenerátoru, čímž se uzavírá sekundární okruh

Terciální okruh: kondenzátory, chladicí věže. Slouží k odběru nevyužitelné energie, dodávek tepla, například teplé vody. Pára z turbíny je ochlazena v kondenzátorech a přeměněna zpět na vodu. Pro ochlazení páry a odvod tepla do ovzduší jsou využívány chladicí věže.

Mezi hlavní **přednosti jaderných elektráren** patří především nízké provozní náklady a minimalizace emisí skleníkových plynů, což je z hlediska ochrany životního prostředí velmi přínosné. Jaderná energie se také vyznačuje vysokou mírou energetické efektivity a schopností poskytovat stabilní a spolehlivý zdroj elektrické energie.

Nicméně, jaderné elektrárny mají také svá specifika, která mohou představovat určité nevýhody. Jedná se zejména o vysoké investiční náklady spojené s výstavbou. Dále je výstavba jaderných elektráren časově náročná, což zahrnuje nejenom samotnou stavbu, ale i získání potřebných povolení.

Problematickým aspektem provozu jaderných elektráren je také otázka nakládání s jaderným odpadem. I když se jedná o malé objemy ve srovnání s odpady z fosilních paliv, radioaktivita těchto odpadů vyžaduje zvláštní opatření. V současné době se využívají především krátkodobá úložiště, avšak hledání a vytváření trvalých úložišť, která by odpad udržela bezpečně izolovaný na dlouhé období, je stále probíhající proces. Plánované je, že do roku přibližně 2050 bude vyřešeno zřízení trvalých úložišť, která by zajistila bezpečné skladování jaderného odpadu na mnoho následujících generací.

1.2.4 Kogenerace

známá také jako kombinovaná výroba elektřiny a tepla (**KVET**), je proces, při kterém se využívá tepelná energie, která vzniká spálením paliva a již nemůže být dále využita k výrobě elektrické energie. Historicky tento proces nabyl na popularitě ve druhé polovině dvacátého století, kdy byla většina tehdejších elektráren, včetně jaderných, navržena právě jako kogenerační. To se projevilo v rozsáhlých soustavách pro dodávky tepla do měst přímo z těchto elektráren, což bylo na evropské poměry poměrně neobvyklé.

Při výrobě elektřiny se využívá přibližně 40 % energie z paliva, v závislosti na účinnosti turbíny, motoru a úrovni doprovodných technologií. Z ekonomického i ekologického hlediska je výhodné využít co nejvíce odpadního tepla, které je uvolňováno například chladicí vodou nebo spalinami. Díky vhodným teplotám je možné teplo transportovat na velké vzdálenosti a dokonce i u menších zdrojů lze toto odpadní teplo využít pro vytápění a přípravu teplé vody v objektech. Tímto způsobem je možné zvýšit celkové využití energie v palivu na 80 % a více.

V současné době se rozvoj kombinované výroby elektřiny a tepla, orientuje na menší energetické zdroje, které ke svému pohonu využívají plynové motory. Při návrhu jejich elektrického výkonu je primárním úkolem optimalizace spotřeby odpadního tepla. Kogenerační jednotky se stále častěji uplatňují v průmyslu, městských tepelných hospodářstvích, stejně jako v provozech a areálech s pravidelnou a relativně stálou poptávkou po teple i elektřině.

Kogenerace je vysoce efektivní, spolehlivá a ekologicky šetrná metoda produkce elektrické energie. Jak už název napovídá, kromě elektřiny se současně využívá i produkované teplo. Toto teplo, které by v konvenčních elektrárnách unikalo do atmosféry nevyužité, zvyšuje celkovou efektivitu energetického procesu. U moderních kogeneračních technologií může celková účinnost překročit 90 %, zatímco klasické zdroje elektrické energie dosahují účinnosti jen 30 – 40 %.

1.3 Průměrná účinnost

Solární elektrárny - průměrná účinnost, se typicky pohybuje kolem 15 % až 20 %. Účinnost systémů závisí na mnoha faktorech, včetně typu fotovoltaických článků, kvality instalace, orientace vůči slunci, a klimatických podmínek.

V České republice, kde jsou klimatické podmínky charakteristické proměnlivým počasím a střídáním ročních období, může účinnost solárních panelů kolísat. V létě, kdy je intenzita slunečního záření vyšší, mohou solární panely dosahovat vyšší účinnosti.

V případě užití monokrystalických solárních panelů je také možné dosahovat vyšší účinnosti, někdy i více než 20 %. Polykrystalické solární panely mají účinnost v rozmezí 15 % až 17 %. Vývoj v oblasti fotovoltaiky však stále pokračuje, a účinnost solárních panelů se postupně zvyšuje.

Větrné elektrárny - účinnost je obvykle měřena jako poměr mezi množstvím elektřiny vyrobené a maximálním teoretickým výkonem, který by mohl být vyroben při optimálních větrných podmínkách. Průměrná účinnost větrných turbín se obecně pohybuje mezi 20 % až 40 %. Tento rozsah je dán, podobně jako u většiny typu turbíny, jejího umístění, výšky rotoru a místních větrných podmínek.

V České republice může účinnost větrných elektráren kolísat kvůli relativně nižšímu výskytu konzistentních větrných podmínek ve srovnání s pobřežními oblastmi Evropy, kde je větrná energie hojněji využívána. Výběr vhodných lokalit a modernizace technologií mohou však zvýšit účinnost větrných elektráren i v České republice.

Vodních elektráren - patří mezi nejefektivnější zdroje obnovitelné energie. Účinnost vodních elektráren se obvykle pohybuje v rozmezí 70 % až 90 %. Tato vysoká účinnost je dána přímým převodem kinetické energie vody na elektrickou energii bez potřeby složitých procesů transformace.

Uhelné elektrárny - typická účinnost se pohybuje mezi 33 % až 40 %. U modernějších technologií, jako jsou superkritické uhelné elektrárny, může účinnost dosáhnout až 45 % a v některých případech až 50 %.

Plynové elektrárny - klasické plynové elektrárny mají účinnost zhruba 35 % až 42 %. Výkon se výrazně zlepšuje u elektráren využívajících kombinovaný cyklus (paroplynové

elektrárny), kde se účinnost může pohybovat mezi 55 % až 60 % a v některých nejmodernějších zařízeních přesahuje i 60 %. [1]

Spalování biomasy. Elektrárny na biomasu mohou mít účinnost podobnou jako uhelné elektrárny, zhruba 20 % až 40 %. Účinnost závisí na typu technologie spalování a na druhu biomasy.

Olejové elektrárny: Tyto elektrárny mají obvykle nižší účinnost v porovnání s plynovými a uhelnými elektrárnami, obvykle kolem 30 % až 35 %, což je způsobeno především náklady na palivo. [4]

1.4 Distribuce tepla

V distribučních systémech tepla se jako nosič tepla využívá pára, nebo horká či teplá voda. Tímto způsobem je teplo distribuováno do domácností i průmyslových provozů. V každém vytápěném objektu je umístěna domovní předávací stanice, která zajišťuje ohřev vody pro radiátory v topném systému a pro systém teplé užitkové vody. Rozvod tepla je realizován prostřednictvím systému s dvěma potrubími. „Ve starších systémech se čtyřmi potrubími se přívodní potrubí nevede přímo do jednotlivých objektů, ale pouze do centrální výměňkové stanice, která obsluhuje více budov a rozvádí dva nezávislé okruhy: jeden pro celoroční dodávku teplé vody do vodovodních baterií a druhý pro dodávku tepla do topného systému od září do května“.

Celková délka tepelných sítí v centralizovaném zásobování teplem (CZT) v České republice činí 10 000 km. Vzdálenost mezi výtopnou a vytápěnými objekty se pohybuje od několika metrů až po desítky kilometrů. Tepelné sítě jsou obvykle konstruovány z dvojice potrubí – přívodního a vratného, které vedou buď k centrální výměňkové stanici, nebo přímo do zásobovaných objektů. [3]

1.5 Kombinovaná výroba tepla a elektrické energie

V teplárnách, na rozdíl od vytopen, dochází ke kombinované výrobě elektřiny a tepla. Spálením paliva získaná energie je nejprve vedená do vysokotlaké parní turbíny, která prostřednictvím hřídele pohání generátor elektřiny. Proces zde však nekončí. Horká pára z turbíny je dále směřována do tepelného výměníku, kde, podobně jako ve výtopně, předává teplo do centrálního zásobovacího systému teplem (CZT). V takových parních teplárnách se přibližně 18 % uvolněné energie transformuje na elektřinu a 72 % energie je využito ve formě tepla. Energetické ztráty jsou tak pouze 10 %.

Charakteristické vybavení jednotek tepelné elektrárny, které využívají fosilní paliva nebo biopaliva, je navrženo tak, aby dosahovalo maximální tepelné účinnosti parního cyklu. Proto je pro tyto bloky tepelných elektráren typické využívání kondenzačních turbín s odběrem páry, které slouží k regeneraci tepla a přehřívání.

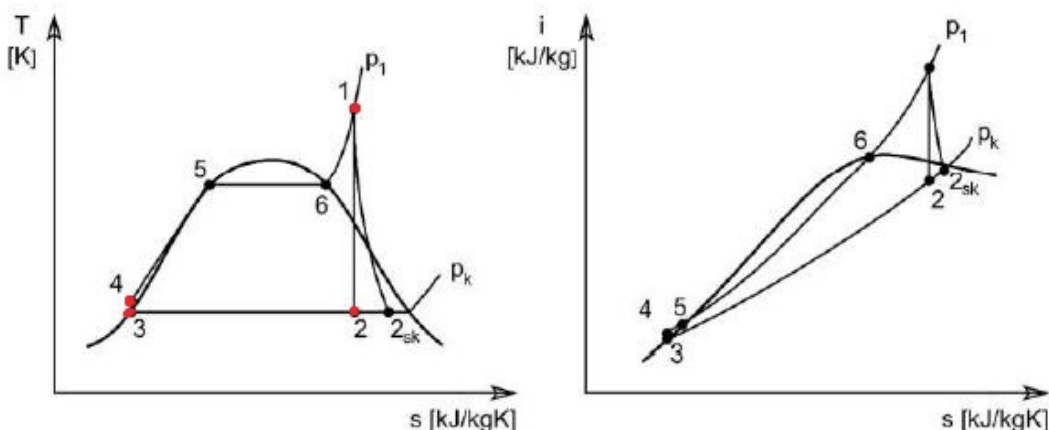
Obdobný princip může fungovat i v kondenzačních elektrárnách. V běžném režimu zde emisní pára z parní turbíny uniká do atmosféry přes chladiče (tepelné výměníky) a chladičí věže, čímž se přemění průměrně pouze 38 % vstupní energie na elektřinu. Když se však

využívá odpadové teplo, které je rovněž přesměrováno do systému CZT a dále k odběratelům tepla, může se účinnost energetického procesu zvýšit až na 65 %.

Většina elektrické energie vyrobené v současné době pochází z přeměny tepelné energie, která je realizována prostřednictvím termodynamických cyklů. Tyto cykly spojují termodynamické procesy do uzavřené smyčky, která se po dokončení vrátí do svého původního stavu.

1.5.1 Rankine – Clausiův cyklus

Nejběžnější metoda přeměny tepelné energie, vznikající spalováním pevných nebo kapalných paliv, je využití parního cyklu, známého také jako Rankin-Clausiusův (dále jen R-C) cyklus. Principem uvedeného cyklu je ohřev vody na páru s vysokým tlakem, která je následně vedena do parní turbíny, kde expanduje a předává energii turbínovým lopatkám, ty vykovávají práci.



Obrázek 1. Rankin-Clausiusův cyklus v T-s, i-s diagramu vody a vodní páry.[7]

R-C ideální cyklus se skládá ze
 2 izentropických procesů,
 turbína koná adiabatickou práci - expanze v 1 -> 2
 napájecí čerpadlo adiabaticky zvýší tlak - komprese v 3 -> 4

2 izobarických procesů
 izobarický ohřev v kotli 4 -> 1
 izotermická kondenzace páry v kondenzátoru 2 -> 3.

Postřednictvím prvního zákona termodynamiky pro termodynamickou soustavu zjišťujeme měrnou technickou práci turbíny a čerpadla:

$$dq = dh - vdp \quad (3)$$

Základní měrná práce je dána:

$$dat = -vdp \quad (4)$$

následně

$$dq = dh + dat \quad (5)$$

Při expanzi páry v turbíně nedochází k výměně tepla s okolím, tj. $dq=0$.

$$\text{Dle rovnice pak platí, že} \quad dat = -dh \quad (6)$$

Měrná technická práce

$$a_t^T = - \int_1^2 dh = h_3 - h_4 \quad (7)$$

představuje přechod ze stavu na vstupu do turbíny a výstupu z turbíny. V praxi je pracovní látkou voda, která v cyklu mění své skupenství z plynného na kapalné a zpět.

Voda z kondenzátoru, nazývaná kondenzát, je čerpána napájecím čerpadlem do napájecí nádrže a dále do kotle. V kotli se kondenzát ohřívá a mění na přehřátou páru, zvanou admisní pára. Tato pára je přiváděna do turbíny, kde předává svou tepelnou energii rotoru parní turbíny, který pohání elektrický generátor. Po expanzi vstupuje pára do kondenzátoru, kde při stálém tlaku (podtlaku) předává své skupenské teplo chladicí vodě a mění se zpět na kondenzát. Celý pracovní cyklus je tak uzavřený a, pokud zanedbáme netěsnosti, oběh pracuje s konstantním množstvím páry.

Na rozdíl od parního cyklu nevyužívají plynové cykly změnu fáze a pracují pouze v plyném skupenství. Teplo je do cyklu dodáváno a z něj odváděno pomocí výměníků tepla a pracovní médium zůstává v oběhu, což se označuje jako uzavřený cyklus. Častěji však teplo vzniká spalováním paliva přímo ve vzduchovém proudu, což vede k realizaci tzv. otevřeného cyklu, ve kterém expandující horký vzduch prochází přes plynovou turbínu a odpadní teplo je odvedeno.

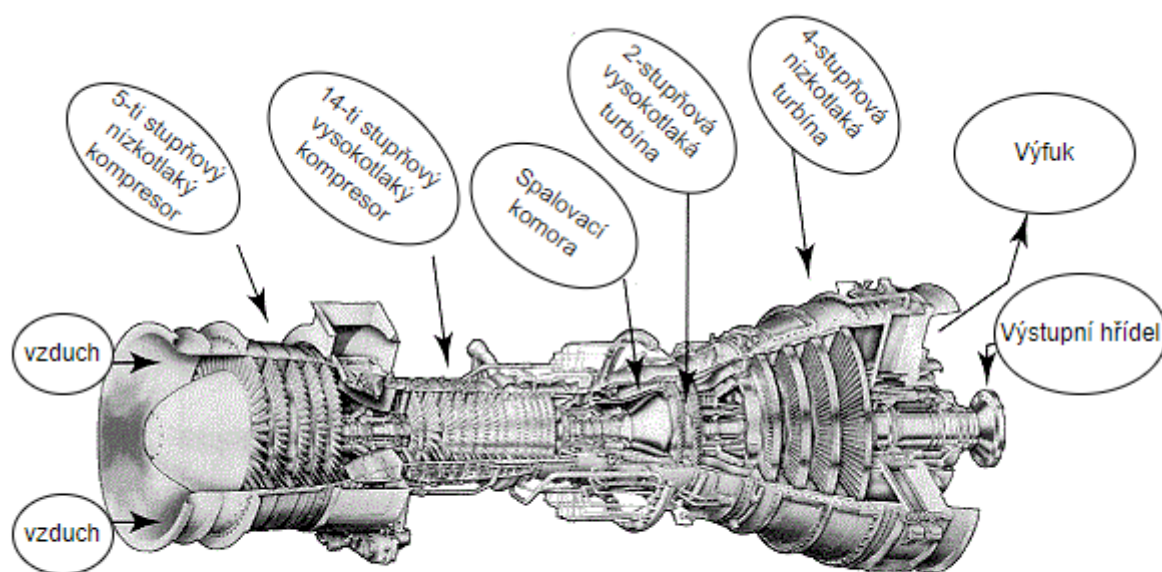
Účinnost jakéhokoli cyklu je vyšší, čím je větší rozdíl mezi teplotami při přívodu a odvodu tepla. U plynových cyklů se účinnost zvyšuje například regenerací tepla nebo mezichlazením, zatímco u parních cyklů to může být přehříváním páry.

Kombinováním plynového a parního cyklu vzniká paroplynový cyklus, který využívá výhod obou systémů a minimalizuje jejich nevýhody. Tento cyklus je založen na sériovém propojení, kde se ztrátová tepelná energie z plynového cyklu využívá v parním cyklu, což vede k dvojí přeměně tepelné energie na mechanickou a následně na elektrickou, čímž se zvyšuje celková účinnost.

1.6 Prvky technologie výroby

1.6.1 Parní turbína

Jedná se o tepelný rotační motor s lopatkami, ve kterém se mechanická práce získává expanzí vodní páry v jednom nebo více stupních, kde se přeměňuje její vnitřní a kinetická energie.



Obrázek 2. Parní turbína [6]

Po průchodu vysokotlakým stupněm se pára znovu přehřívá na svou původní teplotu, čímž se zvyšuje její entalpie, která reprezentuje množství energie obsažené v termodynamickém systému. Tato přehřátá pára pak pokračuje do středotlaké části turbíny. Z této i nízkotlaké části turbíny jsou čerpány regenerační odběry, které slouží k ohřevu napájecí vody, čímž se zvyšuje celková účinnost cyklu.

Parní turbíny nejsou samostatným funkčním celkem, vyžadují rozsáhlou technologickou základnu se zdrojem páry a vnějším přestupem tepla. To umožňuje využití téměř jakéhokoliv paliva, avšak za cenu značných investic a velkého zastavěného prostoru. Proto jsou parní turbíny využívány především tam, kde je potřeba vyššího výkonu než u spalovacích motorů, například v tepelných elektrárnách, teplárnách.

Jeden turbínový stupeň se skládá z lopatek rozváděcího a oběžného kola. V rozváděcím kole se pára expanduje a její tlaková energie se mění na kinetickou energii. Pára s vysokou kinetickou energií pak působí na lopatky oběžného kola, což způsobuje jejich rotační pohyb. Pokud má pára po expanzi stále dostatečnou energii (tepelnou, tlakovou a kinetickou), je výhodné pokračovat v expanzi v dalším stupni, což vytváří vícestupňovou parní turbínu.

Během expanze se tlaková energie mění na energii kinetickou, kterou předá oběžným lopatkám a přeměnění na mechanickou práci turbíny. Expanzi páry v turbíně považujeme za izoentropický děj, při kterém je tepelná výměna s okolím nulová.

Pro výpočet mechanické práce lze využít první zákon termodynamiky pro otevřené soustavy na jeden kilogram pracovní látky (Rovnice 1), zjednodušením určíme měrnou mechanickou práci turbíny pro jeden kilogram páry bez ztrát (Rovnice 2).

$$\text{Rovnice 1 : } \Delta U = Q - W + \sum(h_{in} \cdot m_{in}) - \sum(h_{out} \cdot m_{out}) \quad (8)$$

ΔU je změna vnitřní energie systému

Q je celkové množství tepla přivedené do systému (teplá energetická výměna s okolím)

W je práce vykonaná systémem na okolí,

h_{in} , h_{out} - entalpie hmoty vstupující, respektive vystupující ze systému

m_{in} , m_{out} - hmotnostní toky vstupující a vystupující hmoty.

$$\text{Rovnice 2: } w_t = h_1 - h_2 \quad (9)$$

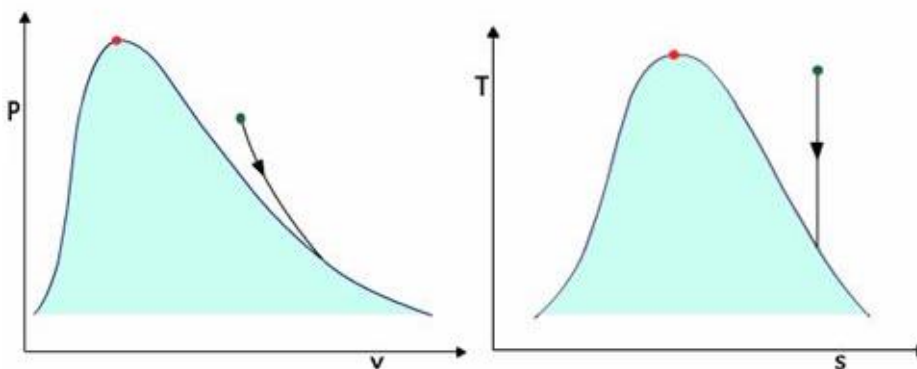
w_t je měrná práce turbíny (J/kg),

h_1 je měrná entalpie páry na vstupu do turbíny (J/kg)

h_2 je měrná entalpie páry na výstupu z turbíny (J/kg)

Základním principem parní turbíny je přeměna tepelné energie obsažené ve vodní páře na mechanickou práci rotoru turbíny.

