

ENERGETICKÉ CYKLY SE SUPERKRITICKÝM OXIDEM UHLIČITÝM

Eliška Purkarová^a, Jakub-Vojtěch Ballek^a, Alice Vagenknechtová^a, Jan Berka^{a,b}, Tomáš Hlinčík^a

^aÚstav plyných a pevných paliv a ochrany ovzduší, Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Technická 5, 166 28 Praha, tomas.hlincik@vscht.cz

^bCentrum výzkumu Řež, s.r.o., Husinec – Řež, Hlavní 130, 250 68 Řež

Článek je zaměřen na shrnutí problematiky energetických okruhů, pracujících se superkritickým oxidem uhličitým $s\text{CO}_2$. Oxid uhličitý se v současné době dostává do popředí zájmu mnoha výzkumných institucí s ohledem na jeho možné využití v jeho nadkritických podmínkách, díky čemuž lze dosáhnout vyšší účinnosti a kompaktnosti zařízení v porovnání s běžnými parovodními cykly. V článku jsou popsány základní vlastnosti tohoto média, včetně popisu $s\text{CO}_2$ cyklů (Braytonův, Rankinův apod.). Dále jsou diskutovány možná využití energetických cyklů s $s\text{CO}_2$ zejména v solárních a jaderných elektrárnách a v elektrárnách spalující fosilní paliva. V případě solárních elektráren, může $s\text{CO}_2$ Braytonův cyklus nabídnout vyšší účinnost cyklu, než při použití superkritických parních cyklů. Využití $s\text{CO}_2$ v jaderných nebo uhelných elektrárnách zase zvyšuje účinnost a snižuje spotřebu vody. V současné době se navíc uvažuje o využití $s\text{CO}_2$ okruhu v nových jaderných reaktorech IV generace, u kterých se provozní teploty pohybují v rozmezí 500-900 °C, tedy jsou obecně vyšší než provozované vodou chlazené reaktory. I přesto, že využití chladiva na bázi CO_2 v energetických systémech je známé již delší dobu (např. využití v první československé elektrárně v Jaslovských Bohunicích) stále nejsou komerčně využívány v energetickém průmyslu. Jedním z důvodů je stále pokračující výzkum v oblasti chování materiálů za vysokých teplot v $s\text{CO}_2$, ochrana proti korozi, popř. vliv čistoty oxidu uhličitého na chování v nadkritické oblasti.

Klíčová slova: energetické cykly, oxid uhličitý, $s\text{CO}_2$, Braytonův cyklus, jaderná elektrárna

Došlo 27. 10. 2023, přijato 14. 12. 2023

1. Úvod

Vzhledem k rostoucí spotřebě elektrické energie a tendenci snižování emisí oxidu uhličitého vzniká poptávka po nových a účinnějších formách transformace různých zdrojů energie na energii elektrickou. Nejrozšířenějším pracovním médiem současných elektráren je voda ve formě kapaliny nebo vodní páry. Mimo tyto tradiční systémy jsou předmětem výzkumu i jednotky využívající jiná média, jako jsou např. oxid uhličitý, silikonový olej, amoniak, apod. V současnosti se oxid uhličitý využívá např. v jaderných elektrárnách provozovaných ve Velké Británii jako chladivo primárního okruhu. Dalším příkladem může být i první československá jaderná elektrárna A1 v Jaslovských Bohunicích (dnes na území Slovenska), kde byl oxid uhličitý použit také jako chladivo primárního okruhu [1]. V případě zmíněných jaderných reaktorů se ale nejednalo o oxid uhličitý v nadkritickém stavu (tlak v okruhu se pohyboval v podkritických hodnotách).

Současný výzkum zaměřený na pokročilé technologie v energetice se soustředí, mimo jiné, na systémy pracující s oxidem uhličitým v nadkritických podmínkách ($s\text{CO}_2$). Energetický cyklus pracující s $s\text{CO}_2$ lze použít v různých odvětvích energetiky a může potenciálně přinášet výhody v porovnání s konvenčními cykly.

2. Superkritický oxid uhličitý

Superkritickým se oxid uhličitý stává při překročení hodnot kritického bodu, které byly stanoveny prací E. G. Fehera na 30,98 °C (304,13 K) a 7,32 MPa [2]. V oblasti

nad kritickým bodem je CO_2 v jediném kondenzovaném stavu s vlastnostmi mezi plynem a kapalinou.

Superkritický oxid uhličitý má široké využití. Při nízké teplotě se používá jako rozpouštědlo pro extrakce. Od průkopnického projektu extrakce kofeinu z kávy a čaje bylo rozvinuto mnoho dalších aplikací v průmyslovém měřítku, jako například extrakce esenciálních olejů. Další využití nízkoteplotního $s\text{CO}_2$ je v technologiích pro zachyt a ukládání oxidu uhličitého (CCS, Carbon Capture and Storage), které mají za cíl snížit množství oxidu uhličitého uvolňovaného do atmosféry z fosilních paliv. Při vyšší teplotě 400–650 °C je zkoumán $s\text{CO}_2$ pro využití ve výrobě energie. Zde vykazuje mnoho výhod oproti jiným pracovním médiím používaným pro generování energie v turbínách. Cyklus s $s\text{CO}_2$ médiem pracuje v tzv. Braytonově cyklu a v budoucnu by mohl nahradit současné parní cykly v elektrárnách jaderných, solárních a elektrárnách spalujících fosilní paliva, přičemž nabízí termodynamickou účinnost vyšší než 50 % [3].

Použití superkritického oxidu uhličitého přináší řadu výhod a nevýhod pro energetické cykly. Mezi výhody patří následující:

- potenciálně vyšší účinnost cyklu,
- kompaktnost zařízení,
- omezená reaktivita čistého média.

Využití $s\text{CO}_2$ dovoluje použití mnohem menších turbín v porovnání s parovodním cyklem. Dále má $s\text{CO}_2$ dostatečnou hustotu pro přenesení energie na turbínu a současně nízkou viskozitu.

Pro použití v energetických cyklech bylo zvažováno využití i dalších látek v superkritickém stavu, avšak využití oxidu uhličitého bylo upřednostněno vzhledem k tomu, že je dostupný, netoxický, a jeho kritický bod je blízko teploty prostředí. Právě kritický bod při nízké teplotě umožňuje využití Braytonova cyklu s sCO_2 s využitím zdrojů tepla o různé teplotě [4].

Další výhodou využití sCO_2 jako pracovního média se projevuje v jednotkách využívajících zdroje zbytkového tepla. Při ohřívání sCO_2 ve výměníku nedochází ke změně skupenství. V případě energetických zařízení využívajících jako pracovní médium vodu (např. okruhy tepelných elektráren), dochází k varu média. Při změně skupenství média je třeba dodat výparnou entalpii, čímž se spotřebovává část uvolněné energie. To znamená, že jsou sCO_2 okruhy schopny dosahovat vyšší výstupní teploty média a tím pádem i vyšší účinnosti výměníku. Dále stabilita sCO_2 dovoluje jeho použití ve výměnících s vysokoteplotním zdrojem tepla, tím pádem je umožněna vyšší pracovní teplota sCO_2 , což zvyšuje celkovou účinnost cyklu [5].

Nicméně oxid uhličitý v superkritickém stavu vykazuje vysokou rozpustnost a difuzivitu, což z něj dělá výborné rozpouštědlo a těchto vlastností je s úspěchem využíváno mimo energetický segment při extrakcích a dalších aplikacích. Pro energetické aplikace tyto vlastnosti přináší potíže, neboť zvyšují riziko kontaminace média ostatními kapalinami a materiály, které se využívají v okruhu. Může docházet ke kontaminaci např. mazacími oleji nebo vodní parou. Další problém představuje vysoká difuzivita sCO_2 , která se projevuje pronikáním média do konstrukčních materiálů, což může urychlovat korozi. Dále může vysoká difuzivita způsobovat rychlé snížení tlaku, způsobené adsorpcí média do konstrukčních materiálů. Při snížení tlaku dochází k desorpci oxidu uhličitého z materiálu, a to může vést k jeho poškození [7].

