

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ
ÚSTAV PROCESNÍ A ZPRACOVATELSKÉ TECHNIKY

BIOPLYNOVÁ STANICE S UPGRADEM NA BIOMETAN

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Praze dne.....

Podpis.....

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat všem, kteří mi s prací pomohli. Speciálně mému vedoucímu Ing. Jaromíru Štanclovi, Ph.D. za poskytnuté rady a data. Také bych na tomto místě rád poděkoval svým rodičům, za jejich zdaleka ne jen materiální podporu po celou dobu studia.

Abstrakt

Tato diplomová práce je technicko-ekonomickou studií upgradu bioplynu na biometan. Teoretická část se věnuje situaci v Evropě a možným technologickým postupům včetně přehledu používaných technologií pro čištění bioplynu. Praktická část je zaměřena na porovnání dvou způsobů upgradu: aminové vypírky a membránové separace, a to jak po technické, tak po ekonomické stránce. V závěru je provedeno ekonomické zhodnocení včetně citlivostní analýzy a se zvážením několika faktorů a je nastíněn optimální scénář.

Abstract

This master thesis contains a technical and economic study of biogas to biomethane upgrade. The theoretical part focuses on the situation in Europe and possible technological processes. The practical part is focused on the comparison of two methods of upgrade: amine scrubber and membrane separation, both technically and economically. Finally, an economic evaluation together with a sensitivity analysis is done considering several factors and the optimal scenario is outlined.

Obsah

1. Úvod	8
2. Motivace.....	8
2.1. Plán ČR.....	9
3. Rešerše	11
3.1. Situace v ČR	11
3.1.1. Bioplyn.....	11
3.1.2. Biometan	11
3.2. Situace v Evropě	12
3.2.1. Německo [12]	13
3.2.2. Spojené království	15
3.2.3. Francie [16].....	15
3.2.4. Dánsko [12].....	16
3.3. Metody upgradu bioplynu [17]	17
3.3.1. Fyzikální absorpce	17
3.3.2. Chemická absorpce	19
3.3.3. Adsorpce na pevném povrchu.....	20
3.3.4. Střídání tlaků PSA	21
3.3.5. Kryogenní separace	22
3.3.6. Membránová separace.....	22
3.3.7. Chemická hydrogenace	24
3.3.8. Biologické metody [19].....	24
4. Návrh a bilance upgradu	26
4.1. Bioplyn.....	26
4.2. Předpoklady.....	27
4.3. Aminová vypírka	28
4.3.1. Nastavení simulace.....	28
4.3.2. Výsledky simulace.....	34
4.4. Membránová separace.....	36
4.4.1. Uvažovaná membrána.....	38
4.4.2. Bilance	40
5. Ekonomická část.....	44
5.1. Úvod	44
5.2. Dotační tituly	45
5.3. Scénáře	47

5.4.	Výchozí parametry.....	48
5.5.	Náklady na technologii.....	49
5.6.	Provozní náklady (OPEX)	50
5.7.	Příjmy projektu.....	52
5.8.	Sestavení cash flow	52
5.9.	Ekonomické vyhodnocení.....	53
5.9.1.	Prostá doba návratnosti	53
5.9.2.	Reálná doba návratnosti	53
5.9.3.	Čistá současná hodnota (NPV)	53
5.9.4.	Vnitřní výnosové procento (IRR)	53
5.10.	Proměnné	54
5.10.1.	Vliv výše investičních nákladů (CAPEX)	54
5.10.2.	Vliv výkupní ceny biometanu	54
5.10.3.	Vliv výše případné dotace	54
5.11.	Výsledky.....	55
5.11.1.	Kogenerační jednotka.....	55
5.11.2.	Upgrade na biometan – aminová vypírka	56
5.11.3.	Upgrade na biometan – membránová separace.....	58
5.12.	Optimisticko – realistický scénář	60
6.	Závěr.....	62
7.	Seznam použité literatury	63
8.	Seznam obrázků	68
9.	Seznam tabulek	69
10.	Seznam použitých zkratk.....	70
11.	Seznam použitých symbolů	71
12.	Seznam příloh.....	72