Když lopatky turbíny rotují působením vysokotlaké a vysokoteplotní páry, pára ztrácí svou energii, což vede k nízkému tlaku a nízké teplotě páry na výstupu z turbíny. V tomto bodě se pára rozpíná, dokud nedosáhne bodu sytosti. Vzhledem k tomu, že se do páry nepřidává ani z ní neodebírá teplo, její entropie v ideálním případě zůstává stejná. Pokud bychom dokázali tuto nízkotlakou a nízkoteplotní páru vrátit zpět do jejího původního stavu, mohli bychom nepřetržitě vyrábět elektřinu.

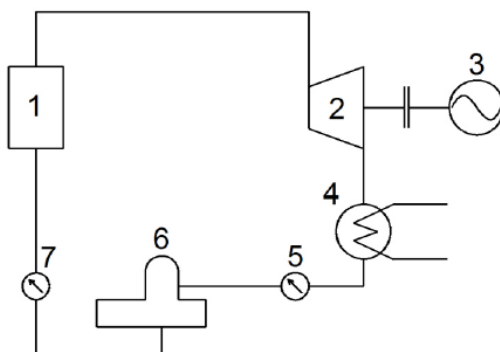


Obrázek 3 P-v, T-s diagramy [8]

1.6.2 Kondenzační turbína

Kondenzační turbína se vyznačuje nízkou teplotou a tlakem výstupní páry, což se projevuje vakuem v kondenzátoru (3 až 30 kPa).

Díky tomu dochází k efektivní přeměně dodaného tepla na mechanickou energii, která je následně transformována na energii elektrickou v generátoru. Nicméně emisní pára nemůže být využita pro dodávku tepla, protože její teplota je příliš nízká (okolo 20°C).



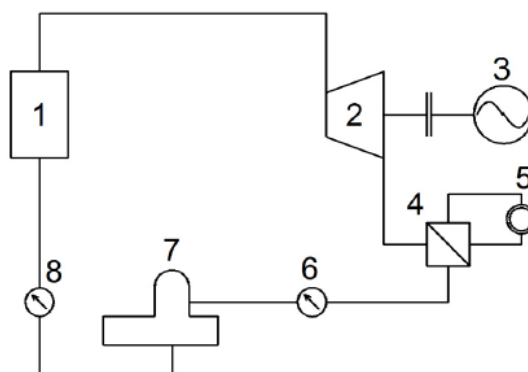
Obrázek 4 Schéma výroby elektrické energie s kondenzační turbínou [9]

1) Kotel, 2) Turbína, 3) Generátor, 4) Kondenzátor, 5) Kondenzátní čerpadlo, 6) Napájecí nádrž s odplyňovačem, 7) Napájecí čerpadlo

V případě značného zvýšení teploty kondenzace, například kvůli využití kondenzačního tepla pro vytápění (zvýšení teploty kondenzace na 80 až 90 °C) nebo pro jiné účely, říkáme, že turbína pracuje v režimu s potlačenou kondenzací – někdy se používá termín "s potlačeným vakuem". Kondenzátor je obvykle umístěn co nejblíže turbíně, aby se minimalizovaly vysoké tlakové ztráty

1.6.3 Protitlaká turbína

U protitlakových turbín není na výstupu kondenzátor, ale parovod s připojením na spotřebič, případně kondenzátor s tlakem kondenzace obvykle vyšším než 0,1 MPa.



Obrázek 5 Schéma výroby elektrické energie s protitlakou turbínou [9]

1) Kotel, 2) Turbína, 3) Generátor, 4) Tepelný výměník, 5) Spotřebič, 6) Kondenzátní čerpadlo, 7) Napájecí nádrž s odplyňovačem, 8) Napájecí čerpadlo

Expanze páry u protitlakých parních turbín končí v posledním stupni při tlaku vyšším než atmosférickém, což znamená, že teplota páry je vyšší než u kondenzačních turbín. Veškerá emisní pára je proto využitelná pro zásobování teplem. Hlavní charakteristikou protitlaké turbíny je jednoznačné propojení dodávky tepla s množstvím páry proudící turbínou, a tím i s jejím mechanickým a elektrickým výkonem. To znamená, že při poklesu odběru tepla musí být sníženo množství páry vstupující do turbíny, to vede ke snížení výkonu turbíny.

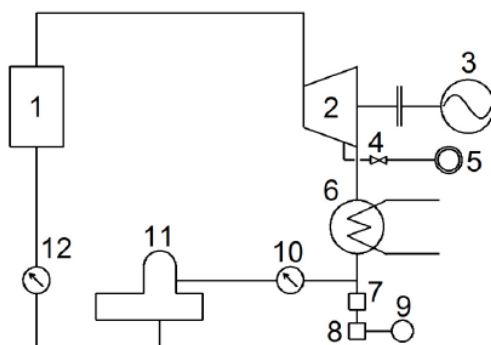
1.6.4 Odběrová turbína

U odběrové turbíny se určité množství páry odebere po částečné expanzi, kdy má pára stále dostatečné teplotní a tlakové parametry pro další využití. Zbylá pára pokračuje v expanzi, která může probíhat buď do podtlaku u kondenzačních odběrových turbín, nebo být ukončena dříve u protitlakých odběrových turbín, aby se emisní pára mohla dále využít. Odběr páry lze provádět dvěma způsoby – regulovaným a neregulovaným odběrem.

Neregulovaný odběr - zde je tlak páry v odběru určen tlakem ve spotřebiči páry na konci odběru. U regulovaného odběru je v turbíně vytvořena přepážka, která směřuje veškerou páru do odběru. Část této páry pak proudí přes regulační ventil za přepážkou, kde se reguluje množství páry pokračující v expanzi podle požadavků na tlak páry od spotřebiče.[7]

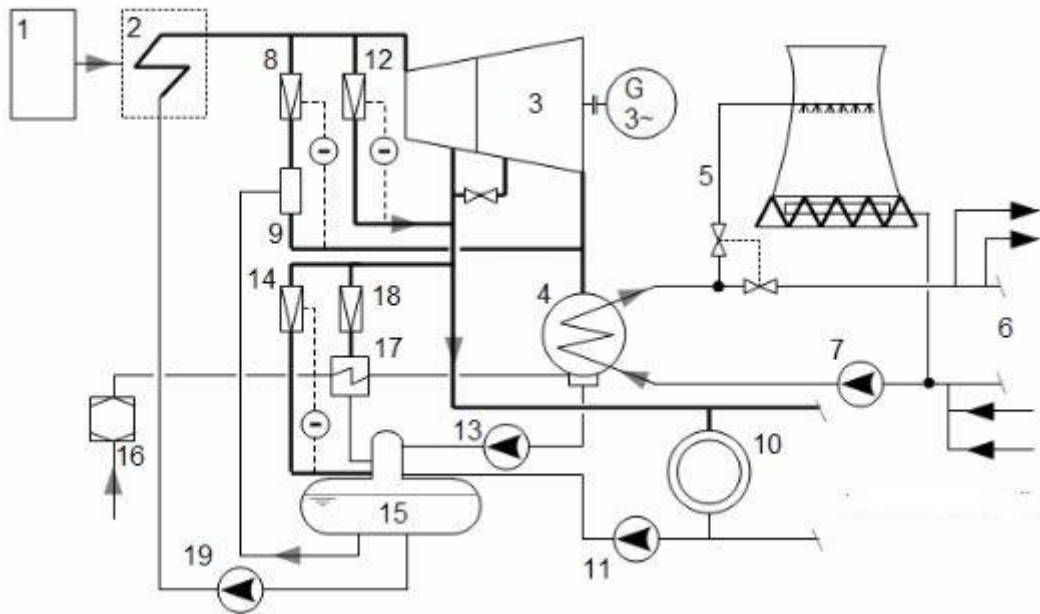
Regulovaný odběr páry je zajišťován umístěním regulačního zařízení (ventilu, klapky nebo jiného prvku) za místem odběru, což umožňuje zvyšování nebo snižování průtoku do následující části turbíny a tím i regulaci odběrového tlaku. Teoreticky je možné na délce turbíny umístit více odběrů, ale v praxi se obvykle používají maximálně dva. Důvodem je konstrukční omezení axiální délky turbíny, zvané maximálně přípustné ložiskové vzdálenosti, které omezuje prostor dostupný pro regulované odběry. [7]

Turbíny s regulovaným odběrem se dimenzují na maximální odběr páry, což znamená, že část turbíny za odběrem je konstruována na nižší průtok než část turbíny před odběrem. Při odstavení spotřebiče páry připojený na odběr odstaven klesne výkon turbíny přibližně o 50 % až 60 % jmenovitého výkonu turbosoustrojí. Existují také turbíny, které jsou navrženy na stejný maximální průtok před i za odběrem. Tyto turbíny jsou dražší a využívají se v případech očekávaných výpadků odběrové páry.



Obrázek 6 Schéma výroby elektrické energie s protitlakou turbínou [7]

1 - Kotel, 2 - Turbína, 3 – Generátor, 4 – Regulační ventil, 5 – Spotřebič, 6 – Kondenzátor,
 7 – Nádrž demi-vody, 8 – Chemická úprava vody, 9 – Zdroj surové vody
 10 – Kondenzátní čerpadlo, 11 – Napájecí nádrž s odplynovákem, 12 – Napájecí čerpadlo



Obrázek 7 Schéma zařízení teplárny s parní turbínou s regulovaným odběrem páry pro technologické účely [18]

- 1 sklad paliva; 2 parní kotel;
- 3 kondenzační turbína s jedním regulovaným odběrem;
- 4 kondenzátor;
- 5 paralelní chladicí okruh v tomto případě s chladicí věží;
- 6 odběr a vratka topné vody (CZT);
- 7 cirkulační čerpadlo chladicího okruhu;
- 8 redukční stanice pro obtok páry do kondenzátoru;
- 9 chladicí stanice;
- 10 spotřebiče páry;
- 11 čerpadlo vratného kondenzátu;
- 12 redukční stanice pro obtok páry;
- 13 kondenzátní čerpadlo;
- 14 redukční stanice prohřívání napájecí nádrže a termického odplynění;
- 15 napájecí nádrž s termickým odplyněním;
- 16 chemická úprava vody;
- 17 ohřívák doplňující vody;
- 18 redukční stanice páry pro ohřev doplňující vody;
- 19 napájecí čerpadlo. [18]

1.6.5 Základní termodynamické děje.

Izochorický děj – probíhá při stálém objemu ($V = \text{konstanta}$). Během tohoto děje se mění tlak a teplota plynu, ale objem zůstává neměnný.

Izobarický děj – charakterizován stálým tlakem ($p = \text{konstanta}$). Při tomto ději se mění objem a teplota plynu, zatímco tlak zůstává stejný.

Izotermický děj – probíhá při stálé teplotě ($T = \text{konstanta}$). Během izotermického děje dochází k změně objemu a tlaku plynu tak, aby teplota zůstala nezměněná.

Adiabatický děj – je proces, při kterém nedochází k výměně tepla s okolím. Tento děj se vyznačuje změnami tlaku, objemu a teploty plynu bez přenosu tepla do nebo z okolí.

Polytropický děj – popisuje vztah mezi tlakem a objemem daný rovnicí $p \cdot V^n = \text{konstanta}$, kde n je polytropický exponent, který závisí na konkrétních vlastnostech procesu a může nabývat různých hodnot v závislosti na tom, jak se mění teplo během procesu.

Adiabatický reverzibilní děj neboli Izoentropický děj, je termodynamický proces, při kterém se entropie systému nezmění. Tento děj je ideálním příkladem teoreticky dokonalého termodynamického procesu, kde dochází ke změnám stavových veličin (tlak, objem, teplota) bez ztrát energie v důsledku tření, odporu, nebo jiných nevratných jevů.

Charakteristiky izoentropického děje:

Bez tepelné výměny: Jako adiabatický děj, izoentropický proces nepřijímá ani nevypouští teplo do okolí.

Reverzibilita: Na rozdíl od obecného adiabatického děje, který může být nevratný, izoentropický děj je vždy vratný. To znamená, že je možné proces obrátit bez ztrát nebo zvýšení entropie v okolním prostředí.

Změny stavových veličin: Přestože proces neprovází tepelná výměna, dochází ke změnám tlaku, objemu a teploty v důsledku vnitřní energetické dynamiky systému.

Využití v praxi: Izoentropické procesy jsou ideálním modelem pro popis ideálního chování plynů v tepelných strojích, jako jsou parní turbíny, kde jsou ideální izoentropické expanze a komprese klíčové pro maximální výkon a účinnost.

Základním kritériem pro hodnocení tepelných cyklů je jejich účinnost. Termická neboli tepelná účinnost je definována jako poměr mezi získanou mechanickou prací a teplem přivedeným do cyklu. Tato účinnost vyjadřuje, jak efektivně je tepelná energie přeměněna na mechanickou práci v rámci daného energetického systému.

Termodynamická, termická, nebo tepelná účinnost je bezrozměrné číslo, které vyjadřuje, jak efektivně teoretický tepelný stroj pracující v uzavřeném tepelném cyklu přeměňuje přivedenou tepelnou energii na mechanickou práci.

η_t – tepelná účinnost

η – účinnost při termodynamických výpočtech

$(1 - \eta_t)$ – popisuje tepelné ztráty

Pro uzavřený cyklus platí rovnice: $Q_p - Q_o - W_p + W_k = 0$ (10)

Q_p : teplo přivedené do cyklu

Q_o : teplo odvedené z cyklu

W_p : práce vykonaná cyklem

W_k : práce spotřebovaná cyklem

$$\eta = \frac{W_p - W_k}{Q_p} = \frac{Q_p - Q_o}{Q_p} = 1 - \frac{Q_o}{Q_p} \quad (11)$$

Termodynamická účinnost je vždy menší než 1.

1.7 Dělení parních turbín

1.7.1 Podle počtu stupňů

Jednostupňová parní turbína: Jednostupňová parní turbína se skládá z rozváděcích lopatek a přidružených oběžných lopatek. Tento typ turbíny je často využíván pro pohon různých strojů, jako jsou čerpadla, turbodmychadla a další zařízení.

Vícestupňová parní turbína: Vícestupňové parní turbíny, které jsou nejčastějším typem v elektrárnách s kondenzačními zařízeními, mají více stupňů určených podle tepelného spádu turbíny.

Podle průběhu tlaku páry ve stupni se turbíny rozlišují na rovnotlaké a přetlakové.

Rovnotlaká parní turbína: Rovnotlaké parní turbíny charakterizuje to, že veškerý tlakový spád je zpracováván na lopatkách rozváděcího kola, zatímco lopatky oběžných kol jsou umístěny na discích rotoru.

Přetlaková parní turbína: U přetlakových parních turbín se zpracování tlakového spádu dělí mezi oběžné a rozváděcí lopatky. Stupeň reakce určuje, jak velká část tlakového spádu je zpracována na jednotlivých kolech. Příkladně, padesátiprocentní reakce na oběžném kole znamená, že obě kola zpracovávají stejný entalpický spád.

1.7.2 Podle parametrů páry

Se sytou párou: - turbíny pracující se sytou párou jsou typické zejména pro jaderné elektrárny s tlakovodními reaktory, přičemž do prvního stupně turbíny vstupuje sytá pára, tedy pára s parametry na pravé mezní křivce T-s diagramu.

S přehřátou párou: - běžně používaná v České republice v různých typech kotlů. Teplota této páry se izobaricky zvyšuje i po dosažení pravé mezní křivky, až na úroveň, pro kterou byl kotel i turbína navrženy. Omezením bývají často materiálové vlastnosti kotlů nebo turbin. V současnosti jsou již běžné bloky s nadkritickými parametry, které dříve nebylo možné konstruovat kvůli materiálovým a technickým omezením.

S párou o nadkritických parametrech – jedná se o páru, která do turbíny vstupuje za podmínek přesahujících kritický bod, kdy tlak překročí hranici 22,1 MPa. V takovém případě dochází k fázové změně, kde fáze mokré páry úplně zmizí a voda se přímo mění na přehřátou páru. Pro tento proces je nutné použít průtočný kotel místo bubnového, aby bylo možné zajistit bezproblémový průběh transformace.

Podle admisního tlaku páry

Nízkotlaké turbíny: Admisní tlak páry: do 1,6 MPa

Středotlaké turbíny: Admisní tlak páry: do 4,5 MPa

Vysokotlaké turbíny: Admisní tlak páry: do 13 MPa

Turbíny s velmi vysokým tlakem: Admisní tlak páry: nad 13 MPa

Admisní pára nebo také vstupní pára, je pára, která je přivedena z kotle do turbíny a je charakterizována určitými parametry jako je vyšší tlak, vyšší teplota a specifická suchost. Vstupuje do prvního stupně parní turbíny nebo parního motoru. [9]

1.8 Přehled základních parních kotlů používaných v energetice

Dělení kotlů podle pracovního média je způsob, jak klasifikovat různé typy kotlů podle toho, co v nich cirkuluje během provozu a jakým způsobem se toto médium zahřívá a přenáší teplo. Základní dělení je na horkovodní a parní kotle, přičemž každý z těchto typů má další podkategorie založené na konstrukčních vlastnostech a principu oběhu.

Horkovodní kotle

Horkovodní kotle jsou určeny pro ohřev vody, která nevstupuje do fáze páry. Voda se ohřívá a cirkuluje buď přirozeným oběhem nebo je oběh vynucen čerpadly. Rozlišujeme následující typy:

Skříňový kotel: Má kompaktní skříňovou konstrukci, která zahrnuje všechny hlavní komponenty kotle.

Plamencový kotel: V tomto kotli prochází plamen a spalínové produkty přímo skrz vodní prostor.

Bubnový kotel: Charakteristický jedním nebo více velkými bubny, které shromažďují vodu a páru.

Průtočný kotel (s nuceným oběhem): zahrnuje kontinuální průtok vody skrz kotel bez shromažďování vody nebo páry v bubnech, což umožňuje rychlé reakce na změny v provozních podmínkách a zlepšuje účinnost kotle Parní kotle

Parní kotle jsou navrženy tak, aby voda přecházela v páru, která se pak využívá pro energetické nebo technologické účely. Zde jsou základní typy:

- **Velkoprostorový kotel:** Tyto kotle mají velký prostor pro generování páry, obvykle bubnového typu.
- **Válcový kotel:** Charakterizuje je válcovitý tvar.
- **Žárotrubný (v kombinaci s plamencem) kotel:** skládá se ze dvou ocelových válců s přední a zadní stěnou a vodou chlazenou spalovací komorou. Plamen z hořáku nejprve projde plamencem, kde se ochladí, poté vstupuje do obrátové komory a následně prochází žárovými trubkami do výstupní komory. Při tomto procesu spaliny předávají teplo vodě proudící vně trubek. Tyto kotle neobsahují cirkulační okruh. Žárotrubný kotel může mít různý počet tahů, typicky dva až tři, a je vhodný pro produkci páry v rozmezí 0,2 až 55 tun za hodinu, při tlaku do 5 MPa a teplotě do 450°C. Kotel může dodávat jak sytou, tak přehřátou páru.
- **Vodotrubný kotel:** Voda cirkuluje skrz trubky, které jsou vystaveny plamenům nebo horkým plynům.

Kotle s přirozenou cirkulací

Kotle s přirozenou cirkulací využívají rozdíl hustoty mezi horkou a chladnější vodou k tomu, aby voda cirkulovala bez potřeby čerpadel. Tento princip je základem pro jednoduché a spolehlivé provozy. Voda v kotli se zahřeje, stane se lehčí a stoupá, zatímco chladnější voda klesá, což vytváří přirozený oběh.

- **Jednobubnový kotel:** Jednobubnový kotel funguje na principu přirozené cirkulace, kde rozdíl v hustotě vody a parovodní směsi umožňuje cirkulaci v systému výparníku. Během jednoho oběhu se odpaří jen část vody, což vede k vstupu mokré páry do váren. Kotel s konstantní teplosměnnou plochou má pevně určený konec vypařování a je charakterizován oběhovým číslem „0“, což značí poměr mezi hmotnostním tokem vody a sytou párou vytvořenou výparníkem. V bubnu dochází k zahušťování vody solemi, což vyžaduje periodické odpouštění zahuštěné vody. Kotel zachovává kvalitu páry i při horší kvalitě vstupní vody a je vybaven ohřívákem vody přímo napojeným na buben.
- **Dvoububnový kotel:** Kotel má dva bubny umístěné nad sebou, kde horní je parní buben a spodní, menšího průměru, je vodní buben. Výparník se skládá z obvodových stěn kotle a mezistěn. Hořáky jsou obvykle umístěné na přední stěně.