Další nevýhodou sCO_2 oběhů je jev zvaný pinch point. K tomuto jevu dochází v rekuperátoru v místě, kde je rozdíl chlazeného a chladicího média nejmenší. Vzhledem k významné závislosti tepelné kapacity sCO_2 na teplotě a tlaku, může dojít v určitém místě ke stavu, kdy má chlazené i chladící médium stejnou tepelnou kapacitu, právě zde dochází k pinch pointu. Je možné, že rozdíl teplot ve výměníku se v pinch pointu bude blížit nule, nebo může být dokonce i záporný, v tom případě výměník ztrácí svou funkčnost. Tento problém lze řešit různým uspořádáním oběhu, nebo přidáním příměsí do chladicího média [6, 7].

Okruhy s sCO_2 pracují, v porovnání s heliovými oběhy, při výrazně vyšších tlacích, a to při přibližně 20 MPa ve srovnání s 8 MPa. Vyšší provozní tlak navyšuje náklady a podporuje korozivní působení. Avšak zkušenosti s plynem chlazenými reaktory ukázaly míru použitelnosti různých materiálů v prostředí oxidu uhličitého. Ať už jde o materiály, které se ukázaly jako nevhodné při provozu reaktorů Magnox, tak na druhou stranu materiály použité v AGR (Advanced Gas Cooled Reactor), které jsou schopny odolávat oxidu uhličitému i při teplotách okolo 650 °C [6].

3. sCO_2 energetické cykly

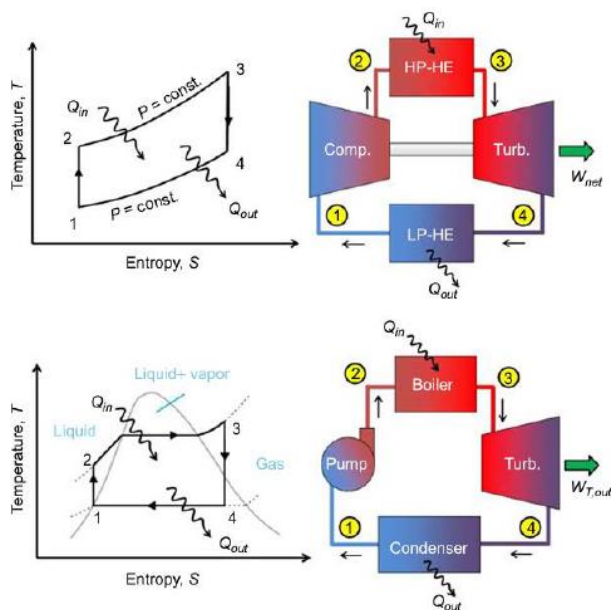
Energetické cykly pracující s sCO_2 přeměňují tepelnou energii na energii kinetickou a následně energii elektrickou. Pracují na podobném principu jako dnes běžné parovodní cykly, avšak jako pracovní médium využívají oxid uhličitý při nadkritických podmínkách.

Energetické cykly pracující s sCO_2 lze rozdělit na dvě kategorie podle způsobu dodání energie cyklu. Jde buďto o cykly s vnějším zdrojem tepla, kdy je teplo dodáváno cyklu přes výměník. Druhá varianta jsou cykly s přímým spalováním, kde k oxidaci paliva dochází přímo v rámci cyklu a spaliny se mísí s médiem.

Pro aplikaci sCO_2 cyklu se uvažuje hned několik zdrojů tepla, a to především jaderných, spalujících fosilní paliva, odpadní teplo a obnovitelné zdroje tepla např. solární energie. V poslední době je věnována pozornost hlavně využití v příští generaci jaderných reaktorů. sCO_2 Braytonův cyklus může pokrývat široké rozmezí teplot a lze tak uvažovat o jeho využití, mimo jiné, pro různé jaderné reaktory.

3.1. Braytonův a Rankinův cyklus

Energetické okruhy využívající sCO_2 jako médium pracují v tzv. Braytonově cyklu. V současné době je nejvíce rozšířeno využití parovodního Rankinova cyklu, porovnání těchto dvou cyklů je znázorněno na obrázku 1, který uvádí TS diagramy (tj. závislost teploty na entropii v průběhu cyklu) a zjednodušená schémata. Z diagramů je patrná změna skupenství pracovního média, ke které dochází v průběhu Rankinova cyklu, což je příčinou nižší výstupní teploty média, než jaké by mohlo být dosaženo využitím Braytonova cyklu, který pracuje v průběhu celého cyklu s médiem v nadkritickém stavu.



Obr. 1 Porovnání Braytonova (nahore) a Rankinova cyklu (dole) [4]

Fig. 1 Comparison of Brayton (top) and Rankine cycle (bottom) [4]

Rankinův parovodní cyklus prošel dlouhým vývojem a dnes hraje klíčovou roli v produkci většiny elektrické energie na světě. Současným nejdokonalejším vývojovým stupněm je ultra-superkritický cyklus, který pracuje s parou o tlaku 25–29 MPa a teplotě 600 °C s přehřátím až na 620 °C.

Objektivní srovnání Rankinova a sCO₂ Braytonova cyklu je složité. V současnosti neexistuje žádná komerční energetická jednotka využívající sCO₂ cyklus se srovnatelnými parametry s Rankinovým cyklem využívaným v dnešních elektrárnách. Proto veškerá porovnání vychází z předpokladů založených na předpokládaných provozních podmínkách sCO₂ zařízení.

Pro oba zmíněné cykly platí, že zvýšení účinnosti lze dosáhnout zvýšením teploty média vstupujícího na turbínu. Z dosud provedených studií je zjevné, že sCO₂ Braytonův cyklus dosahuje teoreticky vyšší účinnosti než Rankinův cyklus při středních a vysokých vstupních teplotách na turbínu. Braytonův cyklus vykazuje vyšší účinnost než Rankinův cyklus při vstupní teplotě na turbínu vyšší než cca 425 °C [4, 8].

4. Využití sCO₂ energetických cyklů

Energetické okruhy využívající sCO₂ nabízí uplatnění v širokém spektru energetických zařízení. Významnou, dosud obecně méně využívanou, oblastí možného použití je využití energie odpadního tepla (jako v případě organického Rankinova cyklu), kde je sCO₂ cyklus schopný pokrýt dostatečné rozmezí teplot pro různé tepelné zdroje. Další oblastí možného použití je využití v koncentračních solárních elektrárnách. Konkurenceschopnost potenciálních aplikací závisí na výsledné celkové účinnosti takového zařízení využívajícího sCO₂ okruh. Pro jaderné aplikace nabízí sCO₂ okruhy využití v generaci IV moderních jaderných reaktorů, kde by mělo být možné s využitím sCO₂ cyklu dosáhnout účinnosti nad 50 % a současně zvýšit kompaktnost zařízení a bezpečnost. Vzhledem ke skutečnosti, že využití tohoto cyklu zbavuje zařízení závislosti na zdroji vody, se uvažuje o využití i pro geotermální zdroje energie v oblastech s nedostatkem vody. Přehled jednotlivých aplikací, jejich výhod a provozních parametrů je uvedeno v tabulce 1 [4]. O využití sCO₂ se uvažuje i ve fúzních reaktorech, kde hlavní výhodou oproti parnímu Rankinovu cyklu je možnost dosažení vyšší účinnosti, při zapojení více zdrojů tepla [9,10].