1. Úvod

Cílem této práce je vypracování technicko-ekonomické studie a porovnání dvou technologií upgradu bioplynu ze zemědělské bioplynové stanice na biometan, tedy takzvaně zelený zemní plyn. Tato technologie je již běžně rozšířena v ostatních evropských zemích. Rozdíl mezi bioplynem a biometanem je ve složení, zejména v obsahu metanu (CH_4). Zatímco bioplyn obsahuje 45 % až 75 % metanu, biometan, jak již název napovídá, je téměř čistý metan (dle zákona minimálně 95 %_{mol} [1]). Toto jej předurčuje nejenom k širšímu využití, ale také k lepší distribuci stávající infrastrukturou pro zemní plyn. Tím by se dal používat nejenom pro vytápění domácností spalováním v moderních kondenzačních kotlích, ale i pro pohon vozidel využívající CNG.

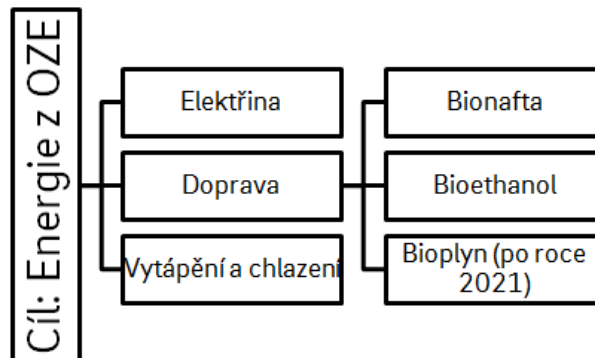
Pro vytvoření technologického schéma a určení hmotových a energetických bilancí byl použit software Aspen Plus a MS Excel, následně byla zpracována ekonomická analýza se zvážením tří faktorů: výše počáteční investice, výkupní ceny biometanu a možnosti případného získání dotace.

2. Motivace

Posledních několik let jsou všechna odvětví zasažena požadavky na snižování emisí skleníkových plynů. Spalování klasického zemního plynu sice produkuje zhruba jen 60 % emisí CO_2 oproti uhlí a 70 % proti ropným palivům [2], zdaleka jej však nemůžeme označit za čistý zdroj. Bioplyn, potažmo biometan, je však považován za částečně nebo i zcela „carbon neutral“, tedy bez emisí CO_2 . Důvodem je cyklus CO_2 , který se po vyprodukování spálením bioplynu vrací zpět do rostlin, které jsou posléze spásány dobyt看em, a kejdá následně končí v bioplynové stanici, nebo rostliny míří přímo do bioplynové stanice. Přidáním tohoto obnovitelného metanu do plynárenské soustavy lze tak dosáhnout takzvaného „ozelenění plynu“. To by mohlo pomoci překlenout transformační periodu v odvětvích, kde nástup nových technologií a zdrojů nebude tak rychlý nebo dostatečný. V podmínkách České republiky jde o sektor dopravy, pravděpodobně ještě důležitějším ale může být sektor teplárenství, kde ani rychlá přestavba kotlů na pevná paliva na kotle spalující zemní plyn nemusí stačit na zlepšení dlouhodobé finanční situace.