Rozdělení kotlů dle spalovaného paliva

Roštová ohniště

S přesuvným roštem: Tyto kotle mají mechanizovaný rošt, který se pohybuje a postupně posouvá palivo skrz ohniště, což zajišťuje efektivní spalování.

S pásovým roštem: Zde je palivo položeno na pohybující se pásový rošt, který umožňuje kontinuální dodávku a rovnoměrné spalování.

Fluidní ohniště (atmosférické): V těchto kotlích se palivo spaluje ve fluidním lůžku, kde je materiál (obvykle písek nebo jiný inertní materiál) udržován v pohybu vzduchem. Tento typ kotle je vynikající pro spalování různých druhů tuhých paliv, včetně odpadů, díky vysoké účinnosti a nízkým emisím.

Práškové ohniště (ve vznosu): Palivo je mleté na jemný prášek a vstřikováno do komory, kde je spalováno ve vzdušném proudu. Tento proces umožňuje velmi efektivní a rychlé spalování.

Kapalná paliva

Kotle na kapalná paliva jsou navrženy speciálně pro spalování ropných produktů, jako je topný olej, což vyžaduje specifické hořáky a systémy pro řízení spalování.

Plynová paliva

Tyto kotle jsou konstruovány pro spalování zemního plynu nebo jiných plynů, spalování je čistějším a účinnějším ve srovnání s tuhými nebo kapalnými palivy.

Kombinovaná paliva

Kotle schopné spalovat kombinaci různých paliv, včetně tuhých, kapalných a plyných. Jsou vhodné pro aplikace, kde je nutná flexibilita v závislosti na dostupnosti a ceně paliva.

Odpadní teplo

Tyto kotle využívají odpadní teplo z průmyslových procesů nebo z jiných kotlů pro generování páry nebo teplé vody, což zvyšuje celkovou energetickou efektivitu.

Specifické kotle pro určité typy paliv

Pro hnědá uhlí a odpady: Tyto kotle jsou speciálně navrženy pro spalování hnědého uhlí, které má nižší energetickou hodnotu a vyšší obsah vlhkosti.

Pro černé uhlí: Navrženy pro spalování černého uhlí, které je energeticky bohatší a vyžaduje odlišnou manipulaci a spalovací technologie.

Pro všechny typy tuhých paliv: Univerzální kotle schopné efektivně spalovat různé druhy tuhých paliv.

1.9 Čerpadla

Tato čerpadla zajišťují přečerpávání vody pod vysokým tlakem z jedné části systému druhé, což umožňuje správnou funkci a optimalizaci energetického procesu.

1.9.1 Vysokotlaká čerpadla:

1. **Napájení kotle:** Vysokotlaká čerpadla přečerpávají vodu z napájecí nádrže do kotle, kde se voda přeměňuje na páru. Tato čerpadla musí zvládat velké tlaky, aby překonala tlak parního bubnu a zabezpečila konstantní dodávku vody pro výrobu páry.
2. **Cirkulace v rekuperačních ohřívácích:** Pára vysokého tlaku z turbíny může být znovu využita pro ohřev napájecí vody, která se vrací do kotle. Vysokotlaká čerpadla zde cirkulují vodu skrze různé stupně ohříváků, což zvyšuje celkovou účinnost zařízení.
3. **Dodávka vody do vysokotlakých částí systému:** Kromě kotlů mohou vysokotlaká čerpadla dodávat vodu také do dalších vysokotlakých komponent, jako jsou přehříváky páry, kde se zvyšuje teplota páry již bez zvyšování jejího tlaku.

Výhody vysokotlakých čerpadel:

Efektivita: Pomocí zvyšování tlaku a teploty napájecí vody přispívají k lepší termodynamické efektivitě cyklu, což vede k nižší spotřebě paliva a snižuje emise.

Flexibilita: Vysokotlaká čerpadla umožňují flexibilní řízení průtoků vody a páry v závislosti na potřebách provozu, což je důležité pro udržení stability systému i v různých provozních režimech.

Spolehlivost: Jsou navržena tak, aby odolávala vysokým tlakům a teplotám, což zajišťuje jejich dlouhodobou spolehlivost a minimalizuje riziko provozních závad.

1.9.2 Nízkotlaká čerpadla

Zajišťují cirkulaci vody a dalších teplotnosných médií v nižších tlakových systémech, což je důležité pro chlazení a další pomocné procesy.

Umístění nízkotlakého čerpadla

Před kotlem: Nejčastěji je nízkotlaké čerpadlo umístěno v napájecím řetězci kotle, kde pumpuje vodu z napájecí nádrže do kotle. Tato voda je předtím přehřívána v ohřívácích, aby se snížila termální zátěž kotle.

V kondenzačním zařízení: Čerpadlo může být také použito pro recirkulaci kondenzátu z kondenzátoru zpět do procesu výroby páry. Zde pomáhá udržovat efektivní provoz tím, že minimalizuje ztráty vody a zlepšuje celkovou účinnost cyklu.

Role nízkotlakého čerpadla:

- **Cirkulace vody:** Základní úlohou je zajištění plynulého oběhu vody a teplotního média skrz kotel a ostatní části systému.
- **Podpora efektivity:** Pomocí udržování konstantního průtoku vody čerpadlo zajišťuje, že voda je efektivně přehřívána a přeměňována na páru, což zlepšuje termodynamickou efektivitu celého systému.
- **Prevence korozního poškození:** Významnou rolí čerpadla je také ochrana zařízení před korozi a erozi, která by mohla být způsobena nestabilním nebo neadekvátním průtokem vody.

1.9.3 Napájecí nádrže a odplyňovány

Norma ČSN 07 7401 „Voda a pára pro tepelná energetická zařízení s pracovním tlakem páry do 8 MPa“ stanovuje specifické požadavky na kvalitu napájecí vody pro parní kotle. Dle této normy je nezbytné monitorovat a regulovat závazné ukazatele jako jsou tvrdost, obsah kyslíku, pH, obsah olejů, obsah SiO_2 a vodivost při 25 °C. Kromě těchto závazných ukazatelů norma doporučuje sledovat také další parametry, jako jsou obsah CO_2 , železa (Fe), mědi (Cu), oxidovatelnost a suspenzované látky.

Zajištění těchto požadavků na kvalitu vody je nutná podmínka pro efektivní a bezpečný provoz parních kotlů, protože nevhodná kvalita vody může vést k poškození zařízení, snížení účinnosti a zvýšení provozních nákladů. V souvislosti s tím je v parních kotelnách často používáno zařízení pro termické odplynění, které je instalováno v napájecí nádrži s odplyňovací nástavbou. Toto zařízení pomáhá odstraňovat rozpuštěné plyny, jako je kyslík a oxid uhličitý, z napájecí vody, což je důležité pro prevenci koroze a dalších škod způsobených chemickými reakcemi v parním systému.

Při kontaktu vody se vzduchem dochází k absorpci různých plynů z atmosféry, zejména kyslíku, dusíku a oxidu uhličitého, přičemž kyslík (O_2) a oxid uhličitý (CO_2) jsou v kontextu chemických režimů v tepelných okruzích považovány za nejvýznamnější. Voda s obsahem CO_2 má kyselý charakter a je silně korozivní, zatímco volný kyslík vede k důlkové korozi, která proniká hlouběji do materiálu a je považována za nebezpečnější než plošná koroze způsobená CO_2 .

Základním principem, který se používá k odstranění těchto plynů z vody, je Henryho zákon. Tento zákon uvádí, že koncentrace rozpuštěného plynu ve vodě je přímo úměrná parciálnímu tlaku tohoto plynu nad hladinou vody. V praxi to znamená, že snížením parciálního tlaku plynu nad vodou lze efektivně snížit množství rozpuštěného plynu ve vodě, čímž se minimalizuje riziko koroze v tepelných systémech.

1.9.4 Vysokotlaké ohříváče

přispívají k efektivitě tím, že zvyšují teplotu vody nebo páry před jejich vstupem do turbín, což zlepšuje termodynamický výkon a snižuje spotřebu paliva.

Role vysokotlakého ohříváče:

1. **Zvýšení účinnosti:** Předehřátím vody nebo páry, která vstupuje do parní turbíny, vysokotlaké ohříváče zvyšují její entalpii, což snižuje termodynamický spád nutný k výrobě stejného množství mechanické nebo elektrické energie. Tím pádem turbína pracuje efektivněji a s vyšší účinností.
2. **Redukce kondenzace ve turbíně:** Vysokotlaké ohřívání páry přispívá ke snížení rizika kondenzace ve fázích turbíny, kde pára expandovala a ochladila se. Toto je důležité pro ochranu turbíny před korozí a erozí, které mohou být způsobeny kapalnou vodou v parním proudu.
3. **Optimalizace cyklu:** Vysokotlaké ohříváče umožňují lepší kontrolu nad teplotami a tlaky v rámci celého parního cyklu, což umožňuje optimalizaci provozních parametrů pro různé provozní stavy elektrárny.
4. **Úspora paliva:** Díky vyšší efektivitě celého systému vysokotlaké ohříváče přispívají k nižší spotřebě paliva na jednotku vyrobené energie. Tím se snižují provozní náklady a zároveň se minimalizuje dopad na životní prostředí díky nižším emisím.
5. **Flexibilita v provozu:** Systémy s vysokotlakými ohříváči mohou lépe reagovat na rychlé změny v poptávce po energii, protože jsou schopny rychleji dosáhnout požadovaných provozních parametrů díky efektivnímu řízení teploty a tlaku.

Vysokotlaká a nízkotlaká čerpadla, vysokotlaké ohříváče, a napájecí nádrže jsou zásadní komponenty v procesech výroby tepla a elektřiny přispívají k efektivnímu a bezpečnému provozu energetických systémů. [8]

1.10 Okruh výroby elektrické energie

1.10.1 Alternátor

V tepelných elektrárnách se většinou používá dvoupólový synchronní generátor ($n = 3\,000$ ot/min), výjimečně u vyšších výkonů čtyřpólový ($n = 1\,500$ ot/min). Tento stroj se nazývá turboalternátor častěji generátor. Stator i rotor jsou složeny z plechů s drážkami pro vinutí. Turboalternátor má obvykle hladký rotor.

Rotor alternátoru je na společném hřídeli s turbínou, což umožňuje přenos kinetické energie turbíny na rotor. Otáčením rotoru v magnetickém poli statoru se v alternátoru indukuje napětí na principu elektromagnetické indukce. Turbína a alternátor tvoří turbosoustrojí.

1.10.2 Zvýšení výkonu turboalternátoru

Zvýšení výkonu se dosahuje hlavně prodlužováním rotoru (výkon je dán objemem rotoru, tedy jeho průměrem a délkou, protože rotor je vlastně válec). Tato metoda je ale omezena kritickými otáčkami, při kterých dochází k nadměrnému vlastnímu kmitání rotoru. Rotor může mít délku až 12 m a průměr obvykle do 1 m.

Vyráběné napětí a otáčky

Vyráběné napětí mívá nejčastěji hodnoty 6,3 kV, 10,5 kV nebo 24 kV. Výkon alternátoru se zvyšuje i zvyšováním jmenovitého napětí, což je však omezeno izolačními vzdálenostmi uvnitř stroje.

Otáčky stroje n jsou závislé na počtu pólových dvojic a frekvenci vyráběného napětí podle vztahu:

$$n = \frac{60 \cdot f}{p} [\text{ot.min}^{-1}; \text{Hz}] \quad (12)$$

f – je frekvence [Hz]; p – počet pólových dvojic

Pokud vyrábíme napětí s frekvencí 50 Hz a používáme stroj se dvěma póly ($p = 1$), jsou otáčky $n=3000$ ot/min.

1.10.3 Budič

Synchronní stroj potřebuje ke svému chodu budič, který vytvoří v rotoru magnetické pole. Na budič jsou kladeny následující požadavky:

- **Vysoká provozní spolehlivost:** Budič musí být velmi spolehlivý, aby zajistil nepřetržitý a stabilní chod synchronního stroje.
- **Plynulá regulace ve velkém rozsahu:** Budicí proud musí být plynule regulovatelný v širokém rozsahu, protože na něm závisí indukované napětí v generátoru.
- **Dostatečná rychlost změny budicího napětí:** Budič musí být schopen rychle měnit budicí napětí podle potřeby, aby mohl okamžitě reagovat na změny provozních podmínek.
- **Dostatečná rychlost odbuzení při poruše nebo náhlém odlehčení:** V případě poruchy nebo náhlého snížení zatížení musí budič rychle snížit budicí napětí, aby se zabránilo poškození alternátoru. [10]

Typy budičů

Stejnoseměrný stroj (dynamo):

Stejnoseměrné stroje se používají k vytváření budicího proudu a zajišťují potřebné magnetické pole v rotoru synchronního stroje.

Napájení z vnější rozvodné sítě přes usměrňovač:

Alternátor může být buzen proudem, který je dodáván z vnější elektrické sítě a je upraven pomocí usměrňovače, což umožňuje regulaci budicího proudu.

Samostatný budicí alternátor:

Často se používá samostatný budicí alternátor, který generuje budicí proud pro hlavní synchronní stroj.

1.10.4 Blokový transformátor

Každý alternátor je sériově spojený se svým blokovým transformátorem, který zvyšuje napětí vyrobené generátorem na napětí vhodné pro přenosovou síť. Blokové transformátory jsou obvykle olejové a jejich výkon je shodný s výkonem alternátoru.

Vlastnosti blokového transformátoru:

Typy transformátorů: Blokové transformátory mohou být třífázové nebo tvořeny třemi jednofázovými jednotkami.

Zapojení: Zapojení blokového transformátoru je obvykle typu dY (delta-star), kde delta (d) je na straně alternátoru. Toto zapojení zamezuje šíření třetí harmonické a jejích násobků.

Výkon: Výkon blokového transformátoru je shodný s výkonem alternátoru, což zajišťuje optimální přenos energie bez přetížení.

1.11 Trendy u výrobců průmyslových turbín

Zvýšený zájem o vodík: V posledních letech roste zájem o vodík jako o alternativní palivo pro spalovací turbíny. Důvodem je snaha o snížení emisí skleníkových plynů a boj proti změně klimatu. Vodík je při spalování bezemisní a produkuje pouze vodu. Mnoho výrobců spalovacích turbín, jako je Siemens, Mitsubishi Heavy Industries (MHI), General Electric (GE) a Rolls-Royce, investuje do vývoje spalovacích turbín na vodík. Tyto turbíny jsou stále ve fázi vývoje, ale očekává se, že v budoucnu budou hrát důležitou roli v dekarbonizaci energetického průmyslu.

Zvyšování účinnosti: Výrobci spalovacích turbín se zaměřují na zvyšování účinnosti svých produktů. Toho lze dosáhnout zlepšením konstrukce turbíny a použitím nových materiálů. Zvýšená účinnost vede k nižší spotřebě paliva a emisím skleníkových plynů.

Moderní spalovací turbíny jsou navrženy tak, aby byly flexibilní a mohly rychle reagovat na změny v poptávce po elektřině. To je důležité pro integraci obnovitelných zdrojů energie do energetické soustavy, protože tyto zdroje jsou často nestabilní a jejich výkon se může měnit v závislosti na povětrnostních podmínkách.

Některé příklady trendů u konkrétních výrobců:

Siemens: Siemens vyvíjí spalovací turbíny na vodík s názvem "HL-class" a "SGT-8000H". Tyto turbíny jsou navrženy tak, aby mohly běžet na zemní plyn i na vodík. [11][12]

Mitsubishi Heavy Industries (MHI): MHI vyvíjí spalovací turbíny na vodík s názvem "J-Class". Tyto turbíny jsou navrženy tak, aby byly vysoce flexibilní a mohly rychle reagovat na změny v poptávce po elektřině.[13]

General Electric (GE): GE vyvíjí spalovací turbíny na vodík s názvem "HA-class". Tyto turbíny jsou navrženy tak, aby byly vysoce efektivní a měly nízké emise skleníkových plynů.[14]

Rolls-Royce: Rolls-Royce vyvíjí spalovací turbíny na vodík s názvem "Trent XD". Tyto turbíny jsou navrženy tak, aby mohly běžet na zemní plyn i na vodík a aby byly kompatibilní s existujícími leteckými motory.[15]

Siemens úspěšně testoval svoji plynovou turbínu SGT-400 na provoz se 100% vodíkem. Tento test byl součástí jejich iniciativy na podporu udržitelné energie a dekarbonizace energetického sektoru. Použití vodíku jako paliva je klíčovým krokem k dosažení nízkouhlíkových nebo dokonce bezuhlíkových energetických systémů.

Testování turbíny SGT-400 na 100% vodík ukazuje schopnost Siemensu přizpůsobit své technologie pro budoucí energetické potřeby a přispět k snižování emisí skleníkových plynů.



Obrázek 8. Keramické dlaždice ve spalovací části rotoru spalovací turbíny. [8]

Teplota spalování u nových vysoce účinných konstrukcí dosahuje až 1600 °C. Odvětví spalovacích turbín prochází velkými změnami. Výrobci se zaměřují na vývoj spalovacích turbín na vodík, zvyšování účinnosti, flexibilitu a digitalizaci. Tyto trendy povedou k dekarbonizaci energetického průmyslu a k udržitelnější budoucnosti.

Digitalizace

se stává klíčovým prvkem v odvětví výroby energie, kde hraje stále důležitější roli. Moderní výrobci spalovacích turbín integrací senzorů a pokročilých analytických nástrojů do svých systémů zvyšují možnosti monitorování a optimalizace výkonu svých zařízení. Tento přístup umožňuje provozovatelům elektráren nejen efektivněji spravovat své turbíny, ale také významně snižovat náklady na údržbu.

Kromě toho využívání technologií umělé inteligence a strojového učení přináší revoluci v automatickém řízení procesů a v rozhodovacích mechanismech. Tyto technologie umožňují systémům naučit se z obrovského množství provozních dat, identifikovat vzory a předvídat potenciální problémy nebo nedostatky dříve, než dojde k jejich reálnému projevu.

To nejenže zvyšuje bezpečnost a spolehlivost elektráren, ale také optimalizuje jejich energetickou účinnost a minimalizuje dopady na životní prostředí.

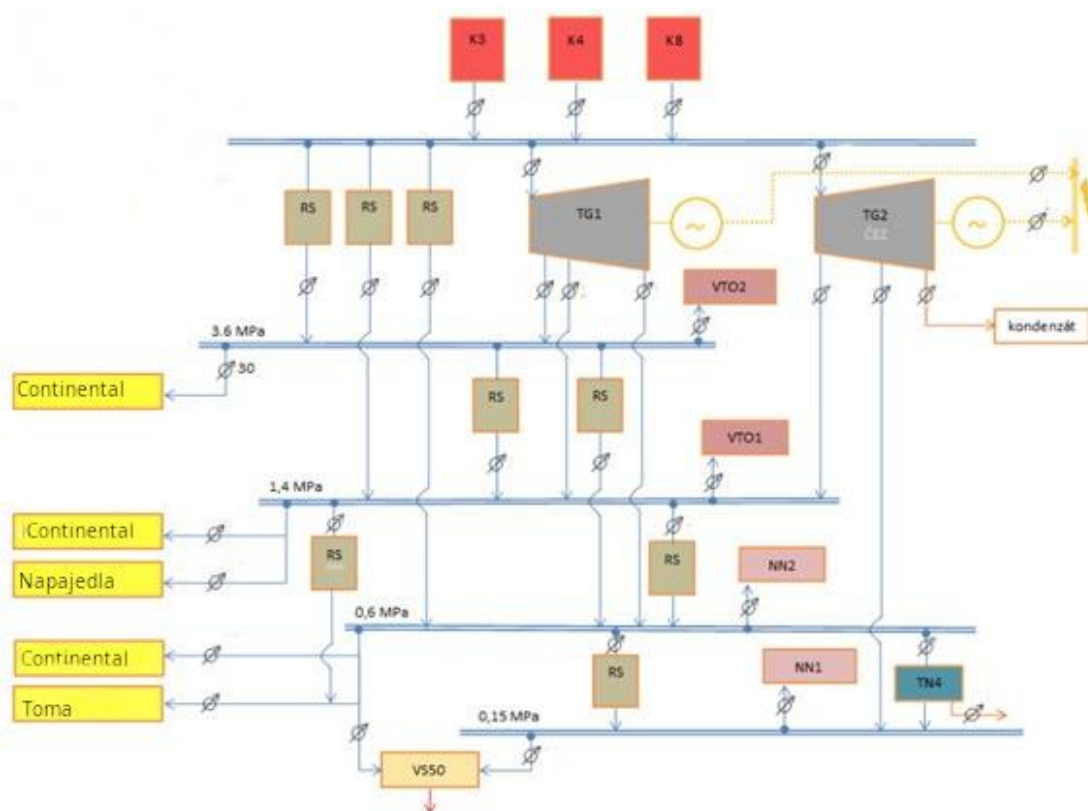
Navíc, implementace nových technologií řízení, jako jsou inteligentní automatizační systémy, umožňuje integraci různých úrovní provozních procesů. Tím se zvyšuje celková flexibilita a adaptabilita v reakci na měnící se podmínky v síti nebo na trhu s energiemi. Integrace těchto pokročilých systémů do praxe také podporuje trend směřující k decentralizaci výroby energie a rozvoji smart grid (chytrých sítí).