Tab. 1 Potenciální oblasti využití sCO₂ cyklu [4]

Tab. 1 Potential areas of use of the sCO₂ cycle [4]

Aplikace	Typ cyklu	Výhody	Velikost (MWe)	Teplota (°C)	Tlak (MPa)
Jaderné	nepřímý ohřev	účinnost, kompaktnost, snížení spotřeby vody	10–300	350–700	20–35
Fosilní paliva	nepřímý ohřev	účinnost, snížení spotřeby vody	300–600	550–900	15–35
Fosilní paliva (syntetický a zemní plyn)	přímé spalování	účinnost, snížení spotřeby vody, zachycování CO ₂	300–600	1100–1500	35
Koncentrační solární elektrárny	nepřímý ohřev	účinnost, kompaktnost, snížení spotřeby vody	10–100	500–1000	35
Námořní pohon	nepřímý ohřev	účinnost, kompaktnost	< 10	200–300	15–25
Využití odpadního tepla	nepřímý ohřev	účinnost, kompaktnost, jednodušnost	1–10	< 230–650	15–35
Geotermální	nepřímý ohřev	účinnost	1–50	100–300	15

4.1. Využití odpadního tepla

V současné době se používají pro využití odpadního tepla především organický Rankinův cyklus a organický Kalinův cyklus, avšak tyto cykly nemohou využívat zdroje tepla o nízké teplotě, které často počtem převládají nad vysokoteplotními. Výhodou sCO₂ cyklů je, že mohou pracovat při relativně nižší teplotě a tím pádem dovolují využívat teplo z nízkoteplotních zdrojů. Dalším benefitem sCO₂ okruhu je jeho schopnost pracovat v celém cyklu v jedné fázi. Tím pádem je schopen dosahovat vyšších výstupních teplot ze stejného zdroje v porovnání

s parním okruhem, ve kterém se část energie spotřebuje na teplo skupenské přeměny. Mezi oblastmi možné aplikace sCO₂ cyklů využívajících zbytkové teplo patří zejména sklářský a ocelářský průmysl, výroba cementu, využití výstupu z plynových turbín a další [4].

4.2. Koncentrační solární elektrárny

Hlavní dva druhy zdrojů solární energie jsou fotovoltaické elektrárny (PV) a koncentrační solární elektrárny (CSP). Současné CSP používají různé látky pro

přenos tepla z místa zdroje do výměníku, kde energii předávají médiu v okruhu s turbínou. Jako hlavní médiem se dnes používá syntetický olej, taveniny solí nebo vodní pára. Druh použitého média limituje maximální provozní teplotu celého systému. Syntetický olej může dosahovat maximální teploty okolo 390 °C a taveniny solí maximálně přibližně 600 °C.

Pro teploty, se kterými pracují koncentrační solární elektrárny, může sCO₂ Braytonův cyklus nabídnout vyšší účinnost cyklu v porovnání s přehřátými nebo superkritickými parními cykly.

Pro CSP aplikace se počítá s využitím cyklů s výkonem 10–150 MW elektrických pro pokrytí různě velkých zdrojů. Aplikace sCO₂ cyklů nabízí řadu výhod, jako vyšší účinnost cyklu, kompaktnost systému a možné nižší náklady vzhledem k provozní technické jednoduchosti. Otázkou je ovšem schopnost konkurovat současným technologickým řešením z hlediska ekonomického a technického. Další znatelný benefit sCO₂ okruhů pro aplikaci v CSP je možnost využití suchého chlazení, které by k chlazení média používalo vzduch poháněný ventilátory. Tato možnost je výhodná právě pro CSP, které se často nacházejí v horkých oblastech s nedostatkem vody.

Výhled CSP do budoucna závisí na jejich schopnosti konkurovat fotovoltaickým elektrárnám. Pro zlepšení účinnosti další generace CSP elektráren přichází v úvahu využití sCO₂ cyklu, který by mohl v této oblasti operovat při teplotách 600–700 °C nebo i vyšších [4].

4.3. Elektrárny spalující fosilní paliva

Uplatnění sCO₂ Braytonova cyklu se nabízí i pro elektrárny spalující fosilní paliva. Možné uspořádání zařízení se dělí na jednotky s přímým spalováním a vnějším zdrojem tepla. V případě přímého spalování je palivo, nejčastěji zemní nebo syntézní plyn, spalováno s oxidovadlem přímo v okruhu a spaliny se mísí s médiem a jsou vedeny na turbínu.

V uspořádání s vnějším zdrojem tepla dochází k zisku tepelné energie odděleně a ta je přenášena přes tepelný výměník do sCO₂ okruhu, ve kterém je umístěna turbína [11, 12].

Otázka složení média pohánějícího turbínu je velmi významná pro uspořádání s přímým spalováním, kde dochází k výrazným změnám ve složení média v průběhu cyklu. Zásadní vliv na složení média má použitý druh paliva.

Čistota média lišící se v jednotkách procent má významný vliv na termodynamické vlastnosti směsi. Například pro kompresor provozovaný při podmínkách blízko kritického bodu oxidu uhličitého, dochází při poklesu čistoty oxidu uhličitého ze 100 % na 95,6 % ke zvýšení práce kompresoru o přibližně 6 %, při dalším poklesu čistoty až na 90,9 % dochází k nárůstu práce kompresoru o cca 34 % vůči stavu se 100% oxidem uhličitým. Nárůst práce kompresoru je způsoben poklesem hustoty média, který je zapříčiněn přítomností plynných nečistot. Významnou příměs tvoří voda, která musí být odstraněna.

Pokud dochází ke kondenzaci, může být tekutá voda odstraněna v separátoru [13].

Přínosem sCO₂ okruhů s přímým spalováním je technická možnost zachycovat oxid uhličitý vznikající spalováním. Přebytečná část média je odváděna do zásobníku, odkud může být transportním potrubím dopravována do trvalých úložišť. Spojené státy americké mají stanovené parametry čistoty oxidu uhličitého pro transport potrubím, za účelem materiálové ochrany transportní soustavy. Limitní hodnoty uvádí tabulka 2. Za účelem dosažení požadované čistoty se využívá kolon kryo- genní destilace [7].

Tab. 2 Specifikace čistoty oxidu uhličitého pro transport [4]

Tab. 2 Specification of carbon dioxide purity for transport [4]

Látka	Limit (ml/m ³)	Látka	Limit (obj. %)
H ₂ O	500	N ₂	4
CO	35	O ₂	0,001
SO ₂	100	Ar	4
NO _x	100	CH ₄	4
		H ₂	4
		H ₂ S	0,01

4.4. Jaderné elektrárny

Jaderný reaktor lze obecně popsat jako zařízení, kde probíhá trvalá štěpná reakce. Dochází ke štěpení těžkých jader atomů na jádra lehčí, vznikají další částice, většinou neutrony a zbylá energie se uvolňuje ve formě tepla. Pro výrobu elektrické energie ze štěpení slouží jaderné elektrárny. Obecný princip jaderné elektrárny je následující: Ke štěpné reakci dochází v jádře reaktoru, odkud chladivo cirkulující primárním okruhem odvádí vznikající teplo. Médium chladící jádro reaktoru může přímo pohánět turbínu, jako je tomu např. u BWR (varných reaktorů). Častěji ovšem chladivo předává svou energii médiu v sekundárním okruhu, ke styku těchto dvou okruhů dochází v tepelném výměníku (v případě parovodních cyklů jde o parogenerátor). Dále je sekundárním okruhem poháněna turbína, která je spojena společnou hřídelí s generátorem. Médium po průchodu turbínou předává zbylé teplo přes výměník do chladicího okruhu, který odvádí teplo buď do chladicích věží, vodního toku, nádrže nebo oceánu.