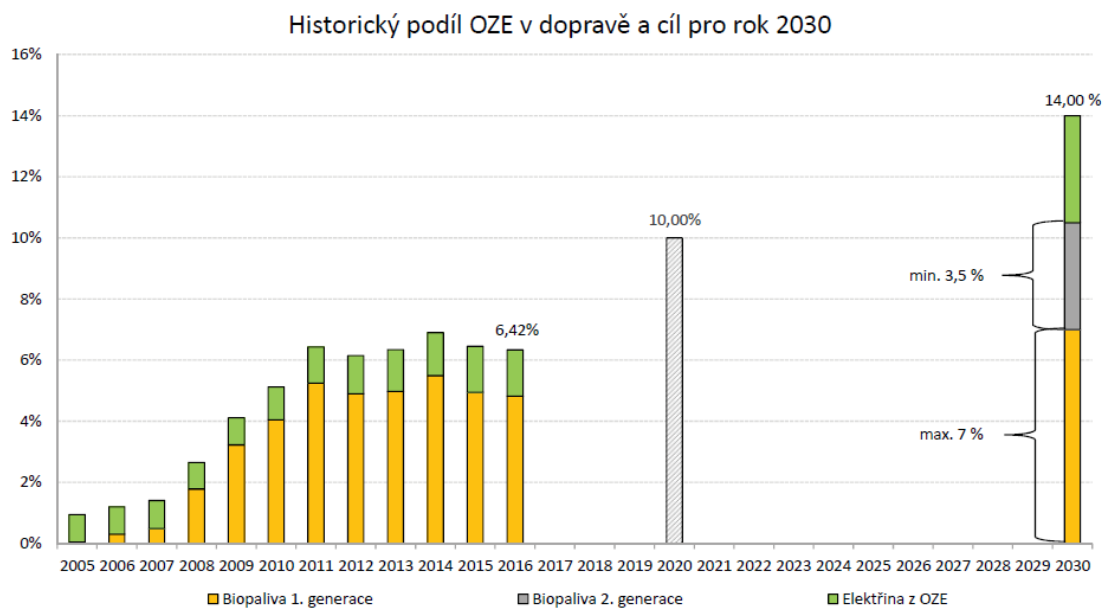
2.1. Plán ČR

Obecně známé závazky snižování emisí CO₂ v Evropské unii ale říkají i to, v jakých sektorech se má jaká úspora realizovat. V České republice implementaci těchto dohod řeší Vnitrostátní plán České republiky v oblasti energetiky a klimatu [3], který byl Vládou schválen 13. ledna 2020. V něm se jako ČR zavazujeme do roku 2030 snížit emise o 30 % oproti roku 2005. Dále definuje jednotlivé cíle, jak je vidět na obrázku 1.

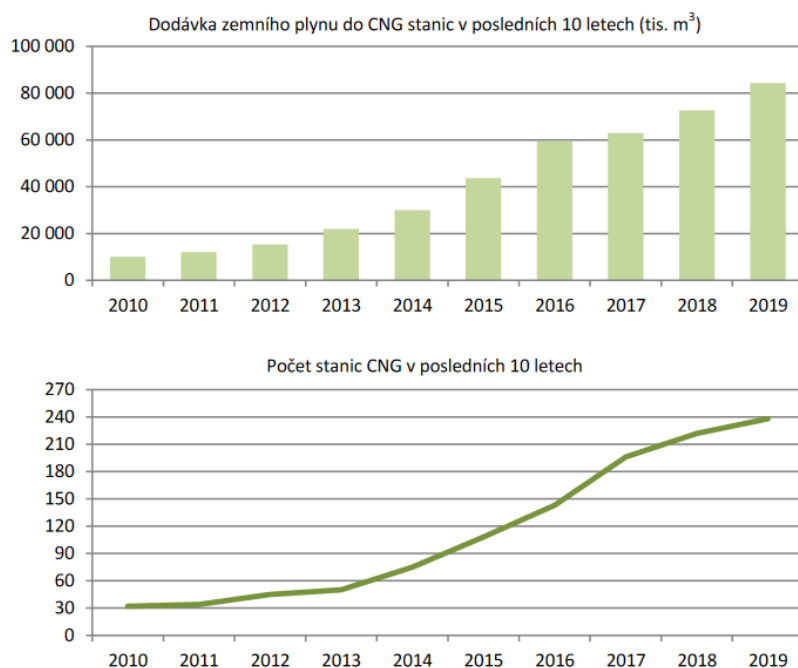


Obrázek 1: Schéma cíle Energie z OZE [3]

Právě v sektoru dopravy počítá Ministerstvo průmyslu a obchodu s nasazením biometanu v podobě přídatku biometanu do plynovodů a větším počtem CNG vozidel na tuzemských silnicích (viz obrázek 2 a 3).