Výsledkem je, že díky digitalizaci a novým technologiím se otevírají nové možnosti pro optimalizaci energetických procesů, což přináší nejen ekonomické, ale i environmentální výhody. Tento trend je důležitý nejen pro současnost, ale zejména pro budoucí generace, jelikož přispívá k udržitelnému rozvoji a efektivnímu využívání energetických zdrojů.

2 POPIS SOUČASNÉHO STAVU V TOT

Teplárna Otrokovice je významným energetickým zdrojem ve Zlínském kraji, která poskytuje teplo a elektřinu pro místní průmysl i domácnosti. Tato teplárna využívá kombinaci fosilních paliv a biomasy k dosažení maximální efektivity a udržitelnosti.

Složena ze tří hlavních kotlů na hnědé uhlí, biomasu a zemní plyn, teplárna produkuje páru pro výrobu elektřiny a pro vytápění. Moderní technologie a rozsáhlé parovodní sítě umožňují efektivní distribuci tepla nejen do průmyslových podniků, jako je Continental, ale i do blízkých obcí. Teplárna Otrokovice tak hraje klíčovou roli v energetické infrastruktuře regionu, zajišťuje spolehlivé dodávky energie a přispívá k energetické bezpečnosti oblasti.



Obrázek. 9. Schéma výroby tepla a elektrické energie v TOT

Teplárna, která je předmětem tohoto popisu, se skládá ze tří hlavních kotlů: K3, K4 a K8.

Zemní plyn je do společnosti TOT přiváděn přivaděčem, který na konci potrubí dosahuje hodnoty průtoku 17 000 m³/hod při tlaku 250 kPa. Plyn je následně veden přes redukční stanici, která redukuje tlak na parametry vhodné pro kotel K8, tedy na 250 - 300 kPa s průtokem 400 m³/hod.

2.1 Kotelny

- **Kotel K3:** Tento kotel je poháněn hnědým uhlím a má kapacitu produkovat 96 tun páry za hodinu.
- **Kotel K4:** Tento kotel je na štěpku. Také produkuje 96 tun páry za hodinu.
- **Kotel K8:** Plynový kotel s kapacitou 110 tun páry za hodinu.

Kotel K4 na biomasu

Původní kotel na hnědé uhlí K4 byl přestaven na biomasu, konkrétně na dřevní štěpku. Tato přestavba zahrnovala instalaci nového roštu a dalších technologických úprav. Kromě toho bylo nutné vybudovat prostory pro skladování a dávkování biomasy.

Parametry nového kotle po přestavbě:

- **Palivo:** Po přestavbě je možné spalovat až 50 % dřevní štěpky spolu s uhlím.
- **Technologie:** Instalace nového roštu a další technologie umožňující spalování biomasy.
- **Výroba páry:** 96 t/hod Přesné údaje o výkonu kotle po přestavbě nebyly specifikovány, ale kotel je navržen pro vysokou účinnost a splnění ekologických limitů.
- **Tlak páry:** Přibližně 10 MPa
- **Teplota páry:** Přibližně 510 °C
- **Skladování a dávkování:** Byly vybudovány nové prostory pro skladování a dávkování biomasy, což je klíčové pro stabilní a efektivní provoz.

Kotel K8 – bubnový

Hlavní parametry kotle K8

- **Typ kotle:** Vodotrubný bubnový kotel
- **Palivo:** Zemní plyn
- **Výkon:** 74 MW
- **Výroba páry:** 100 t/hod
- **Tlak páry:** Přibližně 12,5 MPa
- **Teplota páry:** Přibližně 540 °C

Parní rozvod

Vyrobená pára z těchto kotlů prochází třemi redukčními stanicemi, kde se upravuje na technickou páru o tlaku 3,6 MPa, 1,4 MPa, 0,6 MPa. Tato pára je pak parovodem distribuována k dalšímu, především externímu využití.

Další část páry o tlaku 9,6 MPa je vedena do dvou turbín: TG1 a TG2.

2.2 Turbíny

- **Turbína TG1:** Jedná se o protitlakovou odběrovou turbínu s třemi odběrovými stupni:
 - 3,6 MPa – 1. stupeň
 - 1,4 MPa – 2. stupeň
 - 0,6 MPa - protitlak
 - TG1 je napojena na generátor s teoretickým výkonem 27,5 MW.
- **Turbína TG2:** Tato turbína je kondenzační a má dva odběrové stupně:
 - 1,4 MPa – 1. stupeň
 - 0,15 MPa – 2. stupeň
 - TG2 je také napojena na generátor elektřiny s výkonem 27,5 MW.
 - Při provozu TG2 vzniká kondenzát.

2.2.1 Protitlaková odběrová turbína (TG1)

Protitlaková odběrová turbína je zařízení, které využívá energii páry k pohonu generátoru elektřiny. Pára vstupuje do turbíny při vysokém tlaku a prochází postupně přes několik stupňů, kde dochází k expanzi a tím i k poklesu tlaku. Protitlaková turbína TG1 má tři odběrové stupně s tlaky 3,6 MPa, 1,4 MPa a 0,6 MPa.

V protitlakové turbíně je výstupní tlak páry stále vyšší než atmosférický tlak, což umožňuje další využití páry v průmyslových procesech nebo vytápění. Tento typ turbíny je efektivní pro kombinovanou výrobu elektřiny a tepla (KVET), protože umožňuje maximalizovat využití energie páry.

2.2.2 Kondenzační turbína (TG2)

Kondenzační turbína funguje na principu expanze páry až na velmi nízký tlak, často pod atmosférický tlak, kde se pára kondenzuje na vodu. TG2 má dva odběry s tlaky 1,4 MPa a 0,15 MPa. Výhoda kondenzační turbíny spočívá ve vyšší účinnosti při výrobě elektrické energie, protože může expandovat páru na nižší tlak než protitlaková turbína.

Tato turbína je také napojena na generátor elektřiny s výkonem 20 MW. Vznikající kondenzát je možné recyklovat a znovu použít jako napájecí vodu pro kotle, což zvyšuje celkovou účinnost systému.

2.2.3 Systém paralelního řazení protitlaké a kondenzační turbíny

Paralelní řazení odběrové kondenzační a protitlaké turbíny přináší několik významných výhod pro provoz, které zahrnují jak produkci elektrické energie, tak výrobu tepla.

Vlastnosti paralelního řazení protitlaké a kondenzační turbn:

1. **Flexibilita výroby:** Paralelní řazení umožňuje elektrárně flexibilně reagovat na fluktuace v poptávce po elektřině a teple. V závislosti na aktuální potřebě může být zvýšen výkon jedné z turbín, zatímco druhá může pokračovat v provozu s konstantním výkonem nebo naopak.

2. **Optimalizace energetické účinnosti:** Každá turbína může být provozována v režimu, ve kterém je neúčinnější. Protitlaké turbíny jsou efektivní pro výrobu tepla, zatímco odběrové kondenzační turbíny jsou vhodné pro situace, kdy je požadována vyšší produkce elektrické energie.
3. **Zajištění stálého dodávání tepla:** Protitlaká turbína může kontinuálně dodávat teplo i v době, kdy je nízká poptávka po elektřině, čímž se zajišťuje konstantní dávka tepla do tepelné sítě.
4. **Zvýšení spolehlivosti systému:** Při výpadku jedné z turbín může druhá turbína převzít část zátěže, což zvyšuje celkovou spolehlivost systému a minimalizuje riziko výpadku výroby elektřiny nebo tepla.
5. **Lepší využití paliva:** Paralelní provoz obou turbín umožňuje efektivnější využití paliva, protože teplo, které by jinak bylo ztraceno, je využíváno pro výrobu tepla. Tím se snižuje celková spotřeba paliva a emise škodlivin.
6. **Ekonomická efektivita:** Paralelní provoz turbín umožňuje optimalizovat provozní náklady a zvýšit ekonomickou návratnost investic do turbín a celého energetického zařízení.

2.3 Redukční stanice a distribuce páry

- **Pára o tlaku 3,6 MPa:**
Část této páry je redukována na 1,4 MPa přes dvě redukční stanice.
Část této páry je dále redukována na 0,15 MPa z původních 0,6 MPa.
Zbývající pára o tlaku 3,6 MPa je dodávána společností Continental.
- **Pára o tlaku 1,4 MPa:**
Tato pára je dodávána nejen do společnosti Continental, ale také do výměníku pára/voda pro ohřev obce Napajedla.
Přes jednu redukční stanici je pára dodávána také jako výhřevná pára do společnosti TOMA.
- **Pára o tlaku 0,6 MPa:**
Používá se k napájení turbonapajčky, v zimní období dále do výměňkové stanice.
- **Pára o tlaku 0,15 MPa:**
Tato pára je vedena pouze do výměňkové stanice pára/voda.

2.4 Napájecí nádrž

Napájecí nádrž, která je umístěna u dalšího odběrového stupně páry z turbíny, slouží primárně k odplynění a oddělení nekondenzovatelných plynů z kondenzátu. Toto zařízení hraje klíčovou roli v zachování kvality vody v parním cyklu a zajištění efektivního a bezpečného provozu parní turbíny a dalších souvisejících zařízení.

Účely napájecí nádrže:

- **Odplynění:** Během provozu parní turbíny a následné kondenzace páry mohou v kondenzátu zůstat rozpuštěné plyny, jako je kyslík a oxid uhličitý. Tyto plyny musí být z vody odstraněny, neboť mohou způsobovat korozi materiálů a snižovat účinnost energetického systému.
- **Oddělení nekondezovatelných plynů:** Napájecí nádrž umožňuje oddělení těchto plynů od vody, což zajišťuje, že do kotle je dodávána čistá voda bez přítomnosti škodlivých nečistot a plynů, které by mohly poškodit kotel nebo jiné části systému.
- **Zajištění stabilního dodávání vody:** Napájecí nádrž také slouží jako zásobník vody, který zajišťuje kontinuální a stabilní dodávání vody do kotle i v případě krátkodobých fluktuací v poptávce po páře nebo v nabídce kondenzátu.
- **Zlepšení regulace teploty a tlaku:** V některých případech může napájecí nádrž také pomoci s regulací teploty a tlaku v systému, což je důležité pro optimalizaci provozních parametrů a minimalizaci energetických ztrát.[17]

2.5 Redukční stanice

V teplárnách je instalována redukční stanice (RS), která je zapojena v bypassu turbíny. Tato stanice umožňuje obtok páry kolem turbíny a snižuje tlak páry z kotle na požadovanou úroveň. Tento obtok se využívá především při odstavení turbíny, kdy je potřeba zásobovat odběratele teplem. Během redukce tlaku v RS dochází ke ztrátám způsobeným škrcením. Jelikož teplota redukované páry bývá výrazně vyšší než teplota páry z odběrového místa a obvykle přesahuje i požadovanou teplotu pro tepelnou síť, je zapotřebí páru dále ochladit pomocí vstřikového chladiče. K chlazení se využívá buď kondenzát nebo napájecí voda.

Na všech třech odběrech z turbíny (3,6 MPa, 1,4 MPa, 0,6 MPa) jsou také umístěny redukční stanice. Kde nejprve redukují tlak z 9,6 MPa na 3,6 MPa a poté z 3,6 MPa na 1,4 MPa. Tím, že dochází k redukci tlaku, může zde docházet k ochuzení sytosti páry.

2.6 Vysokotlaký ohřívák

tohoto ohříváku závisí na specifických požadavcích a podmínkách provozu společnosti Barum Continental.

Vysokotlaké ohříváky, nainstalované na prvním i druhém odběrovém stupni páry z turbíny, má několik klíčových funkcí v energetickém cyklu, zejména pokud jde o zefektivnění využití energie a optimalizaci provozních procesů. Pára odebíraná z turbíny pro technické využití, jako je v tomto případě u Barum Continental, je typicky využívána pro průmyslové účely, jako je výroba tepla nebo procesní pára pro různé výrobní procesy.

Ohřívák plní funkci pro optimalizaci energetického využití a zefektivnění průmyslových procesů ve společnosti, která páru využívá. Přesná implementace a technické parametry

Funkce vysokotlakých ohříváků:

- **Zvýšení teploty páry:** Po expanzi a redukci tlaku v páře dojde k poklesu její teploty. Ohříváky zvyšují teplotu páry, což zlepšuje její schopnost vykonávat práci a zvyšuje její energetickou účinnost.

- **Zlepšení sytosti páry:** Ohřátím páry dochází k obnově její sytosti, což znamená, že pára obsahuje méně vlhkosti a je vhodnější pro využití v průmyslových procesech, které vyžadují sušší páru.
- **Prevence korozních a erozních škod:** Sušší pára má menší tendenci kondenzovat v potrubí a zařízeních, čímž se snižuje riziko korozních a erozních škod způsobených vlhkostí a kapalnou vodou.
- **Optimalizace provozu a účinnosti:** Ohříváče mohou být nastaveny tak, aby optimalizovaly teplotu páry pro konkrétní potřeby a aplikace, což umožňuje efektivnější a účinnější provoz celého systému.

Použití vysokotlakých ohříváků je důležité pro zachování kvality a účinnosti páry v uvedeném systému, zvláště když je pára využívána pro citlivé průmyslové procesy nebo energetické aplikace, kde je kvalita páry kritickým faktorem.

2.7 Turbonapáječka

Jedná se o zařízení, které se nachází na odběru páry o tlaku 0,6 MPa. Slouží k zásobování kotlů napájecí vodou za využití energie páry, čímž se zvyšuje celková účinnost parního cyklu.

Energie, která by byla jinak ztracena při snižování tlaku páry, je využita k pohonu čerpadla nebo jiného zařízení. Tento proces zvyšuje energetickou účinnost celého systému, protože umožňuje využít dostupnou energii páry místo jejího prostého uvolnění do atmosféry nebo kondenzace.

Zajištění stabilní dodávky vody

Turbonapáječka může sloužit k zásobování kotlů napájecí vodou. Využití energie z páry k pohonu čerpadla zajišťuje, že kotle mají stabilní a nepřetržitý přísun vody potřebné pro tvorbu páry, což je klíčové pro hladký a efektivní provoz kotlů.

Snížení provozních nákladů - využití energie páry k pohonu čerpadla místo elektrické energie může vést k výraznému snížení provozních nákladů. Tím, že využívá dostupnou energii páry, se snižuje spotřeba elektrické energie, což může vést k úsporám.

Optimalizace provozních parametrů - přesné řízení tlaku a teploty páry pomocí turbonapáječky může tímto způsobem optimalizovat provozní parametry celého systému. Tedy i lepší kontrolu teploty a tlaku v různých částech systému, což je důležité pro maximalizaci účinnosti a minimalizaci energetických ztrát.

Shrnutí technických parametrů

- **Technické páry:**
 - 3,6 MPa
 - 1,4 MPa
 - 0,6 MPa
 - 0,15 MPa
- **Distribuce páry:**
 - 3,6 MPa: Do společnosti Continental.
 - 1,4 MPa: Do společnosti Continental, do výměníku pára/voda pro obec Napajedla a jako výhřevná pára do společnosti TOMA.
 - 0,15 MPa: Do výměníkové stanice pára/voda.

Navzdory vysoké efektivitě a moderním technologiím využívaným v Teplárně Otrokovice (TOT), existuje stále prostor pro další zlepšení, zejména v oblasti snížení emisí a zvýšení podílu obnovitelných zdrojů energie.

Následující kapitola se zaměří na analýzu a návrh začlenění inovativních technologií, které by mohly přispět k ještě vyšší efektivitě a ekologické udržitelnosti systému CZT v TOT. Mezi zvažované technologie patří paroplynová elektrárna s možností spoluspalování vodíku, což představuje významný krok směrem k modernizaci a dosažení energetických a environmentálních cílů.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

3 VHODNÉ INOVATIVNÍ TECHNOLOGIE DO STÁVAJÍCÍHO SYSTÉMU

Výroba tepla a elektrické energie v České republice:

Výroba tepla

- **Celková:** V roce 2024 se v České republice vyrobilo **74,4 TWh** tepla.
- **Plynové KVET:** Plynové KVET se podílely na výrobě tepla **20,8 %**, tj. **15,5 TWh**.
- **Paroplynové KVET:** Paroplynové KVET se podílely na výrobě tepla **12,4 %**, tj. **9,2 TWh**.
- **Ostatní zdroje:** Zbýlé teplo (**61,7 %**) pochází z uhelných elektráren (**37,4 %**), biomasy (**12,1 %**), jaderných elektráren (**8,1 %**) a geotermálních zdrojů (**4,1 %**).

Výroba elektřiny:

- **Celková:** V roce 2024 se v České republice vyrobilo **86,1 TWh** elektřiny.
- **Plynové KVET:** Plynové KVET se podílely na výrobě elektřiny **10,2 %**, tj. **8,7 TWh**.
- **Paroplynové KVET:** Paroplynové KVET se podílely na výrobě elektřiny **18,5 %**, tj. **15,8 TWh**.
- **Ostatní zdroje:** Zbýlá elektřina (**71,3 %**) pochází z uhelných elektráren (**44,2 %**), jaderných elektráren (**25,7 %**) a obnovitelných zdrojů (**1,4 %**).

Podíl plynových a paroplynových KVET na výrobě tepla a elektřiny se v posledních letech zvyšuje. Je to způsobeno především klesajícími cenami zemního plynu a rostoucími obavami z emisí skleníkových plynů z uhelných elektráren.

Vláda České republiky si klade za cíl do roku 2030 zvýšit podíl obnovitelných zdrojů energie na výrobě elektřiny na 21 %. Vzhledem k rostoucímu trendu výstavby plynových a paroplynových KVET je pravděpodobné, že tyto elektrárny budou v budoucnu hrát důležitou roli v zajištění stability a flexibility české energetické soustavy. [3]

Jako jednu z možných inovací či optimalizací, které by mohli přijít v úvahu v TOT, ato také především vzhledem k budoucím environmentálním závazkům je paroplynový cyklus

3.1 Popis paroplynového systému.

Paroplynový cyklus (PPC) představuje tepelný proces, který je díky kombinaci dvou sériově zapojených cyklů schopen dosáhnout nejvyšší účinnosti ze všech známých tepelných cyklů. Tato kombinace umožňuje efektivnější přeměnu tepelné energie na energii mechanickou či elektrickou, oproti systémům s jediným cyklem..

Plynové cykly se od parních liší tím, že neprovádějí změnu fáze pracovního média a tudíž probíhají pouze ve stavu plynném. Teplá práce v těchto cyklech je obvykle zajišťována

pomocí tepelných výměníků, přičemž pracovní médium zůstává v rámci systému. Tyto systémy, kde pracovní médium oběh neopouští, se označují jako uzavřené cykly, ale jsou poměrně vzácné.

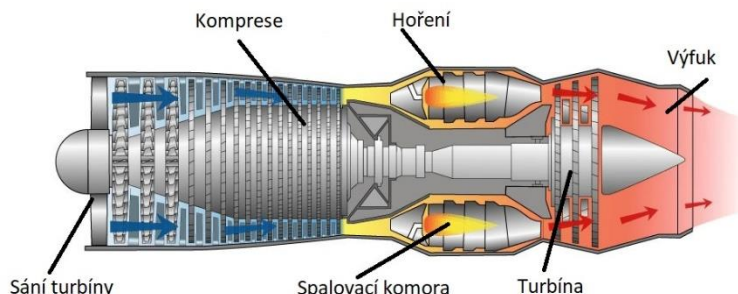
Běžnější jsou otevřené cykly, kde se teplo generuje spalováním paliva, obvykle plynu nebo lehkého topného oleje, přímo ve stlačeném vzduchu z kompresoru. Tento horký vzduch poté prochází plynovou turbínou, kde dochází k jeho expanzi a nespotřebované teplo je vyvedeno do okolí. Tento proces, ve kterém pracovní médium systém opouští, se nazývá otevřený cyklus, a turbína používaná v tomto procesu se často označuje jako spalovací turbína.

3.1.1 Plynová část – otevřený Braytonův cyklus

Základní proces plynové turbíny spočívá v nasávání vzduchu přes vstup vzduchu a jeho průchodu kompresorem, kde je stlačován (zvyšuje se tlak a teplota). Stlačený vzduch pak prochází spalovací komorou, kde je vstřikováno palivo a za pomoci zapalovacího systému se vznítí.