V mezinárodní spolupráci byly po roce 2000 vyvíjeny různé typy nových jaderných reaktorů radících se do generace IV (Gen IV). Mezi tyto reaktory patří:

- sodíkem chlazený rychlý reaktor,
- oloven chlazený rychlý reaktor,
- plynem chlazený rychlý reaktor,
- superkritickou vodou chlazený reaktor,
- vysokoteplotní plynem chlazený reaktor,
- tekutými solemi chlazený reaktor.

Jedním z hlavních rozdílů mezi uvedenými typy reaktorů je použité chladivo. Provozní teploty reaktorů Gen IV se pohybují většinou mezi 500–900 °C a jsou obecně vyšší v porovnání s provozovanými vodou chlazenými reaktory, které operují přibližně při teplotě 300 °C. Hlavním důvodem vyšší teploty u reaktorů Gen IV je snaha zvýšit účinnost jaderné elektrárny, která je v současnosti nižší než účinnosti elektráren spalujících fosilní paliva. Zvyšování výstupní teploty z reaktoru vede k vyšší vstupní teplotě média na turbínu, což zlepšuje celkovou termodynamickou účinnost.

Dalším cílem, který by měly splnit reaktory Gen IV je snížení vlivu na životní prostředí, kam spadá i otázka požadavků na úpravu chladiva. V případě dnešních, vodou chlazených reaktorů, jsou nároky na úpravu vody značně vyšší než v případě jiných typů vodou chlazených elektráren, což negativně dopadá na ekonomické i environmentální výsledky. I v tomto ohledu by zlepšení mohlo přinést využití jiného chladiva.

Při vstupní teplotě na turbínu vyšší než 550 °C je v případě vody potřebné využít ultra superkritický (USC) parní cyklus pro zvyšování účinnosti Rankinova cyklu. Avšak při využití USC cyklu dochází nevyhnutelně k degradaci materiálů způsobené vysokou provozní teplotou a tlakem v kombinaci s prostředím vody v nadkritickém stavu. Z tohoto hlediska spojení USC parního Rankinova cyklu s jaderným reaktorem může nastolit otázky týkající se spolehlivosti a bezpečnosti celého systému. Do budoucna je na místě počítat s novým systémem generujícím energii, schopným spolehlivě pracovat při vysokých teplotách. V úvahu připadá několik typů systémů včetně sCO₂ cyklu, který je považován za slibný koncept, neboť by mohl poskytnout vyšší účinnost při teplotách reaktorů Gen IV, vyšší stabilitu při využití běžných materiálů a zlepšit bezpečnost a spolehlivost celého systému [15-17].

Braytonův sCO₂ cyklus přichází v úvahu pro aplikaci v jaderné energetice v reaktorech Gen IV, které pracují při výrazně vyšších teplotách než současné vodou chlazené reaktory. Pro využití sCO₂ cyklu v současných lehkovodních reaktorech jsou překážkou právě nízké teploty, které brání využití předností Braytonova cyklu, který dosahuje zvýšení účinnosti až při vyšších teplotách. Výzkumem aplikace sCO₂ cyklů pro jadernou energetiku se zabývají země jako Japonsko, Francie, Jižní Korea nebo Česká republika.

Využití sCO₂ cyklu se jeví vhodné ve spojení se sodíkem chlazeným rychlým reaktorem (SFR). Spojení SFR s parovodním Rankinovým cyklem představuje riziko prudkých reakcí vody a sodíku. V případě využití sCO₂ okruhu by bylo toto riziko částečně eliminováno, avšak i v případě oxidu uhličitého dochází k chemické reaktivitě se sodíkem, která není zatím dostatečně prozkoumána. V případě tohoto spojení by sCO₂ mohl být provozován při vstupních podmínkách na turbínu 516 °C a tlaku 20 MPa. Při těchto podmínkách by z materiálového hlediska připadaly v úvahu austenitické nerezové oceli (např. 316, 321) a slitiny Inconel pro turbínovou část. Nerezové oceli typu 316 a 321 vykazují také výbornou kompatibilitu se sodíkem a připadají tak v úvahu pro

aplikaci ve výměnících tepla mezi sodíkovými a sCO₂ okruhy.

Dalším reaktorem, který nabízí termodynamické podmínky vhodné pro spojení s sCO₂ cyklem je olovem chlazený rychlý reaktor (LFR). Další potenciální aplikací může být spojení s vysokoteplotním plynem chlazeným reaktorem (HTGR), který využívá jako primární chladivo He. V případě tohoto reaktoru dochází k vysokému nárůstu teploty média v jádře přibližně o 450 °C, což ovšem výrazně převyšuje ideální nárůst teploty pro aplikaci sCO₂ cyklu, která je přibližně 150 °C [7].

5. Současné jednotky využívající sCO₂

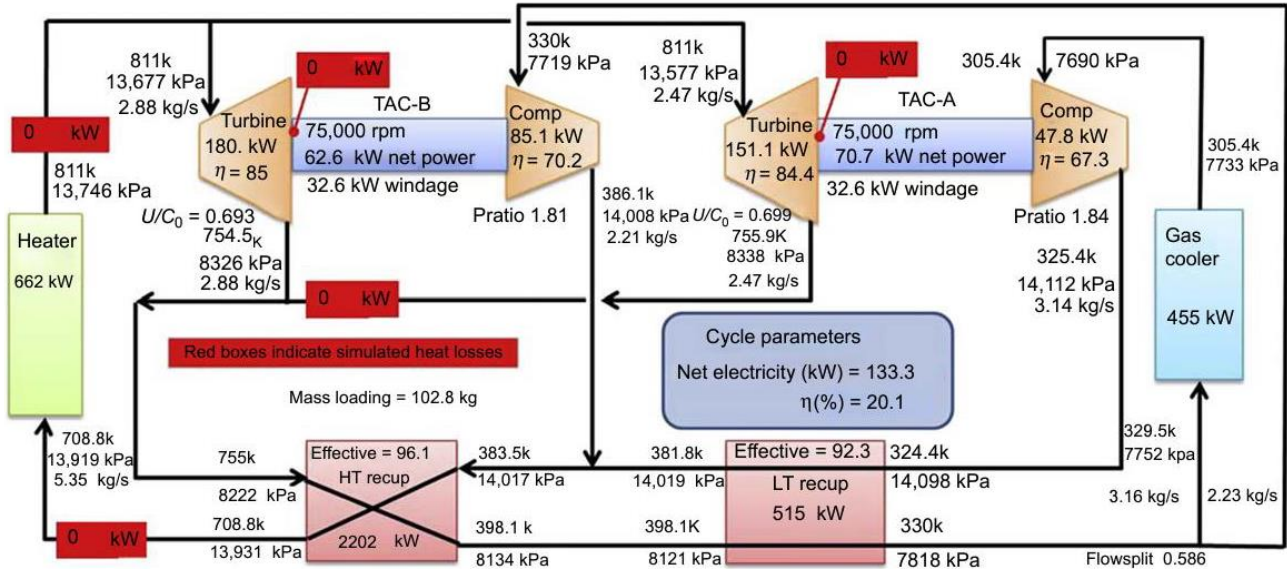
Do současné doby byl na světě zkonstruován omezený počet zařízení testujících provozní vlastnosti sCO₂ energetických okruhů. Hlavní zdroje provozních informací sCO₂ okruhů pocházejí např. z jednotek malých velikostí provozovaných Sandia National Laboratories (SNL) a Naval Nuclear Laboratory Integrated System Test (IST). Dalším významným zdrojem dat je Echogen Power Systems, s demonstrační jednotkou s výkonem v řádu jednotek MW. Vývojem dalšího zařízení, s výkonem v MW, pro testování komponentů, se zabývá Southwest Research Institute (SwRI). Dále existují po celém světě další malé jednotky testující sCO₂ okruhy.

5.1. Sandia National Laboratories (USA)

Zařízení bylo navrženo jako rekompresní, obsahující dvě turbíny a dva kompresory, viz obrázek 2.