Obrázek 2: Cíle podílů OZE v sektoru dopravy dle MPO [4]



Obrázek 3: Vývoj dodávek CNG do plnicích stanic a jejich počet [5]

Na tento záměr navazuje i konkrétní podpůrné opatření zmíněné ve Vnitrostátním plánu České republiky v oblasti energetiky a klimatu [3], a sice „Nový druh podpory k zajištění plnění cíle v OZE v sektoru dopravy – podpora biometanu“. Podpora bude ve formě ročního zeleného bonusu po dobu 20 let, což je projektovaná životnost technologie. Projekt musí být připojen k distribuční nebo přepravní infrastruktuře a vztahují se na něj veškeré standardní nároky jako je evidence u Operátora trhu (OTE), měření a vykazování. V dalším kroku by mělo být zavedeno i vydávání záruk původu.

Plyn ale může sehrát důležitou roli i ve snižování emisí v elektroenergetice, o čemž se zmiňuje i Vnitrostátní plán [3]: „Vzhledem k intermitentnímu charakteru solárních a větrných elektráren mohou hrát významnou roli plynná paliva, jednak z důvodů jejich technologických možností pro vyrovnávání odchylek elektroenergetické soustavy, a i díky možnosti konverze elektřiny do podoby plynných paliv. Vzniká tak potenciál významně posílit stabilitu celého systému, jednak například díky tomu, že plynná paliva lze snadněji a levněji uskladňovat a přepravovat, a rovněž pomoci efektivnějšímu využívání obnovitelných zdrojů. Touto formou lze maximalizovat užitek z již existující energetické infrastruktury k co nejefektivnějšímu

přechodu na nízkoemisní ekonomiku kombinující zemní plyn spolu s dekarbonizovanými a obnovitelnými plyny.“

3. Rešerše

3.1. Situace v ČR

3.1.1. Bioplyn

V tuzemsku funguje 554 bioplynových stanic (7 odpadových, 11 průmyslových, 56 skládkových, 98 u čistíren odpadních vod a 382 zemědělských) [6]. Naprostá většina produkuje bioplyn, který je posléze spalován v kogeneračních jednotkách a vyrobená elektřina je dodávána do rozvodné sítě za garantovanou výkupní cenu, případně s využitím tzv. zelených bonusů.

3.1.2. Biometan

V současné době dodává v ČR do sítě biometan jediná bioplynová stanice – ECR Rapotín. Tamější bioplynová stanice zpracovává odpad, nejedná se tedy o klasickou zemědělskou bioplynovou stanici, kterou se zabývá tato práce. Vyrobený biometan od dubna tohoto roku odebírá společnost innogy, která ho bude využívat ve svých CNG plnicích stanicích [7]. Parametry následují v tabulce 1.

Parametry stanice v Rapotíně [8]	
Technologie	Třístupňová membránová separace
Výrobce	PRODEVAL
Dodavatel pro ČR	Biomethane CE
Kapacita jednotky	260 – 300 Nm ³ bioplynu za hodinu
Investice	cca 45 mil. Kč

Tabulka 1: Parametry biometanové stanice v EFG Rapotín

Dalším pomalu připravovaným projektem je přístavba bioplynové stanice u spalovny Pražských služeb v Malešicích. Podle nedávné neveřejné studie, kterou si hl. m. Praha nechalo vypracovat, vychází, že nejvýhodnější by byla stanice pro zpracování zhruba 50 tisíc tun gastroodpadu ročně. Biometan dává v tomto případě smysl nejen pro vtlačení do plynárenské soustavy, ale také pro on-site výrobu bioCNG, které by mohlo při plném výkonu linky stačit až pro 230 vozidel, s tím, že již nyní jezdí několik aut Pražských služeb na zemní

plyn. Investice by se měla přiblížit necelé miliardě korun s plánovanou návratností asi 15 let. Pokud se záměr schválí, stanice by měla začít fungovat v roce 2023 [9].