Při spalování se uvolňuje teplo, což způsobuje rychlou expanzi plynů, což vede k tomu, že spalovací komorou opouštějí horké výfukové plyny s vysokou rychlostí. Horké plyny procházejí turbínou, což ji roztáčí.

Tato rotační činnost vytváří mechanickou práci, kterou lze připojit k různým sestavám, jako jsou hnací hřídele nebo hřídele vrtulí atd., pro plnění požadovaných úkolů. Kromě toho, že poskytuje užitečný výkon, jsou některé turbíny navrženy i pro jiné účely, například pro pohon leteckých motorů.



Obrázek 10 Aeroderivativní turbína [21]

V primárním cyklu, se teplo generuje spalováním paliva ve spalovací komoře plynové turbíny. Toto teplo je následně v expanzní části turbíny transformováno na mechanickou energii, což umožňuje výrobu elektrické energie na generátoru. Teplo, které by jinak bylo nevyužité, je předáno do vedlejšího, parního oběhu, pracujícího na nižší teplotě. Zde se teplo vyrobené páry opět transformuje na mechanickou energii. Nejčastěji se v paroplynovém cyklu spojuje Braytonův cyklus spalovací turbíny jako hlavní oběh a Rankin-Clausiov cyklus jako vedlejší oběh.

Paroplynový cyklus, známý také jako kombinovaný cyklus, typicky využívá **otevřený Braytonův cyklus** pro plynovou turbínu a **uzavřený Rankineův cyklus** pro parní turbínu.

Z pohledu termodynamiky je účinnost jakéhokoli cyklu vyšší, když je větší rozdíl mezi střední teplotou přívodu a střední teplotou odvodu tepla. Proto se v praxi uplatňují různá opatření, která mají za cíl zvýšit střední teplotu při přívodu tepla a snížit ji při jeho odvodu.

U plynových cyklů se často využívají techniky jako regenerace tepla, stupňovité spalování nebo mezichlazení. U parních cyklů potom přehřívání páry.

Plynový cyklus operuje mezi relativně vysokými teplotami, kde spaliny vstupují do turbíny při teplotách mezi 1100–1600 °C, což je sice pro účinnost výhodné, ale spaliny cyklus opouštějí také při vysokých teplotách (480–600 °C), což snižuje konečnou účinnost.

Na druhé straně, parní cyklus využívá přehřátou páru o teplotách kolem 560 °C a teplo je odváděno při teplotách okolo 30–40 °C. Z termodynamického pohledu jde o dva oddělené cykly – plynový následovaný parním.

Hlavní inovací je sériové zapojení těchto oběhů, kde se energie ztracená v plynovém cyklu (teplo) využívá v parním cyklu. V paroplynovém cyklu dochází k dvoufázové přeměně tepelné energie na mechanickou a následně elektrickou energii, což má příznivý vliv na celkovou účinnost systému.

Paroplynové elektrárny nabízí významné výhody, jako je vysoká flexibilita v reakci na odběrové špičky, což zajišťuje plynová část cyklu, a také nízké emise na jednotku vyrobené energie. Tato nízká emisnost je dosažena především díky použití paliv, která umožňují efektivní a relativně čisté spalování, jako je zemní plyn.

Braytonův cyklus: používaný v plynových turbínách, zahrnuje stlačení vzduchu, jeho zahřátí spalováním paliva a expanzi v turbíně. Podobně jako v případě Rankine-Clausiova cyklu je zde snaha o zvýšení vstupní teploty spalin pro zvýšení účinnosti, což je v souladu s Carnotovým principem. Snížení teploty spalin po expanzi (např. pomocí rekuperace tepla) rovněž zvyšuje celkovou účinnost cyklu.

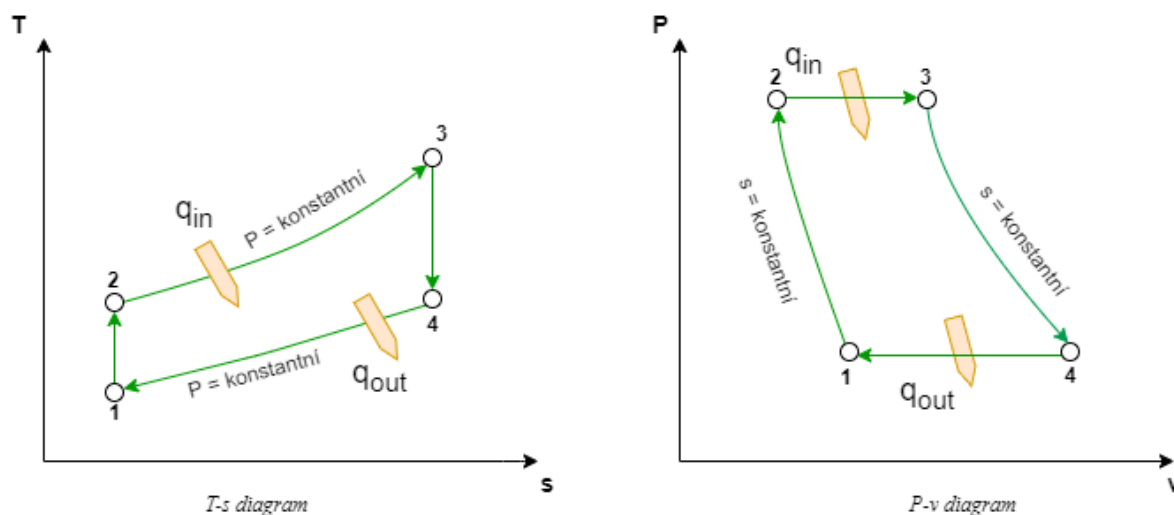
Základní Braytonův cyklus se skládá z těchto prvků:

Kompresor: Proces začíná stlačením vzduchu v kompresoru. Kompresí dojde k ohřátí vzduchu, což napomáhá efektivnějšímu spalování plynu ve spalovací komoře.

Spalovací komora: Zde vznikají spaliny s vysokou teplotou a tlakem, což zlepšuje efektivitu spalování.

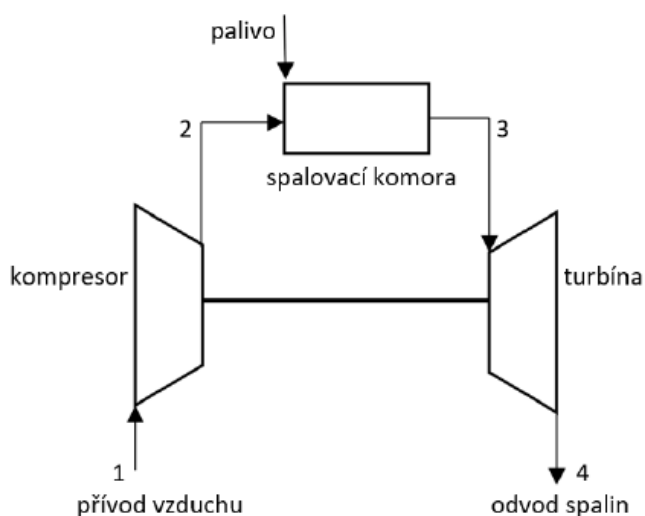
Plynová (spalovací) turbína: Spaliny jsou vedeny do plynové turbíny, kde se část jejich energie přeměňuje na kinetickou energii, která pohání generátor elektřiny na společné hřídeli s turbínou.

Výstup: Horké spaliny opouštějí turbínu a jsou vedeny do utilizačního kotle k výrobě páry.



Obrázek 11 T-s a P-v diagram Braytonova cyklu [17]

Levý graf je T-s diagram, který ukazuje změnu teploty v závislosti na entropii. Na pravo v grafu je p-V diagram, kde je vidět, jak se mění tlak v závislosti na objemu.



Obrázek 12 Schéma otevřeného Braytonova cyklu [18]

Cyklus se skládá ze dvou adiabatických a dvou izobarických procesů.

Od bodu 1 do bodu 2 probíhá adiabatická komprese, během které kompresor přenáší energii na vlhký vzduch, čímž se zvyšuje jeho tlak a teplota.

Od bodu 2 do bodu 3 dochází k izobarickému spalování směsi paliva a vzduchu, což znamená izobarický přísun tepla a výrazný nárůst teploty.

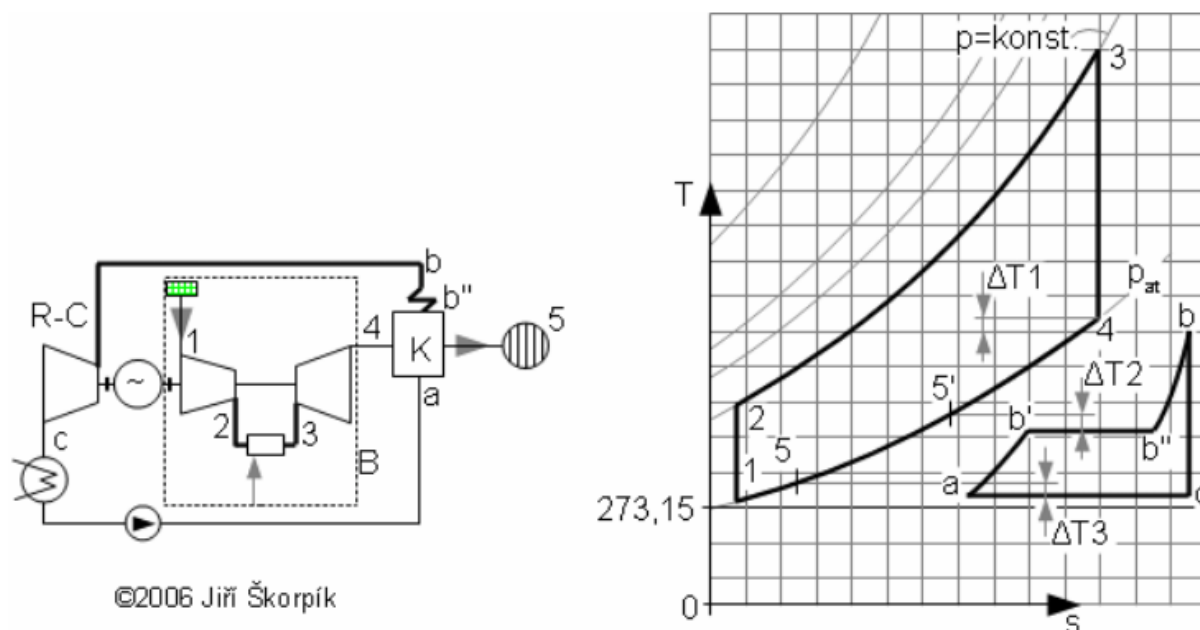
Od bodu 3 do bodu 4 spaliny adiabaticky expandují v turbíně, což vede k poklesu jejich tlaku a teploty. Nakonec mezi body 4 a 1 probíhá izobarický odvod tepla spalin do okolí, kde se spaliny plně integrují do okolního prostředí.

Účinnost plynového cyklu

$$\eta = 1 - \frac{c_p(T_4 - T_1)}{c_p(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{(T_4)}{(T_3)} \quad (13)$$

Maximální teplota spalin za spalovací turbínou je limitována především materiálovými omezeními komponent, které jsou vystaveny těmto teplotám. Použité materiály musí odolávat vysokým teplotám a zároveň zůstat pevné a stabilní. Vyšší teploty spalin znamenají vyšší termickou účinnost cyklu, ale také vyšší nároky na materiály a náklady.

Spodní hranice teploty spalin je kritickým faktorem, protože příliš nízká teplota na výstupu z výměníku může vést k kondenzaci kyselin, což způsobuje korozní škody na výměníkovém zařízení. Nízkoteplotní korozní jevy jsou způsobeny kondenzací kyselých produktů spalování, jako je sírová kyselina, která může kondenzovat, pokud teplota spalin klesne pod tzv. rosný bod kyselin. Ideálně by měl být tepelný výměník co největší, tak aby umožnil maximální vychlazení spalin a tím zvýšil účinnost cyklu. Velký výměník také znamená vyšší pořizovací a provozní náklady, což může ovlivnit celkovou ekonomiku projektu.



Obrázek 13 Základní technologické schéma Paroplynového cyklu a T-s diagram. (Transformační tech [18])

-2 nasání vzduchu a jeho stlačení v kompresoru

2-3 spalování paliva ve spalovací komoře

3-4 expanze spalin v turbínové části plynové turbíny a získání užitečné práce na svorkách generátoru; výfuk spalin z okruhu spalovací turbíny do parního oběhu

4-5' ohřev/výroba páry (syta → ostrá) pomocí odpadního tepla spalin

5'-5 ohřev NV vody odpadním teplem spalin; výfuk spalin do atmosféry

a-b' ohřev NV do stavu syté kapaliny v ekonomizéru
b-b'' vypařování syté kapaliny ve výparníku za vzniku syté páry
b''-b přehřívání páry za vzniku ostré páry v přehříváku
b-c expanze páry v parní turbíně; získání užitečné práce na svorkách generátoru
c-a doprava kondenzátu, resp. NV do ekonomizéru v kotli na odpadní teplo

3.1.2 Parní část - Rankine-Clausiovův uzavřený cyklus:

Rankine-Clausiovův cyklus je základem pro většinu parních elektráren. Tento cyklus využívá vodu a páru k provozu turbíny a k výrobě elektřiny. Pro zvýšení účinnosti je snaha zvýšit teplotu a tlak páry, což se přibližuje vyšší teplotě přívodu tepla, podobně jako u Carnotova cyklu. Snížení teploty kondenzace, často pomocí chlazení vodou nebo vzduchem, zase zlepšuje účinnost odstraněním tepla při nižší teplotě. Optimalizace těchto parametrů vede ke zvýšení účinnosti Rankine-Clausiova cyklu.

Rankine-Clausiovův cyklus - prvky:

Utilizační kotel: Horké spaliny z plynové turbíny ohřívají vodu v kotli, čímž vzniká pára.

Parní turbína: Pára pohání parní turbínu, která generuje elektřinu.

Chladič: Pára se kondenzuje a vrací se zpět do kapalného stavu.

Výstup: Teplá voda z chladiče může být dále využita pro různé stupně odběru.

Tímto spojením obou cyklů dosahuje paroplynový cyklus vysoké účinnosti a minimalizuje energetické ztráty.

Schéma Rankine-Clausiova cyklu jsem uvedl v obecné části o parních turbínách oddílu č:

Paroplynový cyklus označovaný jako GT + HRSG + ST je tedy systém, který kombinuje dva základní termodynamické cykly prostřednictvím utilizačního (spalovacího) kotle: Braytonův cyklus a Rankine-Clausiovův cyklus. Stran snahy o nejvyšší možnou účinnost pracujeme s Carnotovým cyklem – teoretický model.

V kombinovaných cyklech (paroplynových elektrárnách) se Braytonův cyklus v kombinaci s Rankine-Clausiovým cyklem, kde se odpadní teplo z plynové turbíny, které by jinak bylo ztraceno, využívá k výrobě páry pro parní turbínu. Tímto způsobem se energetické ztráty minimalizují a celková účinnost systému se zvyšuje. Spojení těchto dvou cyklů umožňuje lépe využít principy Carnotova cyklu v praxi a dosáhnout tak vyšší účinnosti než při použití každého cyklu samostatně.

Carnotův cyklus je teoretický model ideálního tepelného stroje, který definuje maximální možnou účinnost, jakou lze získat při přeměně tepla na práci mezi dvěma teplotními rezervoáry. Jeho účinnost je dána vztahem:

$$\eta = 1 - \frac{T_{chlad}}{T_{teplo}} \quad \text{kde } T_{chlad} , T_{teplo} \quad (14)$$

Tento cyklus ukazuje, že účinnost je vyšší, pokud je větší rozdíl mezi teplotami teplého a chladného rezervoáru. To podporuje snahu o co nejvyšší možnou účinnost zvyšováním teploty přívodu tepla a snižováním teploty odvodu tepla.

Palivo

Palivo pro paroplynové cykly (PPC) je klíčové pro jejich efektivní fungování. V plynových turbínách dochází ke spalování směsi vzduchu a paliva, přičemž pro správný chod turbíny je nezbytné použít paliva s konstantní výhřevností

Obecně jsou vhodná plynná a kapalná paliva, která těmto požadavkům vyhovují. Paliva pro PPC se základně dělí na:

Spalování kapalného paliva: Vhodné kapalné palivo by mělo obsahovat minimální množství nečistot, které by mohly způsobit zanášení turbín.

Spalování plynného paliva: Přijímána jsou plynná paliva obsahující hořlavé složky jako oxid uhelnatý, vodík a plynné uhlovodíky. Tyto plyny mohou pocházet z přírodních zdrojů, být uměle vyrobené, nebo vznikat jako vedlejší produkty z technologických procesů.

Přestože jsou tato paliva vysoce výhřevná, některá „špinavá“ plynná paliva a některá kapalná paliva (LTO, mazut) mohou vést k problémům, jako je zanášení turbínových lopatek popelovinami po spalování. K prevenci zanášení kompresorů nasávanými nečistotami ze vzduchu se často instalují filtrační systémy.

Další rozlišení paliv v paroplynovém cyklu je založeno na obsahu síry:

Spalování sirnatých paliv: Vyžaduje zvýšenou pozornost vzhledem k vysoké teplotě rosného bodu. Pokud teplota spalin klesne pod tuto hodnotu, může dojít ke kyselé nízkoteplotní korozi.

Spalování paliv bez obsahu síry: Tato paliva umožňují výrazné vychlazení spalin, protože mají nižší rosný bod. To přispívá k lepšímu využití tepla a zvyšuje účinnost výroby páry a celkové využití odpadního tepla spalin.

4 POROVNÁNÍ PAROPLYNOVÉHO A PARNÍHO CYKLU

V klasickém parním R-C cyklu je za ekonomizérem umístěn regenerační ohřívač vzduchu, který využívá zbytkové teplo ze spalín k předehřevu vzduchu určeného pro spalování. Naopak v paroplynovém odpadním kotli se snažíme co nejvíce využít energii z odpadního tepla spalín po průchodu ekonomizérem nebo jinými teplosměnnými plochami.

Další rozdíl je spojen s množstvím napájecí vody. V jednotlakovém kotli paroplynovém cyklu nemá teplota napájecí vody (NV) přímý vliv na množství vyráběné páry. To je dáno potřebou udržet minimální teplotní rozdíl mezi vodou a spalínami, známý jako pinch point, který se typicky nachází v ekonomizéru na jeho teplejším konci -výstupu NV.

Naproti tomu v R-C cyklu se tzv. pinch point obvykle nachází na opačném konci ekonomizéru (vstup NV), kde je průtok vody vyšší než průtok spalín.

Tím pádem teplota napájecí vody ovlivňuje množství vyráběné páry. Ve shrnutí pro R-C oběh platí, že čím vyšší je teplota napájecí vody přiváděná do ekonomizéru, tím menší je teplotní rozdíl mezi vstupem a výstupem vody z ekonomizéru, což zvyšuje produkci páry a zlepšuje tepelný přenos do dalších stupňů kotle.

Ve shrnutí pro R-C oběh platí, že čím vyšší je teplota napájecí vody přiváděná do ekonomizéru, tím menší je text

4.1 Prvky návrhu paroplynového cyklu

4.1.1 Pinch point

Při návrhu parního cyklu je zásadní optimalizace pinch pointu, což je minimální teplotní rozdíl mezi médii v kotli na odpadní teplo. Pinch point má přímý vliv na množství produkováné páry. Nižší hodnota znamená lepší využití odpadního tepla, což však zároveň vyžaduje větší plochu výparníku. Proto je tento parametr kritickým faktorem v návrhu kotle, jelikož významně ovlivňuje jeho rozměry. Je důležité najít optimální rovnováhu mezi plochou tepelného výměníku a efektivitou využití odpadního tepla.

V diagramu se pinch point typicky nachází mezi místem, kde sytá kapalina vstupuje do výparníku, a průchodem spalín. Jeho hodnota obvykle osciluje mezi 9 a 15 °C, což umožňuje dostatečnou efektivitu přenosu tepla při zajištění ekonomické proveditelnosti návrhu kotle.

Kombinovaná výroba tepla a elektřiny

Jednou z hlavních výhod paroplynového cyklu je jeho schopnost vysoce efektivně produkovat elektrickou energii a zároveň generovat významné množství tepelné energie. Tato tepelná energie, uchovávaná ve formě páry nebo horké vody, nachází široké využití v průmyslových a energetických aplikacích. Navíc mnoho průmyslových procesů vyžaduje kombinovanou výrobu tepla a elektřiny, ať už v menších nebo větších objemech. Z tohoto důvodu může být investice do výstavby paroplynového bloku ekonomicky přínosná.

4.1.2 Emise

Při provozu paroplynových zařízení, stejně jako u ostatních tepelných cyklů, dochází k negativním dopadům na životní prostředí. Hlavními environmentálními problémy v paroplynových systémech jsou emise oxidů dusíku (NO_x) a hluk, přičemž při spalování paliv obsahujících síru dochází také k emisím oxidů síry (SO_x). Navíc, nedostatečné chlazení spalín může vést k vypouštění nadměrného tepla do atmosféry, což má rovněž negativní dopad na životní prostředí.