Významnou roli hraje rekuperace tepla uvnitř smyčky, při které 60–70 % ohřevu média pochází právě z vnitřní rekuperace a zbývajících 30–40 % je dodáváno z vnějšího tepelného zdroje. Následkem tohoto uspořádání médium vstupuje do výměníku s externím zdrojem tepla při vysoké teplotě a tím pádem odebírá ze zdroje tepla relativně malé množství energie. Tato konfigurace vede k nízkému využití energie z otevřených zdrojů tepla, které odvádí část vzniklé energie spaliny. Naočak je výhodná pro uzavřené zdroje energie, zejména jaderné reaktory ale také pro využití solární energie. Energetické výhody plynoucí z vysokého stupně rekuperace vedou k předpokládané termodynamické účinnosti blízké 50 % při vstupní teplotě na turbínu okolo 700 °C.

Jednotka byla navržena pro provoz při vstupní teplotě na turbínu 538 °C a tlaku přibližně 13,7 MPa. Poměr tlaků na kompresoru je 1,8 a maximální elektrický výkon generátoru 125 kW. Vstupní podmínky při vstupu na hlavní kompresor byly navrženy na 7,69 MPa a 32,2 °C. Zdroj tepla je zajištěn elektricky s maximálním výkonem až 780 kW. Okruh je chlazený vodou s možným odvodem tepla až 500 kW. Smyčka je provozována při parametrech blízko kritického bodu oxidu uhličitého, což vede k snížené spotřebě energie kompresorů, avšak při těchto podmínkách dochází k výrazným změnám termodynamických vlastností oxidu uhličitého v závislosti na teplotě, zejména hustoty, což může komplikovat regulaci provozu smyčky [4, 18].



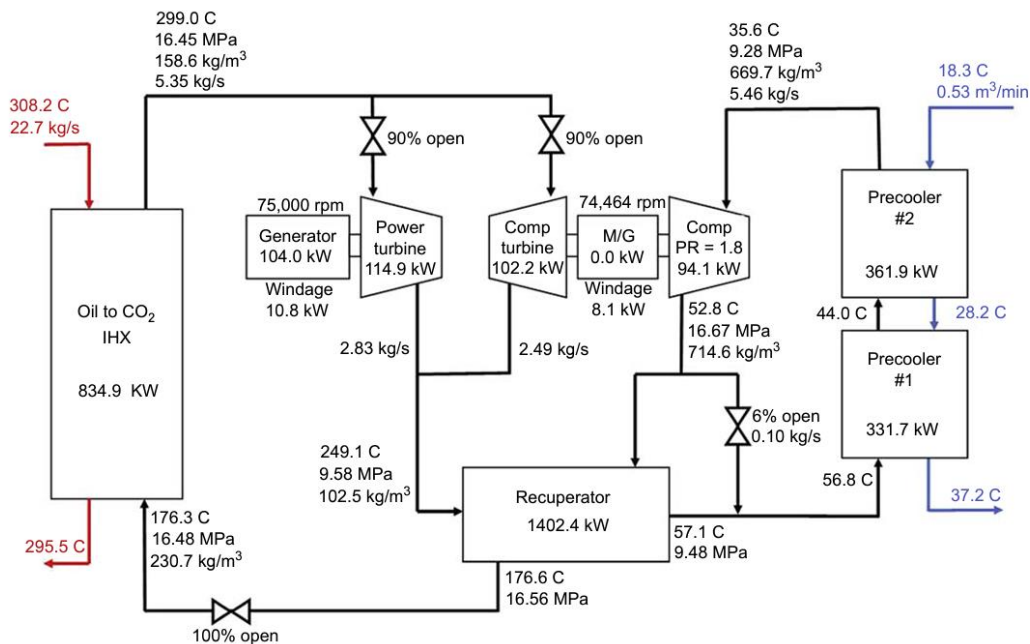
Obr. 2 Schéma sCO₂ smyčky v SNL [4]
 Fig. 2 Schematic of the sCO₂ loop in SNL [4]

5.2. Naval Nuclear Laboratory Integrated System Test - USA

Naval Nuclear Laboratory si dalo za cíl zhodnotit sCO₂ cyklus z hlediska využití pro námořní pohon. Jednotka byla navržena a postavena za účelem ověření stability a kontroly cyklu v širokém rozsahu provozních podmínek a při různém výkonu. Smyčka představuje jednoduchý Braytonův cyklus obsahující pouze jeden kompresor, což usnadňuje provoz a regulaci, viz obrázek 3.

Maximální výkon je 100 kW elektrických. Maximální provozní teplota cyklu je 299 °C a maximální tlak 16,7 MPa. Relativně nízká teplota typická pro komerční

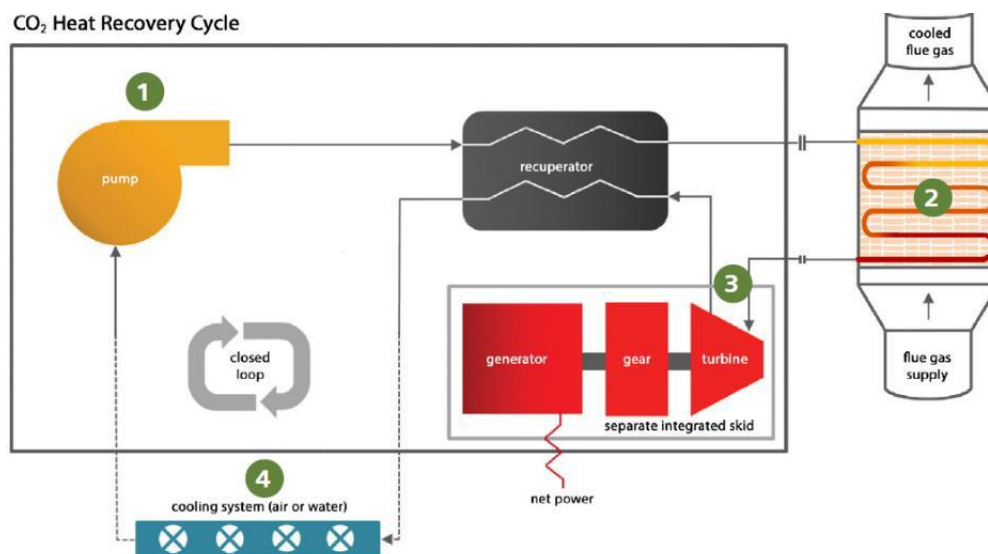
tlakovodní reaktory byla zvolena, aby mohlo být použito nerezové oceli 316 pro konstrukci potrubí. Vstup na kompresor byl navržený při podmínkách média 36 °C a 9,24 MPa. Parametry při vstupu na kompresor zajišťují stálou hustotu média. Podmínky blízké kritickému bodu by dovolily dosahovat vyšší účinnosti, avšak s vyššími odchylkami chování oxidu uhličitého. Ohřev zajišťuje elektrický zdroj s výkonem 1 MW. Chlazení zajišťuje vodní okruh. Provoz této smyčky úspěšně dokázal, že sCO₂ Braytonův cyklus může být regulován a provozován při všech etapách provozu, a to spuštění, ohřevu, generaci energie a vypnutí [19].



Obr. 3 Experimentální sCO₂ smyčka Integrated System Test [4]
 Fig. 3 Experimental sCO₂ loop Integrated System Test [4]

5.3. Echogen EPS100 - USA

Společnost Echogen vyvinula komerční jednotky pro využití odpadního tepla. První typ jednotky nazvaný EPS100 dosahuje výkonu 7 až 8 MW a představuje tak největší dosud provozovaný $s\text{CO}_2$ energetický cyklus. Zařízení je cílené na využití tepla plynu při teplotách 500–550 °C, a to např. tepla spalin. Minimální využitelná teplota zdroje byla navržena na 85 °C, což dovoluje využití jednotky i pro nízkoteplotní zdroje. EPS100 využívá jako pracovní médium oxid uhličitý s minimálním obsahem oxidu uhličitého 99,5 % [20].