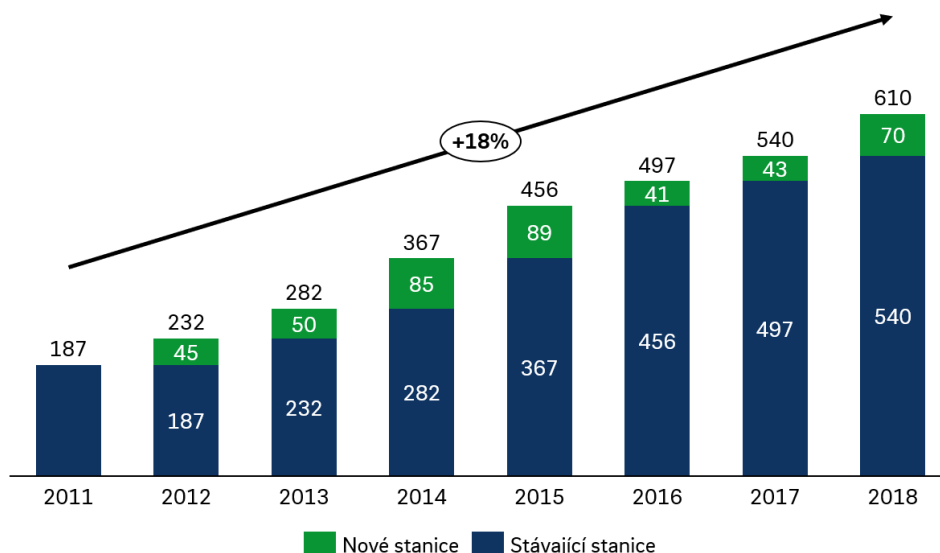
I druhá uvažovaná biometanová stanice je založena na odpadu z gastronomických a podobných provozů. Jde o stávající bioplynovou stanici v Horní Suché na Karvinsku, kde by se měla postavit nová i s upgradem na biometan. Minoritním investorem v tomto projektu je i společnost Air Products, nicméně projekt se odsouvá již několik let. Provozovatel, společnost Organic Technology, ale vypsal v červnu letošního roku veřejnou zakázku na dodavatele technologie. Stanice by měla do sítě dodávat až 3,2 milionu Nm³ biometanu ročně [10].

Uvažuje se i o další biometanové stanici v hlavním městě, kterou plánuje Pražská vodohospodářská společnost postavit u Ústřední čistírny odpadních vod na Císařském ostrově. Mělo by se jednat o společný projekt s Pražskou plynárenskou, který má i dohodnutý model financování a s ostrým provozem se počítá v roce 2025.

Rozvoj biometanu je v České republice spíše pomalý, a i jen hrubě uvažované projekty se počítají v jednotkách. Změnu by mohl přinést v roce 2021 takzvaný Plynárenský balíček, evropský dokument, který nastaví cestu k dekarbonizaci plynárenství a bude se podrobně věnovat třeba technologiím power-to-gas, ale i legislativě, kde by se mohly například zmírnit podmínky unbundlingu (povinné oddělení obchodní a distribuční aktivity energetických společností) pro pilotní a malé projekty v této oblasti.

3.2. Situace v Evropě

Vzhledem k velikosti České republiky je na našem území relativně vysoký počet bioplynových stanic, ale biometan si sem cestu zatím příliš nenašel. Inspiraci je tak možné čerpat z historického a současného vývoje v ostatních evropských zemích. Zároveň je dobře patrný vliv zavádění a rušení různých podpůrných opatření, která v České republice teprve pomalu začínají. Počet bioplynových stanic v Evropě stále roste, jak ilustruje následující graf (obrázek 4).