Znečišťující látky ve spalínách vznikající během spalování paliva v plynové turbíně jsou především oxidy dusíku – NO_x. Spaliny mohou obsahovat různé koncentrace vodní páry, kyslíku, dusíku, oxidu uhličitého, oxidu uhelnatého, uhlovodíků, a možná také oxidů síry, popela, chloridů a těžkých kovů, v závislosti na typu paliva a spalovacích podmínkách. Vysoký přebytek vzduchu však efektivně zabraňuje nedokonalému spalování, a proto je koncentrace potenciálně nebezpečného oxidu uhelnatého nízká.[19]

Tento přebytek vzduchu rovněž pomáhá významně ředit znečišťující látky, což umožňuje umisťovat paroplynová zařízení i do hustě osídlených oblastí.

Co se týče emisí NO_x, hlavními faktory ovlivňujícími jejich tvorbu jsou přebytek vzduchu při spalování, teplota stlačeného vzduchu za kompresorem a doba spalování. S rostoucí teplotou se prodlužuje doba spalování, což může vést k nižší produkci NO_x. Jednoduchým způsobem, jak snížit emise NO_x, je ochlazení plamene vstřikem vody nebo páry, což však vyžaduje velké množství demineralizované vody a může snižovat účinnost zařízení. Přesto vstřik vody může mírně zvýšit výkon zařízení, tedy může částečně kompenzovat i snížení účinnosti.[19]

Efektivnější a modernější metodou redukce NO_x je použití katalyzátoru v procesu selektivní katalytické redukce (SCR), kde je do proudu spalín vstřikován amoniak nebo močovina (NH₃). Tento postup přeměňuje NO_x na neškodný plynný dusík (N₂) a vodní páru, které jsou zachyceny na katalyzátoru.

5 ZÁKLADNÍ KOMPONENTY SYSTÉMU PAROPLYNOVÉHO CYKLU

Tato část je věnována popisu komponent spalovací turbíny a systémů výroby páry. Paro-
plynový cyklus typicky zahrnuje následující hlavní komponenty:

- **Plynová turbína:** jedna či více
- **Kotel na odpadní teplo (HRSG – Heat Recovery Steam Generator):** Tento zařízení využívá odpadní teplo z plynových turbín k ohřevu vody a produkci páry.
- **Parní turbína:** Využívá páru z kotle na odpadní teplo k další produkci elektrické energie.
- **Kondenzátor:** Slouží k ochlazování a kondenzaci vyčerpané páry z parní turbíny do vodní fáze.
- **Napájecí nádrž a odplyňovák:** Tato zařízení zajistí, že voda vracená do cyklu je čistá a zbavená plynných nečistot, což zvyšuje efektivitu a životnost systému.

5.1 HRSG (Heat Recovery Steam Generator) - jedná se o výměník tepla ve smyslu spaliny-voda, který využívá odpadní teplo horkých spalin k výrobě páry. Toto zařízení je známé pod různými názvy: spalínový kotel, spalínový výměník, spalínový parogenerátor nebo kotel na odpadní teplo, někdy také utilizační kotel. Jeho funkce – výměna tepla mezi spaliny a vodou/párou – zůstává stejná. V této práci bude používán název spalínový kotel či zkratka HRSG.

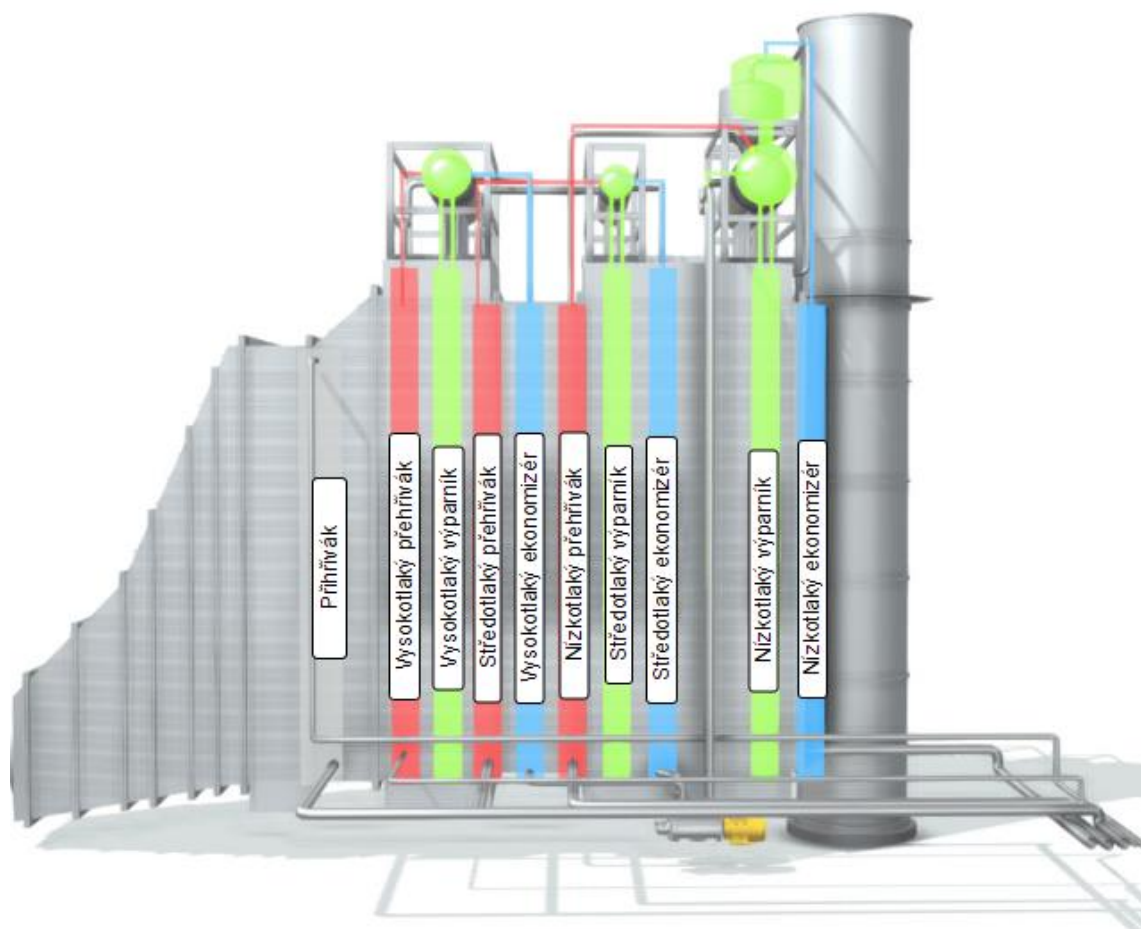
Spalínové kotle mají široké uplatnění. Horké spaliny mohou pocházet z různých zdrojů, např. z plynové turbíny, motorgenerátoru se spalovacím motorem aj. Díky rekuperaci odpadního tepla ze spalin dochází k efektivnějšímu využití energie v palivu, což zlepšuje ekonomiku provozu a snižuje dopad na životní prostředí. HRSG obvykle fungují jako součást:

- **Plynové kogenerace:** Spalínový výměník využívá odpadní teplo spalin z výstupu spalovací turbíny (popř. spalovacího motoru) a vytvářená pára (nebo teplá voda) se využívá pro vytápění či různé technologické procesy, což vede k kombinované výrobě elektřiny a tepla.
- **Paro-
plynové elektrárny:** Spalínový výměník propojuje plynový a parní okruh a slouží jako zdroj tepla pro parní okruh. Pára na jeho výstupu pohání parní turbínu, přičemž se využívá jak spalovací, tak parní turbína.
- **Paro-
plynové kogenerace:** Jedná se o modifikaci předchozího. Za HRSG je zařazeno parní protitlaké soustrojí (popř. parní turbína s regulovanými odběry). Pára se po expanzi v turbíně využívá na další účely, což vede ke kombinované výrobě elektřiny a tepla.

HRSG má několik klíčových tepelných ploch, které umožňují efektivní přenos tepla:

- **Ekonomizér (ohříváč napájecí vody):** Předehřívá napájecí vodu před jejím vstupem do výparníku.
- **Výparník s přirozenou nebo nucenou cirkulací:** Místo, kde dochází k přeměně vody na páru.

- **Přehřívač:** Dále zvyšuje teplotu vzniklé páry pro zvýšení efektivity jejího využití v parní turbíně.



Obrázek 14 Spalinový kotel [16]

V případě parního oběhu s přehříváním obsahuje HRSG také přehřívák. Pokud spaliny na výstupu z plynové turbíny nepřivádějí dostatek tepla, může být do spalínového výměníku zařazen hořák, který zvýší množství generované páry. Dále lze do HRSG instalovat zařízení s katalyzátory, které sníží obsah CO a NO_x ve spalínách na výstupu.

5.2 Turbíny

Rozdělení plynových turbín:

Plynové turbíny jsou rozděleny do tří základních kategorií na základě jejich designu a použití:

1. **Konvenční (heavy-duty) plynové turbíny:** Tyto průmyslové turbíny jsou robustní a mají konstrukci podobnou parním turbínám, což je činí vhodnými pro těžké průmyslové aplikace.

2. **Hybridní (lehké) plynové turbíny:** Tento typ kombinuje konstrukční prvky z leteckého průmyslu s tradičními průmyslovými technologiemi, což umožňuje lehčí a efektivnější design vhodný pro specifické průmyslové aplikace.
3. **Aeroderiváty:** Tyto turbíny jsou odvozeny z motorů, které byly původně vyvinuty pro trysková letadla. Díky vysoké účinnosti a schopnosti rychlého startu jsou ideální pro aplikace vyžadující rychlou odezvu na změny v poptávce po energii.

Každý typ turbíny má své specifické výhody a je vhodný pro různé aplikace v energetice a průmyslu, což umožňuje optimalizaci provozu a maximální využití generovaného tepla a energie.

Turbokompresor

Turbokompresor je zásadní součástí spalovací turbíny, která nasává vzduch nutný pro spalovací proces. Existují dva hlavní typy kompresorů: objemové a rychlostní. Objemové kompresory stlačují plyn snížením jeho objemu, zatímco rychlostní kompresory, jako jsou turbokompresory, zvyšují tlak přeměnou kinetické energie na tlak.

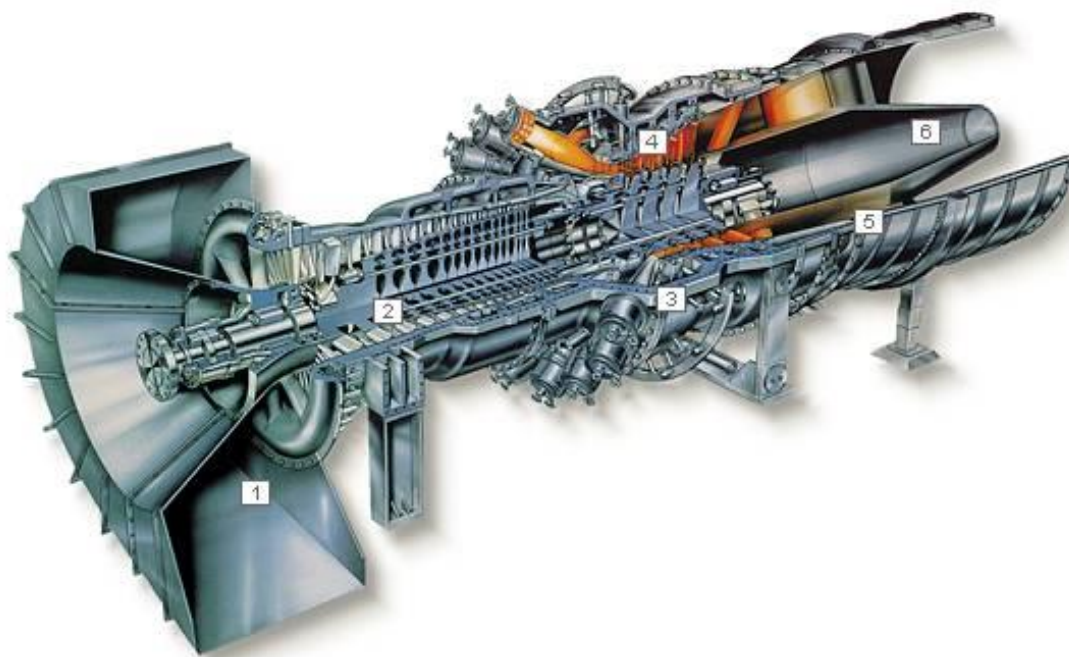
Mezi rychlostní kompresory patří ejektory, které fungují bez mechanicky se pohybujících částí a stlačují vzduch pomocí hnací tekutiny, a turbokompresory, které jsou využívány v plynových turbínách pro svou schopnost efektivně zvyšovat tlak vzduchu přeměnou hybnosti ve stlačený vzduch při průtoku rotorovou částí stroje.

Spalovací komora

Ve spalovací komoře dochází k reakci směsi vzduchu dodaného z turbokompresoru a paliva, v důsledku čehož vznikají spaliny. Tato komora je vybavena několika hořáky rozmístěnými prstencově po jejím obvodu, které zahajují proces hoření. Pro účinné spalování v plynových turbínách, respektive ve spalovací komoře, je klíčový dostatečný přebytek vzduchu, označovaný jako koeficient přebytku vzduchu α .

Důvodem vyššího přebytku vzduchu u spalovacích turbín je potřeba ochladit spaliny na 700 až 1100 °C. Vyšší poměr vzduchu však způsobuje zpomalení a nestabilitu spalování. Proto se spalovací vzduch dělí na primární a sekundární.

Primární vzduch spaluje palivo s nižším přebytkem (1,3 až 1,5) při teplotě mezi 1500 a 2000 °C, zatímco sekundární vzduch dále ochlazuje spaliny. Aby bylo spalování paliva s primárním vzduchem stabilnější a rychlejší, mohou se použít například různé víříče vzduchu. Smísením se sekundárním vzduchem by mělo zajistit rovnoměrné rozložení teploty na výstupu ze spalovací komory.



Obrázek č. 15 Spalovací turbína typická pro Siemens, MHI, GE [15]

- 1) Vstupní sekce – vzduch
- 2) Kompresorová sekce – adiabatické stlačení, zahřátí vzduchu
- 3) Spalovací sekce – prstencová spalovací komora
- 4) Turbínové sekce – turbínové lopatky s tepelnou povrchovou úpravou a film coolingem
- 5) Výfuková sekce – spaliny odchází do spalínového kotle

6 VODÍK

Vodík se stává stále důležitějším prvkem v energetickém mixu budoucnosti. Má potenciál nahradit fosilní paliva v dopravě, průmyslu a energetice, a to díky svým nízkým emisím a vysoké energetické hustotě.

V dopravě se vodík používá v palivových článcích k napájení elektromotorů v bezemisních autech, autobusech a kamionech. Vodík se také zkoumá pro letectví a lodní dopravu.

V průmyslu se vodík používá jako surovina pro výrobu hnojiv, oceli a dalších chemikálií. Může se také používat k ukládání energie z obnovitelných zdrojů, jako je solární a větrná energie.

V energetice se vodík používá v plynových elektrárnách k výrobě elektřiny. Může se také skladovat a používat jako záložní zdroj energie v případě výpadku sítě.

I když existují výzvy, které je nutné překonat, jako je vysoká cena vodíku a nutnost vybudovat infrastrukturu pro jeho distribuci a skladování, vodík má potenciál stát se klíčovou součástí udržitelné energetické budoucnosti.

6.1 Výroba vodíku - elektrolýza

Elektrolýza je proces, při kterém se elektrická energie používá ke vzniku chemické reakce, která by za normálních podmínek nebyla samovolná. Typickým příkladem elektrolýzy je rozklad vody (H_2O) na vodík (H_2) a kyslík (O_2) pomocí elektrického proudu.

Elektrolýza vody:

1. **Elektrolyzér** - zařízení, ve kterém probíhá elektrolýza. Skládá se ze dvou elektrod ponořených do vodného roztoku elektrolytu.
2. **Elektrický proud** je veden do elektrolyzéro, což způsobí ionizaci molekul vody.
3. Na **katodě** (záporná elektroda) dochází k redukci iontů vodíku (H^+) na molekulární vodík (H_2).
4. Na **anodě** (kladná elektroda) dochází k oxidaci hydroxidových iontů (OH^-) nebo molekul vody na molekulární kyslík (O_2).
5. Membrána odděluje plynné produkty H_2 a O_2 .
6. Výsledkem je tedy oddělená produkce vodíku a kyslíku.

6.1.1 Alkalický elektrolyzér je typ elektrolyzéro, který používá alkalický elektrolyt, typicky roztok hydroxidu sodného (NaOH) nebo hydroxidu draselného (KOH).

Konstrukce elektrolyzéro:

Skládá se ze dvou elektrod, katody a anody, které jsou obvykle vyrobeny z odolných materiálů, jako je nerezová ocel nebo nikl.

Elektrody jsou ponořeny v elektrolytu, kterým je koncentrovaný roztok- NaOH nebo KOH .

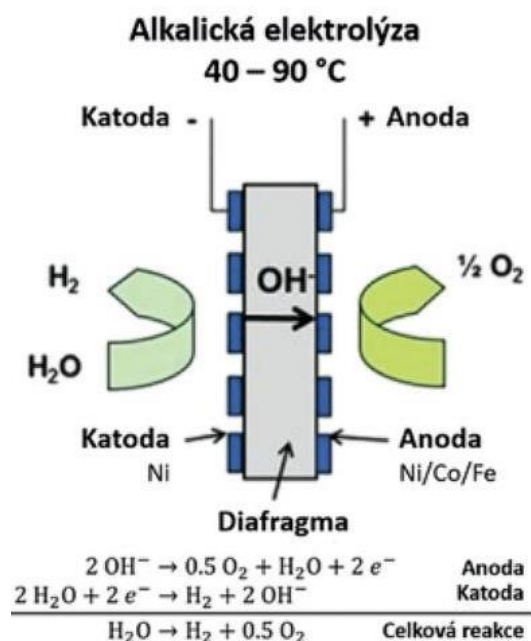
Mezi elektrodami je diafragma (membrána) nebo separátor, který umožňuje průchod iontů, ale zabraňuje smíchání vzniklého vodíku a kyslíku.

Průběh reakce:

Na katodě: Vodní molekuly se redukují na vodík a hydroxidové ionty podle rovnice: $2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 + 2\text{OH}^-$

Na anodě: Hydroxidové ionty se oxidují na kyslík a vodu podle rovnice: $4\text{OH}^- \rightarrow \text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^-$

Diafragma - vyrobená z porézních materiálů, jako jsou keramika, či různé druhy polymerů. Diafragmy jsou méně selektivní, což znamená, že umožňují určitý přesah iontů a molekul mezi anodou a katodou. Jsou navrženy tak, aby minimálně zasahovaly do toku iontů, ale nejsou úplně iontově selektivní.



Obrázek 16. Alkalická výroba vodíku.[22]

Technologie s nízkou provozní teplotou. Jako elektrolyt se používá roztok hydroxidu draselného s koncentrací mezi 20 až 40 hm. %. Tyto elektrody jsou obvykle vyrobeny z perforované oceli a jsou opatřeny katalyzátory z niklu, kobaltu, nebo železa. Pro zabránění smíšení produkovaných plynů – kyslíku a vodíku – jsou elektrodové prostory odděleny diafragmou. Alkalická elektrolýza patří mezi nízkonákladové technologie s uváděnou účinností 60 -80 % . Získaný vodík dosahuje čistoty 99,8%.

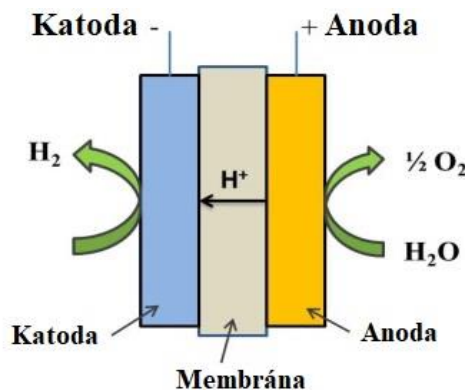
6.1.2 PEM elektrolýzér (Proton Exchange Membrane electrolysis)

Konstrukce elektrolýzérů

Polymerní membrána - nejdůležitější součástí PEM elektrolýzérů je protonově vodivá membrána, která aktivně umožňuje přesun pouze určitých iontů (typicky H^+ iontů) a zabráňuje migraci ostatních molekul nebo iontů, což zvyšuje efektivitu elektrolýzy. Iontově selektivní schopnost zajišťuje, že vodík a kyslík se vyvíjejí odděleně na opačných stranách membrány.