Obr. 4 Jednotka pro využití odpadního tepla [21]
Fig. 4 Waste heat utilization unit [21]

5.4. SwRI SunShot - USA

SwRI vyvíjí jednotku, která bude schopna pracovat v plném rozsahu navrženého Braytonova cyklu při tlacích 8–28 MPa a teplotách 45–700 °C. Hlavním cílem této jednotky je popsat výkon rekuperátoru a expandéru a není zaměřena na popis chování celé smyčky. Podmínky média při vstupu na expandér jsou navrženy při teplotě 715 °C a tlaku 25 MPa [4, 22].

5.5. Experimentální smyčka v Centru výzkumu Řež s.r.o.

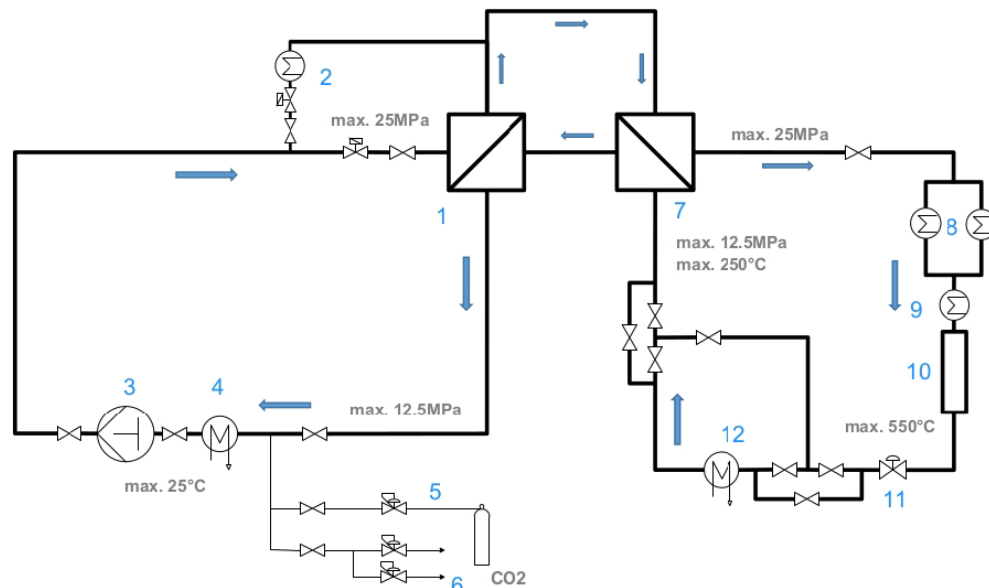
Centrum výzkumu Řež s.r.o. zprovoznilo $s\text{CO}_2$ smyčku navrženou na maximální teploty 550 °C, maximální tlak ve vysokotlaké části 25 MPa, maximální tlak v nízkotlaké části 12,5 MPa a průtok 0,4 kg/s. Experimentální smyčka je zobrazena na obrázku 5, kde PP je pístové čerpadlo, FC plnicí kompresor, BV odvzdušňovací ventily, CH1 chladič, CH2 chladič simulující uvolnění tepla na turbíně, LTR nízkoteplotní rekuperátor, HTR vysokoteplotní rekuperátor, TS testovací sekce a H1/1, H1/2, H2 ohříváky. Testovací sekce slouží k provádění materiálových zkoušek.

Nezbytným krokem před plněním smyčky je její evakuace, aby byla odstraněna vlhkost a vzduch. Pro

Jednotka pro využití odpadního tepla představená ve spolupráci společností Echogen a Siemens je uvedena na obrázku 4. V bodě 1 dochází k stlačení média, ve výměníku tepla (bod 2) dochází k přechodu do superkritického stavu, následně médium expanduje na turbíně (bod 3) pohánějící generátor, poté je nízkotlaký oxid uhličitý chlazen vzduchem nebo vodou. Dle uvedeného příkladu, při teplotě zdroje 532 °C a tepelném příkonu 33 MW může generátor poskytovat výkon až 9 MW elektrických.

tento účel je použita vakuová pumpa. K plnění dochází připojením tlakové lahve s oxidem uhličitým o objemu 50 l a čistotě 4,5 tj. 99,995 % obj. Během plnění dochází k vyrovnání tlaku ve smyčce a v lahvi, což zpomaluje plnění smyčky. Proto je použit kompresor, aby bylo plnění urychleno. Protože při běžné teplotě okolí dochází během plnění smyčky ke kondenzaci oxidu uhličitého uvnitř smyčky, nelze množství oxidu uhličitého měřit objemem. Množství napuštěného oxidu uhličitého do smyčky se měří hmotnostně. Smyčku o objemu přibližně 95 l je třeba naplnit přibližně 40 kg oxidu uhličitého, aby bylo dosaženo potřebných podmínek.

Abyste bylo dosaženo superkritického stavu oxidu uhličitého je médium zahříváno s maximálním teplotním gradientem 50 K/h. Se zvyšující se teplotou systému roste tlak, tím pádem roste hustota média a zvyšuje se hmotnostní průtok. Smyčka je rozdělena do nízkotlaké a vysokotlaké části, které jsou odděleny redukčním ventilem. Avšak celá smyčka je provozována v podmínkách, při kterých je oxid uhličitý v nadkritické formě. Aby se zamezilo překročení kritického tlaku je na smyčce instalováno několik pojistných ventilů v místech potenciálně náchylných k přetlakování např. v místech, kde dochází k ohřevu. Přerušování provozu smyčky je umožněno postupným ochlazením do studeného stavu tj. 20 °C [31].



Obr. 5 Schéma sCO₂ smyčka v CV Řež s.r.o. [23]

1. nízkoteplotní výměník; 2. předehříváč, 3. hlavní oběhové čerpadlo, 4. chladič, 5. systém dávkování CO₂, 6. odběrný systém, 7. vysokoteplotní výměník, 8. chladič, 9. ohříváče, 10. zkušební úsek, 11. redukční ventil, 12. chladič

Fig. 5 Process diagram of sCO₂ loop at CV Řež s.r.o. [23]

1. low temperature heat exchanger; 2. preheater, 3. main circulation pump, 4. cooler, 5. CO₂ dosing system, 6. sampling system, 7. high temperature heat exchanger, 8. cooler, 9. heaters, 10. test section, 11. reduction valve, 12. cooler

5.6. Ostatní provozované jednotky

Po světě bylo zkonstruováno několik dalších jednotek malých velikostí testujících sCO₂ cyklus. Mezi významná výzkumná zařízení patří:

- smyčka SCIEL (Supercritical CO₂ Brayton Cycle Integral Experiment Loop, Jižní Korea),
- smyčka v KAIST (Korea Advanced Institute of Science and Technology),
- Korea Institute of Energy Research (provozuje 3 sCO₂ smyčky),
- experimentální smyčka KAPL (Knolls Atomic Power Laboratory, USA),
- experimentální smyčka IAE (Institute of Applied Energy, Japonsko),
- sCO₂ smyčka SCARLETT (IKE, University of Stuttgart, Německo) [4].

6. Výzkum v oblasti sCO₂ okruhů

V současné době se výzkum zaměřuje na využití pro jaderné reaktory Gen IV a na modulární jaderné reaktory (SMR), jako např. v reaktoru typu SMART. Značným benefitem sCO₂ okruhů je kompaktnost a menší složitost chladicího okruhu. Dále se výzkum věnuje hlavně aplikacím pro jednotky využívající odpadní teplo, solární a geotermální elektrárny. Pro názornost lze uvést následující výzkumy:

Výzkum společnosti Sasol Technology se zabýval srovnáním vhodnosti použití různých konceptů sCO₂ cyklů v porovnání s parním Rankinovým cyklem pro aplikaci v koncentračních solárních elektrárnách (CSP).