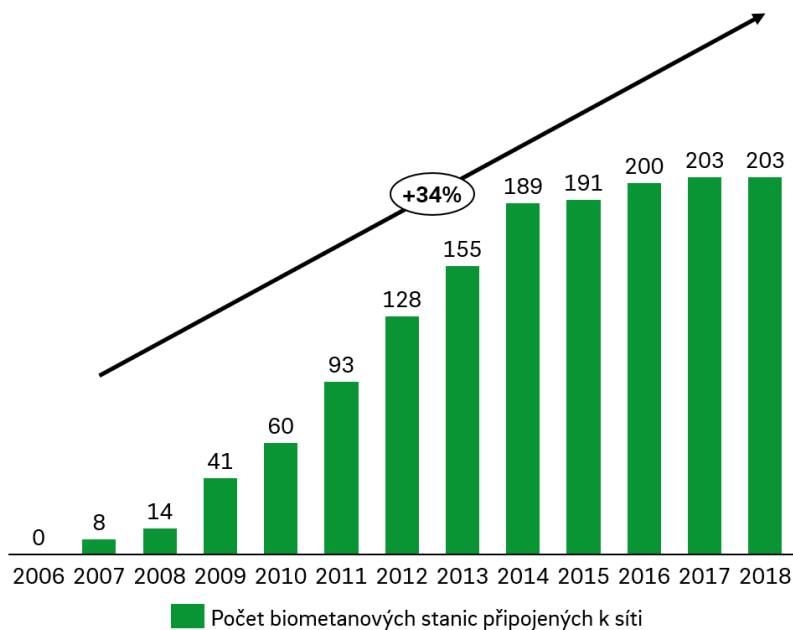


Obrázek 4: Vývoj počtu biometanových stanic v Evropě [11]

3.2.1. Německo [12]

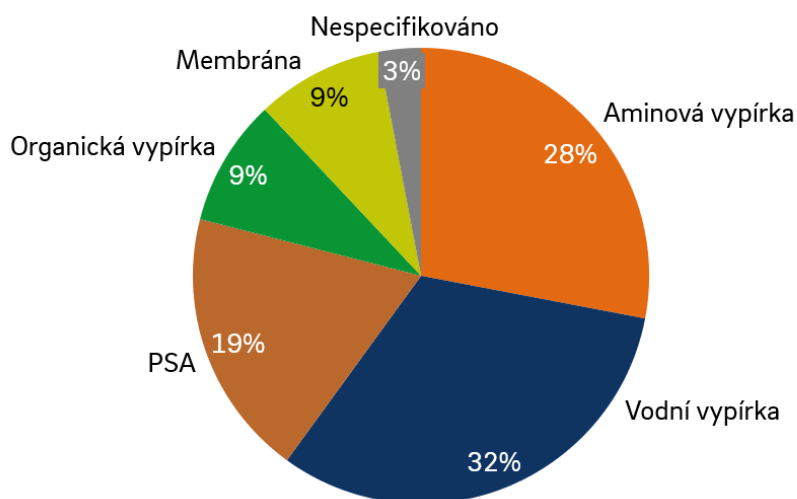
Bioplynovou velmocí je v Evropě Německo. Na konci roku 2018 na jeho území fungovalo 8980 bioplynových stanic, z toho 203 stanic, které upravovaly vstupní bioplyn na biometan.

Hlavním stimulem pro využívání bioplynu i biometanu jsou dotační programy, které začaly platit v roce 2009. V roce 2014 však došlo ke zrušení bonusu za upgrade bioplynu, a to se také odrazilo na počtu nově postavených stanic. Situaci ilustruje obrázek 5. V současné době musí navíc bioplynové stanice, jako všechny obnovitelné zdroje v Německu, soutěžit o podporu v aukcích. Pro biometan v současné době žádná přímá podpora neexistuje, stále se s ním však počítá v energetických scénářích, kde by měl doplňovat elektrickou energii a vykrývat tak poptávkové a výkonové špičky (tzv. sector coupling).