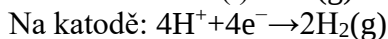
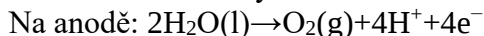
Elektrody - na obou stranách membrány jsou umístěny elektrody – anoda a katoda. Na anodě dochází k oxidaci vody a uvolňování kyslíku, zatímco na katodě probíhá redukce protonů a tvorba vodíku. Elektrody jsou často vyrobeny z porézních uhlíkových materiálů a jsou pokryty katalyzátorem (typicky platina nebo její slitiny), který zvyšuje efektivitu elektrochemických reakcí.

Katalyzátory - pro zvýšení účinnosti reakce a snížení potřebného přebytkového napětí (overpotential) jsou elektrody opatřeny katalyzátory, které usnadňují elektrochemické reakce uvolňování kyslíku a vodíku.



Obrázek 17. PEM výroba vodíku.[22]

Elektrolýza v PEM elektrolyzáru začíná přivedením elektrického proudu do systému. Elektrony putují z anody na katodu přes externí obvod, zatímco protony (H^+) migrují skrze membránu od anody k katodě.

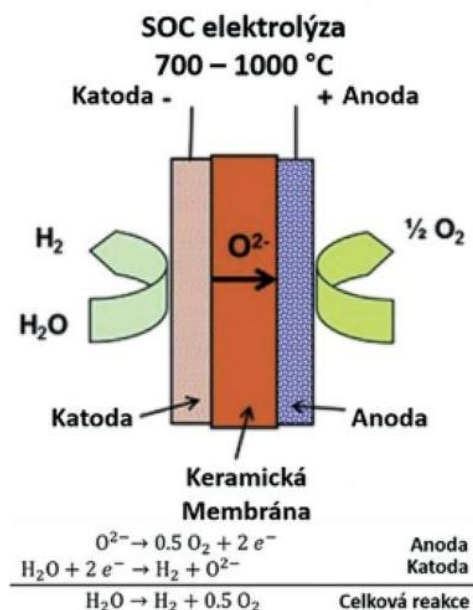


Mezi hlavní přednosti patří vysoká čistota výsledných plynů a kompaktní design. Účinnost PEM elektrolýzy se pohybuje mezi 67 a 82 %. PEM palivové články fungují na podobném principu, ale v obráceném směru. Výzkum a vývoj v oblasti PEM technologií se zaměřují především na snižování obsahu drahých kovů a prodlužování životnosti, nebo na vývoj kombinovaných zařízení, která by integrovala elektrolyzáru a palivový článek do jednoho systému.

6.1.3 Vysokoteplotní elektrolýza (SOEC)

Konstrukce elektrolyzáru

1. **Zdroj tepla:** Na rozdíl od běžnějších typů elektrolyzáru, které používají kapalnou vodu, SOEC přivádí teplo ve formě páry, což zvyšuje celkovou energetickou účinnost procesu.
2. **Provozování za vysokých teplot:** SOEC pracuje při vysokých teplotách, obvykle mezi 700 až 900 °C, což umožňuje lepší termodynamickou efektivitu a snižuje potřebu drahých katalyzátorů.
3. **Elektrolyt a elektrody:** V tomto systému se používá pevný keramický elektrolyt, který propouští pouze kyslíkové ionty (O_2^-) z katody k anodě. Na anodě tyto ionty reagují a vytvářejí molekulu kyslíku O_2 , zatímco přebytečné elektrony putují vnějším obvodem na katodu, kde reagují s párou a produkují vodík.



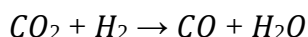
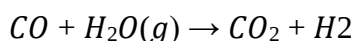
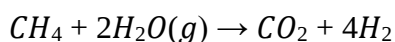
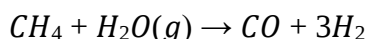
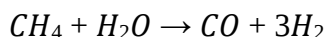
Obrázek 18. SOEC výroba vodíku.[22]

Vysokoteplotní elektrolyzéry (SOEC) se vyznačují provozem při teplotách obvykle mezi 700 až 900 °C. Vyšší teplota umožňuje dosahovat celkové účinnosti přesahující 90 %, dále i vyšší teplota a tlak znamenají, že není nutné využívat drahé katalyzátory. Lze použít nikl v cermetových materiálech. Nicméně, vysoká provozní teplota přináší i několik výzev. Velikost zařízení je obvykle větší, což může být omezující pro některé aplikace. Dalším problémem je relativně nízká čistota vodíku, který obvykle obsahuje až 10 % vodní páry.

[23] [24]

6.1.4 Parní reforming

Parní reforming zemního plynu je nejrozšířenější a ekonomicky nejvýhodnější metodou pro výrobu vodíku. Tento proces využívá jako vstupní suroviny zemní plyn, konkrétně metan (CH₄), a vodu. Reakce se odehrávají při teplotách mezi 700 až 1400 °C, přičemž specifická teplota závisí na typu použitého katalyzátoru. Při přítomnosti katalyzátoru se teplota udržuje v rozmezí 700–900 °C. Zemní plyn je smíchán s vodní párou, která se vytváří rekuperací tepla z ohřívání spalin vodou. Tato směs je poté přivedena do reaktoru, kde je pro průběh reakce zapotřebí zvýšená teplota, což je zajištěno přímým spalováním zemního plynu a odpadního plynu z čisticích procesů dané technologie. Tyto podmínky jsou klíčové pro následující chemické reakce.



V první fázi procesu parního reformingu zemního plynu dochází k produkci směsi oxidu uhličitého a vodíku z vodní páry a metanu. V dalším kroku je k reakční směsi přidána další vodní pára, která reaguje s oxidem uhličitým a vede k tvorbě vodíku a oxidu uhelnatého. Množství vzniklého vodíku závisí především na poměru dodané vodní páry a obsahu uhlíku ve směsi. [21] *Hydrogen generation by steam reforming*

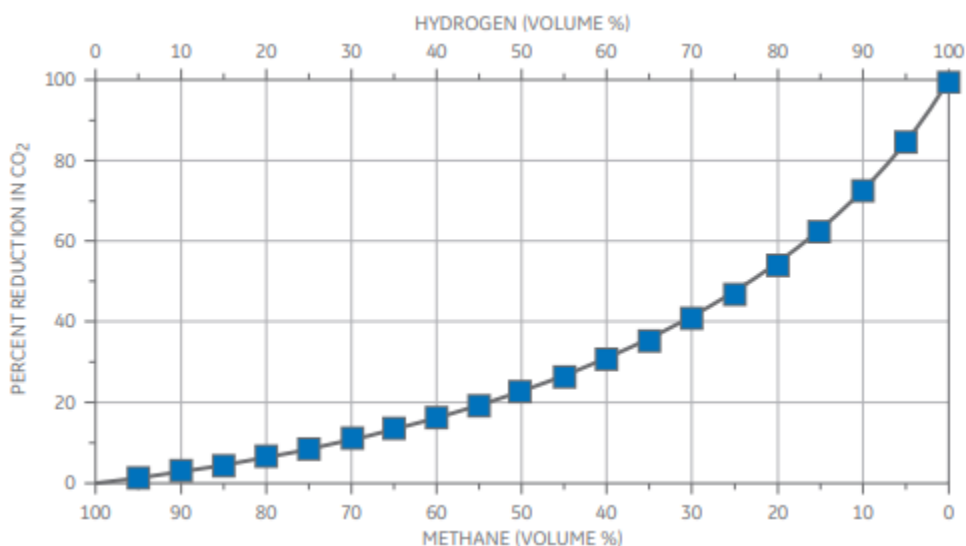
7 PAROPLYNOVÝ CYKLUS – SPALOVÁNÍ VODÍKU

V současnosti je vodík považován za jednu z alternativních metod výroby elektrické energie, která by mohla nahradit fosilní zdroje. Ty jsou v kontextu evropské legislativy stále více omezovány kvůli vysokým emisím, jež vznikají jejich spalováním. Jelikož vodík neobsahuje žádný uhlík, jeho spalování nevede k uvolňování oxidu uhličitého (CO₂), což je hlavní příčina skleníkového efektu.

Předpokládá se tedy, že vodík, zejména takzvaný zelený vodík získaný elektrolýzou vody s využitím elektrické energie z obnovitelných zdrojů, bude v budoucnu široce využíván.

Elektrická energie může být generována vodíkem několika způsoby, včetně jeho spalování v plynových turbínách.

Vodík může být spalován samostatně nebo ve směsi s jinými palivy, často s přírodním plynem, v plynových turbínách. Proporce vodíku ve směsi s přírodním plynem má specifické výhody i nevýhody a přináší různé technologické výzvy.



Obrázek 19 Graf závislosti snížení množství CO₂ a objemovém množství směsi zemního plynu a vodíku.[23]

7.1 Vlastnosti zemního plynu a vodíku

Vodík lze při provozu plynových turbín kombinovat se zemním plynem několika způsoby, například přímým vstřikováním do transportního potrubí nebo smícháním na směšovacích stanicích před vstupem do plynového cyklu.

Vzhledem k odlišným fyzikálně-chemickým vlastnostem zemního plynu a vodíku se vlastnosti výsledné směsi, jako jsou tlak, teplota a složení, liší od čistého zemního plynu. Tyto rozdíly mohou mít vliv na efektivitu a stabilitu celého plynového cyklu.

Přidání vodíku do zemního plynu může zásadně ovlivnit průběh Joule-Thomsonova jevu, který se vyznačuje nevratnou expanzí plynu do oblasti s nižším tlakem. Tento jev lze definovat jako změnu teploty plynu, která je vyvolána změnou tlaku při konstantní entalpii, a je popsán vztahem.

$$\mu_{JT} = \left(\frac{dT}{dp} \right) \quad (15)$$

Kde μ_{JT} představuje Joule-Thomsonův součinitel (K/Pa). Smíšení vodíku s metanem mění hodnoty tohoto součinitele, což má za následek odlišné tepelné chování směsi během expanze, což může ovlivnit termodynamické vlastnosti a účinnost procesu v plynových turbínách.

Joule-Thomsonův jev ovlivňuje chování plynu při změnách tlaku. Methan (zemní plyn) má kladný Joule-Thomsonův součinitel, což znamená, že při poklesu tlaku dochází k poklesu teploty. To je důležité zejména na regulačních stanicích, kde pokles tlaku může vést ke snížení teploty a potenciálně i k kondenzaci některých složek plynu, což může způsobit technické problémy, jako jsou zácpy potrubí nebo poškození zařízení.

Na druhé straně, vodík má při běžných teplotách záporný Joule-Thomsonův součinitel, což znamená, že jeho teplota při expanzi (poklesu tlaku) neklesá, ale naopak může stoupnout. Když se vodík smíchá se zemním plynem, výsledná směs má upravený Joule-Thomsonův součinitel, který je nižší než součinitel čistého zemního plynu. Tím se mírní pokles teploty během expanze plynu na regulačních stanicích. To může pomoci předcházet některým z problémů spojených s kondenzací, zlepšuje manipulaci s plynem a zvyšuje bezpečnost celého systému.

Vodík, ve srovnání se zemním plynem, má nepochybnou výhodu v tom, že při spalování nevznikají emise CO₂. Avšak jeho spalovací charakteristiky vedou ke zvýšené produkci emisí NO_x. Klíčovým faktorem pro kontrolu těchto emisí je regulace teploty ve spalovací komoře, kterou lze efektivně řídit přesným nastavením poměru vzduchu a paliva. K redukci emisí NO_x se proto často používají tzv. DLN hořáky (dry low NO_x) nebo DLE hořáky (dry low emissions). Tyto technologie, i když se název může lišit podle výrobce, využívají podobné principy k minimalizaci výskytu oxidů dusíku během spalování.

7.1.1 Wobbeho index

Dle ČSN EN 437 se jedná o „*poměr hodnoty plynného paliva na jednotku objemu a druhé odmocniny jeho relativní hustoty při stejných srovnávacích podmínkách*“. Rozdílné spalovací vlastnosti dvou plynných paliv, zejména výhřevnost a hustota, mohou při jejich vzájemné náhradě významně ovlivnit zařízení, ve kterých se paliva používají. Tento fenomén, známý jako záměnnost plynných paliv, je charakterizován pomocí Wobbeho čísla. Wobbeho číslo, které se vypočítává jako poměr výhřevnosti paliva k jeho relativní hustotě, je klíčovým ukazatelem toho, jaké množství energie lze získat při spalování určitého objemu paliva. Vyšší hodnota Wobbeho čísla naznačuje, že palivo poskytuje více energie na jednotku objemu, což umožňuje efektivnější spalování ve spotřebičích navržených pro paliva s nižším Wobbeho číslem.

$$W_i = \frac{Q_i}{\sqrt{d_i}} \quad (16)$$

Q_i je výhřevnost, d je relativní hustota definovaná jako poměr hustoty plynu a hustoty suchého vzduchu při stejných podmínkách

Pokud rozdíl Wobbeho čísla mezi směsí zemního plynu s vodíkem a původním zemním plynem překročí určenou toleranci, v takovém případě je nutné použít speciální hořáky, které jsou navrženy pro spalování plynu s upravenými vlastnostmi.

7.1.2 Rychlost plamene

Rychlost plamene hraje důležitou roli ve spalovacích procesech a obzvláště při práci s různými palivy. V případě vodíku je rychlost plamene výrazně vyšší než u methanu (zemního plynu), což s sebou přináší specifická rizika, jako je flashback, tedy zpětný náraz plamene. Tento jev může nastat především z několika důvodů:

1. **Vysoká rychlost plamene:** Jak už bylo zmíněno, vodík má mnohem vyšší rychlost plamene, což může vést k tomu, že plamen se dostane do hořáku nebo přívodních potrubí, což je velmi nebezpečné.
2. **Nízká energetická hustota na objem:** díky nižší energetické hustotě na objem ve srovnání s methanem, dochází k rychlejšímu šíření plamene ve směsi.
3. **Turbulence:** Vysoká turbulence ve spalovací komoře může dále usnadnit flashback, zvláště v kombinaci s vysokou rychlostí plamene.

7.2 Parametry vodíku

Vlastnost	Vodík (H ₂)	Metan (CH ₄)
Molární hmotnost	2,016 g/mol	16,043 g/mol
Bod varu	-252,8 °C (-423,0 °F)	-161,5 °C (-258,7 °F)
Bod tání	-259,1 °C (-434,4 °F)	-182,5 °C (-296,5 °F)
Hustota (plyn)	0,0899 kg/m ³	0,717 kg/m ³
Měrná tepelná kapacita	14,31 kJ/(mol·K)	5,19 kJ/(mol·K)
Spalné teplo (standardní)	-285,8 kJ/mol	-891,3 kJ/mol
Dolní výhřevnost (LHV)	286,0 MJ/kg	50,0 MJ/kg
Rychlost detonace	2800 m/s	1730 m/s
Teplota samovznícení	500 °C (932 °F)	580 °C (1076 °F)
Rychlost plamene	300 cm/s	40 cm/s
Výhřevnost	120 MJ/kg	50 MJ/kg

Tabulka 1 Základní vlastností vodíku a zemního plynu

S vyšším obsahem vodíku, teplotami a tlaky se zvyšuje migrace vodíku do materiálu potrubí, což je usnadněno malou velikostí atomu vodíku. Části turbíny vystavené spalinám nevyžadují speciální úpravy, avšak je nutné brát v úvahu potenciální zvýšené tepelné namáhání, které je možné kompenzovat intenzivnějším chlazením. Doporučuje se také provádět častější kontroly spalinových cest, aby byla včas odhalena případná skrytá poškození.

Vzhledem k tomu, že spalováním vodíku dochází k nárůstu podílu páry ve spalinách, je důležité dbát na správné vychlazení spalin. S rostoucím podílem vodní páry ve spalinách se zvyšuje také teplota rosného bodu, což může vést ke kondenzaci spalin při vyšších teplotách.

Potřeba zvýšené flexibility se odráží zejména ve vývoji hořáků. Pro efektivní spalování vodíku je nutné používat speciálně navržené hořáky, jak je popsáno v kapitole 4.1.1. S narůstajícím podílem spalovaného vodíku je rovněž nezbytné provádět úpravy na systémech pro přívod paliva. V projektovém návrhu je klíčové zohlednit teplotu a tlak, za kterých je vodík dodáván do spalovací komory. [17] Spoluspalování paliva je bez problémů možné při teplotě do 110 °C, tlaku do 50 barů a s obsahem vodíku do 10 objemových procent. Při vyšších koncentracích vodíku, vyšších teplotách a tlacích dochází k migraci vodíku do materiálu potrubí, což usnadňuje jeho malá atomová velikost. Z hlediska odolnosti vůči vodíkové křehkosti se jako vhodný materiál uvádí nerezová ocel EN 1.4404 [33]

Kmitání během spalování představuje pro spalovací turbíny značné riziko. Extrémně vysoké teploty ve spalovací komoře, dosahující až 1600 °C, zatěžují válce hořáků, což vede k hlasitému akustickému jevu způsobenému specifickými frekvencemi těchto válců. Navíc vysoká rychlost plamene vodíku a jeho odlišné spalovací charakteristiky, jako je změněný tvar a poloha plamene, vyvolávají oscilace plamene, což vede k fluktuaci tlaku při spalování. Pokud by došlo k rezonanci těchto dvou typů kmitání, což je kvůli krátké době zpoždění zážehu vodíku poměrně pravděpodobné, mohlo by to vést k poškození hořáku.

Tyto tlakové fluktuace mohou způsobovat nestabilitu hoření, zvýšené riziko flashbacku nebo lean blow-out, což je proces, při němž dochází k útlumu přívodu paliva a může vést k

vyhasnutí plamene. U vodíku se tyto jevy mohou vyskytovat i za stabilních podmínek a pravděpodobnost jejich výskytu se zvyšuje v přechodových stavech, jako jsou změny výkonu nebo složení palivové směsi.

K omezení fluktuace tlaku lze instalovat absorbéry zvuku, které tlumí hluk způsobený rozkmitáním válců hořáků vlivem vysokých teplot. Je důležité, aby bylo hoření co nejstabilnější, což se dá dosáhnout vhodným tvarem trysek a celkovou konstrukcí hořáků, a také optimalizací velikosti částic palivové směsi s vzduchem.

Toho lze docílit změnou počtu a velikosti trysek hořáků. Také je vhodné používat systémy pro monitorování tlakových fluktuací a podle toho řídit spalovací proces. Pokud však rychlost plamene vodíku přejde do turbulentní oblasti, stane se rychlost tlakově závislou, na rozdíl od zemního plynu.

Při provádění tzv. TRL (technology readiness level) testů, které se obvykle provádějí při atmosférickém tlaku a mají za cíl predikovat termoakustické jevy vzniká problém. Dosahuje se to měřením FTF (flame transfer function), což je zkoumání odezvy plamene na náhodné oscilační jevy, projevující se změnou ve vývinu tepla.

Aby bylo možné lépe prozkoumat termoakustické jevy při spalování vodíku a předpovědět je, je třeba upravit TRL testy tak, aby zahrnovaly široký rozsah tlaků, nikoliv pouze atmosférický tlak.

Na trhu existuje mnoho výrobců turbín, které umožňují spoluspalování vodíku. Typ použitého hořáku určuje podíl spalovaného vodíku. Jednou z možností jsou hořáky typu DLE/DLN, kde dochází k tvorbě hořlavé směsi před vstupem do hořáků. Vysoká reaktivita vodíku však může způsobovat technické problémy. Alternativou jsou hořáky pracující na principu difúzního spalování, které umožňují spalování paliv s různým složením a výhřevnostmi. Současná technologie však má za nevýhodu vysokou produkci NO_x kvůli vysokým teplotám spalování, a pokusy o snížení teploty pomocí aditiv vedou ke snížení účinnosti cyklu.

V budoucnosti se očekává, že se bude rozvíjet a upřednostňovat technologie hořáků DLE/DLN, které jsou navrhovány především pro spalování vodíku, ale v současnosti jsou omezeny v možnosti spalování vyšších podílů vodíku, a proto je stále rozšířenější difúzní spalování. DLE/DLN hořáky jsou specificky vyvíjeny pro spalování vodíku, zatímco WLE a difúzní hořáky jsou určeny pro širší spektrum paliv. Tabulka 8 poskytuje celkové srovnání výše zmíněných výrobců.

[16] [23]

8 QUICK START

Princip Quick startu (rychlého startu) v paroplynovém cyklu teplárny je zaměřen na schopnost teplárny rychle zvyšovat svůj výkon a dodávat elektřinu a teplo v krátkém časovém období. Tento mechanismus je klíčový pro pokrytí náhlých špiček v poptávce po energii nebo v případě náhlého výpadku jiných zdrojů energie. Tento systém vyžaduje širokou škálu elektronických, senzorových a regulačních prvků, které jsou součástí automatizačního systému.