Ze studie vyplývá, že vhodnějším cyklem pro využití v CSP je parovodní Rankinův cyklus, který je v této aplikaci účinnější a cenově výhodnější než všechny tři uvažované koncepty sCO₂ cyklů. Tento závěr platí ovšem konkrétně pro porovnání parovodního a sCO₂ cyklů pro využití v koncentračních solárních elektrárnách. Pro jaderné využití může sCO₂ cyklus poskytovat významné výhody. Zásadním rozdílem mezi využitím v CSP a v jaderných aplikacích je výhoda jaderné energie v časově konstantním výkonu, díky čemuž není třeba využívat zásobník. sCO₂ cyklus tak není omezen maximální teplotou zásobníku a může poskytovat vyšší účinnost díky možnosti provozu za vyšších teplot [24].

Konkurenceschopnost sCO₂ cyklu pro aplikaci v koncentračních solárních elektrárnách byla předmětem několika studií. Mezi programy, které se touto problematikou zabývají, patří program SunShot v USA a dále Australian Solar Thermal Research Initiative [25, 26].

Jedna z možných aplikací sCO₂ uvažuje o využití ve spojení se sodíkem chlazeným jaderným reaktorem, kde by sCO₂ cyklus mohl nahradit parovodní okruh. Nahrazením vody v sekundárním okruhu by se eliminovaly potenciální prudké reakce mezi sodíkem a vodou v případě průniku média z jednoho okruhu do druhého. Nižší reaktivita mezi sodíkem a oxidem uhličitým by mohla vést ke zvýšení bezpečnosti jaderného zařízení a ke zvýšení účinnosti. Bezpečnost spojení sCO₂ okruhu se sodíkem chlazeným reaktorem a reaktivita obou médií byla předmětem výzkumu v KAERI. Z tohoto výzkumu vyplývá, mimo jiné, že k reakci mezi sodíkem a oxidem uhličitým začíná docházet při teplotě sodíku 595 °C [27, 28].

Další možnou aplikací sCO₂ cyklu je využití v uhelných elektrárnách, tato možnost je zkoumána v USA - Pratt Whitney & Rocketdyne a ve Francii - Electricité de France. Z návrhu použití vyplývá, že by tato aplikace mohla produkovat stejné množství elektřiny a zároveň významně snížit emise oxidu uhličitého z elektrárny. Vůbec první oblastí, ve které se očekává komerční využití sCO₂ cyklu je výroba energie z odpadního tepla. Patenty vztahující se k této konkrétní aplikaci patří společně Echogen a General Electric v USA. Například plyn na výstupu z plynové turbíny má obvykle teplotu nad 450 °C a běžné parní Rankinovy cykly využívají tento odpadní plyn pro zlepšení celkové termodynamické účinnosti. Příklad v kombinovaném cyklu plynové turbíny a parovodního cyklu by mohl sCO₂ cyklus nahradit parní cyklus pro další zlepšení termodynamické účinnosti, a navíc by mohl být použit pro generování energie z odpadního tepla malých plynových turbín, kde není prakticky možné využít parní cyklus [24, 29].

Superkritický oxid uhličitý je dále uvažován pro použití např. jako pracovní médium pro jednotky, které by měly sloužit pro havarijní dochlazování jaderných reaktorů. Tyto bloky by v případě havárie měly přeměňovat zbytkové teplo reaktoru na elektřinu a nízkoteplotní odpadní teplo, které by mohlo být předáváno do vzduchu. Za účelem této aplikace byl navrhnout speciální výměník DBHE, který je testován v rámci projektu „sCO₂-HeRo“ [30, 31].

7. Závěr

Energetické sCO₂ okruhy nabízí výhody oproti současným parovodním cyklům. Potenciálně by mohly najít uplatnění v různých aplikacích v energetice a zlepšit celkovou účinnost při výrobě elektrické energie.

Ačkoli bylo během posledních 15 let dosaženo významného pokroku v oblasti sCO₂ energetických cyklů, je nezbytný další vývoj a výzkum pro prohloubení současných poznatků. Mimo jiné, je nezbytný výzkum vysokoteplotních materiálů, ochrany proti korozi a sledování kvality plynu. Dokud nedojde k dlouhodobému provozu pokusného zařízení, které by ukázalo shodu výzkumných závěrů s provozními zkušenostmi, není možné hromadné využití sCO₂ cyklů pro generaci energie.

Úspěšné komerční využití jednotek využívajících sCO₂ Braytonova cyklu záleží na výhodách, které je tato technologie schopna nabídnout v porovnání se současnými technologiemi. Nová technologie má šanci uspět na trhu, jen pokud nabízí významnou ekonomickou výhodu, vyšší spolehlivost nebo další zásadní výhody. Mezi hlavní možné výhody technologie sCO₂ energetického cyklu patří:

- vyšší termodynamická účinnost elektrárny,
- nižší investiční náklady,
- nižší uhlíková stopa a zátěž životního prostředí.

Budoucí výzkum sCO₂ cyklů může být zhruba rozdělen do tří kategorií:

- celkový návrh koncepce cyklu,

- vývoj konkrétních částí cyklu,
- vývoj vhodných materiálů pro vysokoteplotní aplikace.

Hlavní oblasti potřebného výzkumu kvality pracovního média jsou následující:

- škodlivé efekty potenciálních nečistot, jak termodynamické, tak chemické,
- potenciální látky, použitelné jako aditiva, které by mohly zlepšit termodynamické vlastnosti cyklu,
- potenciální aditiva pro inhibici škodlivé koroze,
- potenciální kontaminanty, jejich sledování a odstraňování,
- prevence koroze,
- řízení obsahu H₂O, O₂, CO, SO_x, NO_x, a dalších.

Vysoká cena materiálů potřebných pro vysokoteplotní použití nad 600 °C, vyžaduje zaměřit se na celkovou koncepci sCO₂ cyklů, aby mohla být co možná minimalizována délka potrubí, a tak snížena spotřeba materiálů.

Poděkování

Tento příspěvek vznikl za podpory Technologické agentury ČR, projektu „Čištění a kontrola čistoty plynového média CO₂ okruhů“ (TK02030023).

Předkládané výsledky byly získány s využitím infrastruktury CICRR, která je finančně podporována MŠMT – projekt LM2023041.

Literatura

1. Berka J., Hlincik T., Viden I., Hudský T., Vít J. The design and utilization of a high-temperature helium loop and other facilities for the study of advanced gas-cooled reactors in the Czech Republic. *Progress in Nuclear Energy*, 2015, 85, 156-163.
2. Feher, E. G. The Supercritical Thermodynamic Power Cycle. *Energy Conversion*, 1967, 8, 85-90.
3. Sarrade, S., Féron D., Rouillard F., Perrin S., Robin R., Ruiz J. Ch. Turc H. A. Overview on corrosion in supercritical fluids. *Journal of Supercritical Fluids*, 2017, 120, 335-344
4. Brun K., Friedman P., Dennis R. Fundamentals and Applications of Supercritical Carbon Dioxide (sCO₂) Based Power Cycles. 2017. Woodhead Publishing. ISBN 978-0-08-100804-1.
5. Persichilli, M., Kacludis A., Zdankiewicz E., Held T. Supercritical CO₂ Power Cycle Developments and Commercialization: Why sCO₂ can Displace Steam. *Power-Gen India & Central Asia*, 19. – 21. duben New Delphi, 2012
6. Dostal, V., Driscoll M., Hejzlar P. A Supercritical Carbon Dioxide Cycle for Next Generation Nuclear Reactors. MIT-ANP-TR-100. 2004.
7. Vesely, L., Dostal O., Bartos O., Novotny V. Pinch Point Analysis of Heat Exchangers for Supercritical Carbon Dioxide with Gaseous Admixtures in CCS Systems. *Energy Procedia*, 2016, 86, 489-499.

8. Salim M. S., Saeed M., Kim M. K. Performance analysis of the supercritical carbon dioxide re-compression Brayton cycle. *Applied Science*, 2020, 10(3), 1129.
9. Vesely, L., Dostal V., Entler S. Study of the cooling systems with S-CO₂ for the DEMO fusion power reactor. *Fusion Engineering and Design*, 2017, 124, 244–247.
10. Linares J. I., Herranz L. E., Fernandes I., Cantizano A., Moratilla B. Y. Supercritical CO₂ Brayton power cycles for DEMO fusion reactor based on Helium Cooled Lithium Lead blanket. *Applied Thermal Engineering*, 2015, 76, 122-133.
11. Chen S., Zheng Y., Wu M., Hu J., Yiang W. Thermodynamic analysis of foxy-fuel combustion integrated with the sCO₂ Brayton cycle for combined heat and power production. *Energy Conversion and Management*, 2021, 232, 113869.
12. Liu M., Zhang X., Yang K., Ma Y., Yan J. Optimization and comparison on supercritical CO₂ power cycles integrated within coal-fired power plants considering the hot and cold end characteristics. *Energy Conversion and Management*, 2019, 195, 854-865.
13. Allam R., Martin S., Forrest B., Fetvedt J., Lu X., Freed D., Brown G. W., Sasaki T., Itoh M., Manning J. Demonstration of the Allam Cycle: An update on the development status of a high efficiency supercritical carbon dioxide power process employing full carbon capture. *Energy Procedia*, 2017, 5948-5966.
14. National Energy Technology Laboratory. Quality Guidelines for Energy System Studies, CO₂ Impurity Design Parameters. 2013. Dostupné z: https://co2quest.eu/wp-content/uploads/2017/04/quality_guidelines.pdf (staženo 20. 10. 2023)
15. Ahn Y., Bae S. J., Kim M., Cho S. K., Baik S., Lee J. I., Cha J. E. Review of supercritical CO₂ power cycle technology and current status of research and development. *Nuclear Engineering and Technology*, 2015, 47, 647-661.
16. Moiseyev A., Sienicki J. J. Investigation of alternative layouts for the supercritical carbon dioxide Brayton cycle for a sodium-cooled fast reactor. *Nuclear Engineering and Design*, 2009, 239, 1362-1371.
17. Ahn Y., Lee J. I. Study of various Brayton cycle designs for small modular sodium-cooled fast reactor. *Nuclear Engineering and Design*, 2014, 276, 128-141.
18. Lewis T.G., Parma E.J., Wright S.A., Vernon M.E., Fleming D.D., Rochau G.E. Sandia's Supercritical CO₂ Direct Cycle Gas Fast Reactor (SC-GFR) Concept. Proceedings of the ASME 2011 Small Modular Reactors Symposium. ASME 2011 Small Modular Reactors Symposium. Washington, DC, USA. 28.–30. září, 2011. pp. 91-94. ASME.
19. Clementoni E. M., Timothy L. C., King M. A. Response of a compact recuperator to thermal transients in a supercritical carbon dioxide Brayton cycle. Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air. 50961. American Society of Mechanical Engineers, 2017.
20. Alfani D., Binotti M., Macchi E., Silva P., Astolfi M. sCO₂ power plants for waste heat recovery: design optimization and part-load operation strategies. *Applied Thermal Engineering*, 2021, 195, 117013.
21. Siemens Waste Heat to Power System. siemens.com Dostupné z: <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:07c8ea05-5524-4862-bee6-416566dc3018/version:1587988954/24002-echo-gen20-sie-let.pdf> (staženo 20. 10. 2023)
22. Moore J., Evans N., Brun K., Bueno P. Development of a 1 MWe supercritical CO₂ Brayton cycle test loop. The 4th International Symposium - Supercritical CO₂ Power Cycles. 2014, 1–16.
23. Berka J., Ballek V. J., Velebil L., Purkarová E., Vagenknechtová A., Hlinčík T. CO₂ power chemistry in the CV Řež experimental loop. *Acta polytechnica* 2021, 61 (4), 1-7.
24. Cheang V. T., Hedderwick R. A., McGregor C. Benchmarking supercritical carbon dioxide cycles against steam Rankine cycles for Concentrated Solar Power. *Solar Energy*, 2015, 113, 199-211.
25. Turchi C. S., Ma Z., Neises T. W., Wagner M. J. Thermodynamic Study of Advanced Supercritical Carbon Dioxide Power Cycles for Concentrating Solar Power Systems. *J. Sol. Energy Eng.* 2013, 135, 041007.
26. Guregenci H., Stein W., Beath A., Blanco M., Sauret E. The Case for Supercritical CO₂ Radial Turbine Development within the Australian Solar Thermal Research Initiative (ASTRI) Program. In: 52nd Annual Conference, Australian Solar Energy Society (Australian Solar Council). 2014.
27. Yoonhan, A., Seong J., Minseok K. Review of supercritical CO₂ power cycle technology and current status of research and development. *Nuclear Engineering and Technology*, 2015, 47(6), 647–661.
28. Jung, H., Yoo Y., LEE J., WI M., Eoh J. An experimental study on the ignition temperature of sodium CO₂ reaction with an implication of safety of a SFR with S-CO₂ Brayton cycle. International Congress on Advanced Nuclear Power Plants. 2014.
29. Bella, D., Francis A. Gas turbine engine exhaust waste heat recovery navy shipboard module development. In: Supercritical CO₂ Power Symposium. 2011.
30. Flaig W., Mertz R., Starflinger J. Setup of the supercritical CO₂ Test facility “SCARLETT” for basic experimental investigations of a compact heat exchanger for an innovative decay heat removal system. *Journal of Nuclear Engineering and Radiation Science*, 2018, 4(3), 1–11.
31. Flaig W., Mertz R., Starflinger J. Power Cycle Calculations and Preliminary Design of a Compact Heat Exchanger of a Scaled Down sCO₂-HeRo-System for a PWR Glass Model at KSG/GfS,. In: First European Seminar on Supercritical CO₂ (sCO₂) Power Systems. 2016.

Summary

Supercritical CO₂ power cycle

Eliška Purkarová, Jakub-Vojtěch Ballek, Alice Vagenknechtová, Jan Berka, Tomáš Hlinčík

The article is focused on summarizing the issue of energy circuits working with supercritical carbon dioxide sCO₂. Carbon dioxide is currently coming to the forefront of many research institutions with regard to its possible use in its supercritical conditions, thanks to which higher efficiency and compactness of equipment can be achieved compared to conventional steam-water cycles.

The article describes the basic properties of this medium, including a description of sCO₂ cycles (Brayton, Rankine, etc.). Furthermore, the possible use of energy cycles with sCO₂ is discussed, especially in solar and nuclear power plants and in power plants burning fossil fuels. In the case of solar power plants, the sCO₂ Brayton cycle can offer higher cycle efficiencies than using supercritical steam cycles. The use of sCO₂ in nuclear or coal power plants in turn increases efficiency and reduces water consumption. In addition, the use of the sCO₂ circuit in new nuclear reactors of the IV generation is currently being considered, in which the operating temperatures are in the range of 500 - 900 °C, i.e. they are generally higher than operating water-cooled reactors.

Even though the use of CO₂ refrigerant in power systems has been known for a long time (e.g. use in the first Czechoslovak power plant in Jaslovské Bohunice), they are still not used commercially in the energy industry. One of the reasons is the ongoing research into the behavior of materials at high temperatures in sCO₂, corrosion protection, or the effect of carbon dioxide purity on behavior in the supercritical region.