8.1 Designové úpravy pro Quick Start

Designové úpravy plynových turbín

Designové úpravy plynových turbín zahrnují několik klíčových prvků. Použití pokročilých slitin a materiálů, které jsou odolné vůči rychlým změnám teploty, zajišťuje, že komponenty turbíny vydrží časté a rychlé starty bez poškození.

Spalovací komory jsou optimalizovány pro rychlé zapálení paliva a stabilní spalování při různých provozních podmínkách, přičemž moderní technologie s nízkými emisemi NOx zajišťují čisté a efektivní spalování.

Pokročilé chladicí systémy umožňují rychlé odvodnění tepla z klíčových komponentů a aktivní chlazení lopatek turbíny a dalších kritických částí. Zlepšené ložiskové systémy, které minimalizují tření a opotřebení během rychlých startů a zastávek, jsou doplněny systémy pro monitorování stavu ložisek a vibrací, což přispívá k dlouhé životnosti a spolehlivosti turbíny.

Designové úpravy parních turbín:

Rychlý předehřev:

Systémy pro rychlý předehřev parních turbín, které minimalizují čas potřebný k dosažení provozních teplot a tlaků. Předehřívací systémy mohou zahrnovat elektrické topné prvky nebo předběžné proudění horké páry.

Dynamické řízení proudění páry:

Pokročilé regulační ventily a systémy pro řízení proudění páry umožňují přesné a rychlé nastavení průtoku a tlaku páry. Adaptivní řízení pro optimalizaci výkonu při různých provozních podmínkách.

Systém Quick Start je klíčovým prvkem moderních paroplynových tepláren, který umožňuje rychlé a efektivní spuštění a provoz. Tento systém vyžaduje integraci pokročilých senzorů, pohonů, řídicích jednotek a komunikačních sítí, které spolupracují na zajištění vysoké flexibility a spolehlivosti energetických systémů.

8.2 Quick start využití:

1. **Rychlé pokrytí špiček v poptávce po energii:** Během dne mohou nastat situace, kdy je náhlý nárůst poptávky po elektřině, například během ranní a večerní špičky. Quick start umožňuje teplárně okamžitě zvýšit produkci energie.

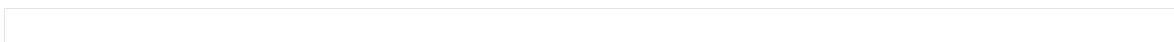
2. **Záložní zdroj při výpadku:** V případě výpadku jiných zdrojů energie, jako jsou jaderné nebo uhelné elektrárny, může paroplynová teplárna rychle nahradit chybějící kapacitu.
3. **Flexibilita v dodávkách energie:** Pomáhá udržovat stabilitu energetické sítě tím, že poskytuje flexibilní a rychle nasaditelnou kapacitu.

Turbíny jsou vybaveny pokročilými řídicími systémy, které umožňují rychlou a přesnou kontrolu nad všemi aspekty provozu. Automatizace zahrnuje adaptivní algoritmy, které se přizpůsobují aktuálním provozním podmínkám a optimalizují výkon turbíny. Systémy pro nepřetržité monitorování klíčových parametrů, jako jsou teplota, tlak, vibrace a emise.

Dostupné specifické úpravy

- **General Electric (GE) LM6000:**
Tato plynová turbína je navržena pro rychlé starty a dosahuje plného výkonu za méně než 10 minut. Používá pokročilé materiály a chlazení pro zajištění spolehlivosti při častých startech.
- **Siemens SGT-800:**
Tato turbína je vybavena systémem pro rychlý start a flexibilní provoz, s optimalizovaným spalováním a pokročilým řízením teploty.
- **Mitsubishi Hitachi Power Systems (MHPS) J-series:**
Turbíny této řady mají pokročilé chlazení lopatek a adaptivní řízení spalování, které umožňuje rychlý start a vysokou účinnost.

Tyto designové úpravy a technologie umožňují plynovým a parním turbínám rychle reagovat na požadavky Quick startu, poskytovat spolehlivý výkon a minimalizovat dobu potřebnou k dosažení plného provozního výkonu.



9 VYUŽITÍ INOVACÍ A PAROPLYNOVÉHO CYKLU

Teplárna Otrokovice je klíčovým energetickým zdrojem ve Zlínském kraji, která využívá kombinaci fosilních paliv a biomasy pro výrobu tepla a elektřiny. Vzhledem k budoucím environmentálním závazkům a snaze o snížení emisí skleníkových plynů je třeba hledat inovativní technologie, které by přispěly k vyšší efektivitě a ekologické udržitelnosti. Jednou z perspektivních možností je implementace paroplynového cyklu s možností spoluspalování vodíku.

9.1 Cykly

Paroplynový cyklus kombinuje Braytonův cyklus (plynová turbína) a Rankine-Clausiiův cyklus (parní turbína) pro dosažení vysoké účinnosti při výrobě elektrické energie. Tato technologie umožňuje efektivnější využití tepelné energie a snížení emisí skleníkových plynů.

Plynová turbína využívá stlačený vzduch, který je následně ohřátý spalováním zemního plynu nebo směsi zemního plynu a vodíku. Horké spaliny procházejí turbínou, kde se jejich energie mění na mechanickou práci. Výstupní spaliny o vysoké teplotě jsou pak využity v parním cyklu. Parní turbína využívá teplo z výstupních spalin plynové turbíny k výrobě páry, která následně pohání parní turbínu. Tento proces zvyšuje celkovou účinnost systému a umožňuje využít odpadní teplo z plynového cyklu.

9.2 Implementace Technologie SGT-400 a SST-400

Pro Teplárnu Otrokovice je doporučena kombinace plynové turbíny SGT-400 a parní turbíny SST-400 od společnosti Siemens, které nabízejí vysokou účinnost a spolehlivost.

Plynová Turbína SGT-400

- **Výkon:** 13,4 - 14,5 MW
- **Účinnost:** 35-40% při samotné výrobě elektrické energie
- **Otáčky:** 15 000 ot/min
- **Průtok vzduchu:** 39 kg/s
- **Výstupní teplota spalin:** 523 °C

Parní Turbína SST-400

- **Výkon:** 30 - 50 MW
- **Účinnost:** 42-47% při samotné výrobě elektrické energie
- **Otáčky:** 3 000 až 18 000 ot/min (v závislosti na konfiguraci)
- **Výstupní tlak páry:** 100 bar
- **Průtok páry:** 80 t/h

Porovnání se Současnou Kondenzanční Turbínou

Současná kondenzační turbína:

- **Maximální výkon:** 27,5 MW
- **Otáčky:** 6 000 ot/min
- **Výstupní pára:** 80 t/h
- **Účinnost:** ~36%

Porovnáním technických parametrů plynové turbíny SGT-400 a parní turbíny SST-400 s aktuální kondenzační turbínou v Teplárně Otrokovice je zřejmé, že navrhovaná kombinace nabízí vyšší výkon a účinnost. Plynová turbína SGT-400 poskytuje flexibilitu a rychlou reakci na změny zatížení, zatímco parní turbína SST-400 zajišťuje vyšší celkový výkon a efektivitu systému.

9.3 Spoluspalování vodíku

Spoluspalování vodíku se zemním plynem nabízí významné environmentální výhody, především díky nulovým emisím CO₂ z vodíku. Pro Teplárnu Otrokovice je navrženo postupné zvýšení podílu vodíku v palivové směsi až na 30%, což umožní snížit emise NO_x a CO₂.

Spoluspalování vodíku přináší řadu výhod, jako je snížení emisí skleníkových plynů a zvýšení účinnosti spalování. Mezi hlavní výzvy patří potřeba přizpůsobení existující infrastruktury a optimalizace provozních parametrů pro bezpečné a efektivní spalování vodíku.

9.4 Quick Start Technologie

Technologie Quick Start umožňuje teplárně rychle zvyšovat výkon a pokrýt náhlé špičky v poptávce po energii. To je klíčové pro zajištění stability energetické sítě a rychlou reakci na výpadky jiných zdrojů energie.

Implementace Quick Start technologie zahrnuje designové úpravy plynových a parních turbín, včetně použití pokročilých materiálů a chladicích systémů, které umožňují rychlé zahřátí a spuštění turbín.[20]

Quick Start technologie umožňuje Teplárně Otrokovice flexibilně reagovat na změny v poptávce po energii, zvyšuje spolehlivost dodávek a snižuje provozní náklady díky optimalizaci provozu turbín.[19]

Moderní plynové turbíny využívají pokročilé technologie, které umožňují rychlé spuštění:

- **Materiály s vysokou tepelnou odolností:** Použití superslitin, které jsou schopny odolávat vysokým teplotám a rychlým změnám teploty bez degradace.
- **Systémy rychlého ohřevu:** Tato technologie umožňuje rychlé dosažení provozní teploty díky rychlému zvýšení teploty paliva a vzduchu vstupujícího do turbíny.
- **Optimalizované chladicí systémy:** Vylepšené chladicí technologie zajišťují, že kritické komponenty turbíny se nepřehřívají během rychlého spuštění.[19]

Kotel pro výrobu páry (HRSG)

HRSG musí rychle reagovat na změny v teplotě spalin, které přicházejí z plynové turbíny:

- **Modulární konstrukce:** Kotle jsou navrženy s modulárními prvky, které umožňují rychlé a rovnoměrné zahřátí, což minimalizuje tepelné namáhání.
- **Pokročilé řízení teploty:** Senzory a regulační systémy umožňují přesnou kontrolu teploty a tlaku v kotli, což umožňuje rychlou produkci páry.
- **Efektivní tepelné výměníky:** Tyto výměníky maximalizují přenos tepla z horkých spalin do vody, což urychluje proces výroby páry.[19]

Parní turbína

I když parní turbíny obvykle vyžadují delší čas na dosažení provozní teploty, moderní konstrukce umožňují jejich rychlejší spuštění:

- **Materiály s vysokou tepelnou kapacitou:** Použití materiálů, které mohou rychle absorbovat a distribuovat teplo, což snižuje riziko tepelného namáhání.
- **Předohřev:** Před spuštěním parní turbíny se využívá předohřev, který zajistí, že turbína je již na pracovní teplotě, když začne produkce páry z HRSG.
- **Regulační systémy:** Pokročilé regulační systémy umožňují přesné řízení toku páry, což zajišťuje stabilní a efektivní provoz i během rychlého spuštění. [19]

Realizace a Dopady

Navrhovaný paroplynový systém by byl umístěn mimo stávající paralelní zapojení obou turbín, což umožňuje jeho integraci bez významného narušení současného provozu tepelárny. Pro připojení nového paroplynového cyklu bude nutné vybudovat novou regulační (redukční) stanici, která bude reflektovat potřeby plnění plynové turbíny. Tato stanice zajistí správné podmínky pro provoz plynové turbíny a optimalizaci spalování směsi zemního plynu a vodíku.

Vlastní Výroba Vodíku

Teplárna Otrokovice by mohla rovněž využít možnost výroby vodíku pomocí elektrolýzy, přičemž by využívala stávající kondenzační turbínu. Vyrobený vodík by byl skladován ve vlastním tanku a využíván podle potřeby, což by umožnilo ještě větší flexibilitu a nezávislost na externích dodávkách vodíku.

Účinnost Celého Cyklu

Odhadovaná účinnost navrhovaného paroplynového cyklu kombinujícího SGT-400 a SST-400 turbíny dosahuje přibližně 55-60%. Tato vyšší účinnost je výsledkem efektivního využití odpadního tepla z plynové turbíny v parním cyklu, což představuje výrazné zlepšení oproti současné kondenzační turbíně s účinností ~36%.

ZÁVĚR

Implementace paroplynového cyklu s technologií Quick Start a možností spalování vodíku v Teplárně Otrokovice představuje významný krok směrem k modernizaci energetické infrastruktury. Tato kombinace technologií nabízí vysokou účinnost, snížení emisí skleníkových plynů a zvýšení flexibility a spolehlivosti energetických dodávek.

Současný politický tlak na snižování emisí skleníkových plynů a znečišťujících látek vytváří potřebu pro energetické společnosti přijímat čistší a efektivnější technologie. Evropská unie a další globální organizace stanovují ambiciózní cíle pro snižování emisí CO₂, což zvyšuje tlak na energetické společnosti, aby modernizovaly své technologie a snížily svůj uhlíkový otisk.

Spalování vodíku s plynem nabízí výrazné snížení emisí CO₂, protože vodík při spalování neprodukuje žádné emise CO₂. To znamená, že Teplárna Otrokovice může výrazně snížit svůj uhlíkový otisk a přispět k plnění národních a mezinárodních cílů v oblasti snižování emisí.

Kromě využití vodíku pro vlastní potřebu může Teplárna Otrokovice začít vyrábět a nabízet tzv. modrý vodík. Modrý vodík je vyráběn z fosilních paliv, ale emise CO₂ jsou zachycovány a skladovány nebo využívány v jiných procesech, což jej činí ekologičtějším než tradiční šedý vodík.

Výroba modrého vodíku by mohla být realizována pomocí stávající kondenzační turbíny a elektrolýzy. Tento vodík by mohl být skladován ve vlastním tanku a následně prodáván jako čistý zdroj energie pro průmyslové aplikace, dopravu nebo jiné energetické potřeby. Nabídka modrého vodíku by mohla otevřít nové trhy a příležitosti pro Teplárnu Otrokovice, zvyšovat její ekonomickou stabilitu a přispívat k širší energetické transformaci směrem k udržitelnějším zdrojům energie.

Integrace paroplynového cyklu, spalování vodíku a technologie Quick Start do Teplárny Otrokovice nabízí komplexní řešení pro modernizaci energetické infrastruktury. Tyto inovativní technologie zajistí vyšší účinnost, snížení emisí, zvýšení flexibility a spolehlivosti dodávek energie a otevření nových trhů pro výrobu a prodej modrého vodíku. Teplárna Otrokovice se tak stane vzorem pro udržitelný rozvoj a moderní energetické systémy, připravené čelit výzvám budoucnosti.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Skupina ČEZ. (2021). Tři dekády energetiky v České republice: ČEZ zvyšuje výkon, bezpečnost a spolehlivost elektráren. Skupina ČEZ. Dostupné z <https://www.cez.cz>.
- [2] AIP Advances. (2023). "How solar panels work in theory and in practice." *AIP Advances*, 13(8), Article 085222. Dostupné z <https://pubs.aip.org/aip/adv/article/13/8/085222/2907403/How-solar-panels-work-in-theory-and-in-practice>.
- [3] Budín, Jan. "Jak funguje soustava centrálního zásobování teplem v ČR?" *oEnergetice.cz*, 26. února 2015, <https://oenergetice.cz/teplarenstvi/jak-funguje-soustava-centralniho-zasobovani-teplem-v-cr>. Přístup 24. dubna 2024.
- [4] Energetiko.cz. (n.d.). Jak funguje tepelná elektrárna? Výhody a nevýhody. Energetiko.cz. Dostupné z <https://energetiko.cz/typy-elektraren/>.
- [5] oEnergetice.cz. (n.d.). Vodní elektrárny - princip, rozdělení, elektrárny v ČR. oEnergetice.cz. Dostupné z <https://oenergetice.cz/vodni-elektrarny-princip-rozdeleni-elektrarny-v-cr>.
- [6] Phase Transformations and Complex Properties Research Group. (2003). *Coatings for Turbine Blades*. University of Cambridge. Dostupné z <https://www.phase-trans.msm.cam.ac.uk/2003/Superalloys/coatings/turbine.html>.
- [7] Schmid, F. (2016). *Přepočet turbíny na změněné parametry s retrofitem NT dílu turbíny* (Diplomová práce). České vysoké učení technické v Praze. Dostupné z https://example.com/DP_Filip_Schmidt_2016.pdf.
- [8] Volks, G., and Son Le Mong. "Header-type, high-pressure feedwater heaters." *Brown Boveri Tech.*, vol. 74, no. 4, 1987, pp. 199-205.
- [9] Svět energie. (n.d.). Teorie - Parní turbíny. Dostupné z <https://www.svetenergie.cz/cz/svet-energie/teorie/1258-Parni-turbiny>
- [10] Analysis of Synchronous Machine Excitation Systems: Comparative Study." CORE. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/144730459.pdf>.
- [11] Siemens Energy. (2024). *SGT5-8000H Heavy-duty gas turbine (50 Hz)*. Dostupné z <https://www.siemens-energy.com/global/en/offers/power-generation/gas-turbines/sgt5-8000h.html>

- [12] Siemens Press Release. (2019). Siemens secures order for HL-class gas turbine in the U.S. Dostupné z <https://press.siemens.com/global/en/pressrelease/siemens-secures-order-hl-class-gas-turbine-us>
- [13] Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. (2024). *J-Series Gas Turbines*. Dostupné z https://www.mhi.com/products/gas_turbines/j_series
- [14] General Electric. (2024). *HA-Class Gas Turbines*. Dostupné z <https://www.ge.com/power/gas/gas-turbines/ha>
- [15] Rolls-Royce Holdings plc. (2024). *Trent XD Gas Turbine*. Dostupné z <https://www.rolls-royce.com/products-and-services/civil-aerospace/engines/trent-xd.aspx> Seznam použitých symbolů a zkratk
- [16] Savree. (2024). *Heat Recovery Steam Generator (HRSG)*. Dostupné z <https://www.savree.com/en/encyclopedia/heat-recovery-steam-generator-hrsg>
- [17] Ganapathy, V. (2003). *Industrial Boilers and Heat Recovery Steam Generators: Design, Applications, and Calculations*. Marcel Dekker, Inc.
- [18] Transformační technologie. (2024). *Transformační technologie*. Dostupné z <https://www.transformacni-technologie.cz/index.html>
- [19] ASME Digital Collection. (2024). *Quick Start of an Industrial Gas Turbine Engine Through the Optimization of Variable Guide Vane Schedule*. Dostupné z <https://computationalnonlinear.asmedigitalcollection.asme.org>
- [20] GE Vernova. (2024). *Fast Start for GT Base Fleet Turbines | GE Vernova*. Dostupné z <https://www.gevernova.com>
- [21] R. Kehlhofer, N. Hannemann, F. Stirnimann, and B. Rukes, *Combined-Cycle Gas & Steam Turbine Power Plants*, 3rd ed. PennWell Books, 2009.
- [22] Využití vodíkových technologií v energetice," All For Power, [online]. Dostupné: <https://allforpower.cz/technologie-a-materialy/vyuziti-vodikovych-technologie-v-energetice-228>. [Accessed: May 27, 2024].

- [23] J.A.Schouten, J.P.J.Michels, R.Janssen-van Rosmalen; Effect of H₂ injection on the thermodynamic and transportation properties of natural gas. International Journal of Hydrogen Energy, 2004. [online] Dostupné z: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0360319903003112?token=0C8D858C6BACF02D67D5A73F0000FF20B441A5027092F13989B511887868E2B33A4B2F00C71C21B94177D8D21928D980&originRegion=eu-west-1&originCratation=20220424082249>
- [24] Využití vodíkových technologií v energetice," All For Power, [online]. Dostupné: <https://allforpower.cz/technologie-a-materialy/vyuziti-vodikovych-technologii-v-energetice-228>. [Accessed: April 27, 2024].

HRSG Heat Recovery steam generator

GT Gas Turbine.

ST Steam Turbine.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1. Rankin-Clausiiův cyklus v T-s, i-s diagramu vody a vodní páry	18
Obrázek 2. Parní turbína	20
Obrázek 3 P-v, T-s diagramy	21
Obrázek 4. Schéma výroby elektrické energie s kondenzační turbínou	22
Obrázek 5. Schéma výroby elektrické energie s protitlakou turbínou.....	22
Obrázek 6. Schéma výroby elektrické energie s protitlakou turbínou.....	23
Obrázek 7. Schéma zařízení teplárny s parní turbínou s regulovaným odběrem páry pro technologické účely.....	24
Obrázek 8. Keramické dlaždice ve spalovací části rotoru spalovací turbíny	35
Obrázek 9. Schéma výroby tepla a elektrické energie v TOT	37
Obrázek 10. Aeroderivativní turbína	46
Obrázek 11. T-s a P-v diagram Braytonova cyklu.....	48
Obrázek 12. Schéma otevřeného Braytonova cyklu	48
Obrázek 13. Základní technologické schéma Paroplynového cyklu a T-s diagram ...	49
Obrázek 14. Spalinový kotel.....	55
Obrázek 15. Spalovací turbína typická pro Siemens, MHI, GE	57
Obrázek 16. Alkalická výroba vodíku.	57
Obrázek 17. PEM výroba vodíku	60
Obrázek 18. SOEC výroba vodíku	61
Obrázek 19. Graf závislosti snižování množství CO ₂ a objemovém množství směsi zemního plynu a vodíku.....	61

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Základní vlastností vodíku a zemního plynu	65
--	----

SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA P I: NÁZEV PŘÍLOHY