Obrázek 5: Vývoj počtu biometanových stanic v Německu [12]

Obvyklá bioplynová stanice s úpravou na biometan má o něco větší kapacitu než stanice bez této technologie. Vsádka se také liší – je zde dominantní zastoupení energetických plodin, v několika málo případech kombinovaných s kejdou. Co se týče zastoupení různých technologií pro separaci CO₂ z bioplynu, v posledních letech se stále více prosazují membrány. Zastoupení jednotlivých technologií následuje na obrázku 6 níže.



Obrázek 6: Podíly jednotlivých technologií na upgradu bioplynu v Německu

3.2.2. Spojené království

Spojené království je s 92 biometanovými stanicemi druhou zemí v Evropě v jejich počtu [13].

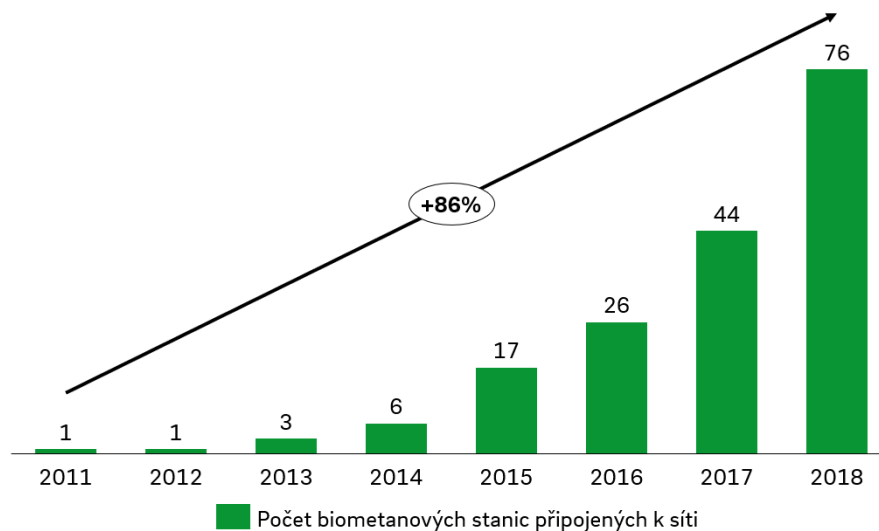
Pobídky jsou zde trojího typu [14]:

1. Pobídky na obnovitelné teplo (*Renewable Heat Incentive*)
 - pevně stanovený bonus za vyrobenou kWh
 - vztahuje se na zařízení uvedené do provozu po roce 2009 a trvá 20 let
 - výše se odvíjí od data spuštění provozu a použité technologie
2. Povinné procento obnovitelných paliv (*Renewable Transport Fuel Obligation*)
 - dodavatelé fosilních paliv v dopravě jsou povinni zajišťovat, že určité procento palivového mixu v dopravě pochází z obnovitelných zdrojů
 - biometan je počítán pouze v případě, že pochází kompletně z biomasy
3. Certifikáty (*Biomethane certification scheme*)
 - standardní certifikační program, který umožňuje obchodování s biometanem a také zabraňuje dvojímu započítávání podpory apod.

V Británii také již existuje dokument, který nabízí konkrétní řešení pro odstranění překážek, které brání dalšímu rozvoji bioplynových a biometanových stanic. Počítá se v něm například s prodloužením výše zmíněných opatření, ale také s obecně vyšší finanční podporou, protože návratnost projektů podle autorů neodpovídá jejich přínosu ekologii a sociálním benefitům (zaměstnanost v oboru, investice do venkovských částí země atd.).

3.2.3. Francie [16]

Nejrychleji rostoucí zemí v oblasti biometanu v Evropě je Francie [13] (obrázek 7). Za cíl si dala 10% podíl obnovitelného (zeleného) plynu na celkové spotřebě zemního plynu v roce 2030. Finanční podpora tohoto cíle je následující: garance výkupních cen po dobu 15 let a dotace pro pokrytí napojení stanice k síti. Celkový objem dotací do roku 2030 se očekává mezi 7 a 9 miliardami euro. Pro stimulaci poptávky i v komerčním sektoru již existují záruky původu.



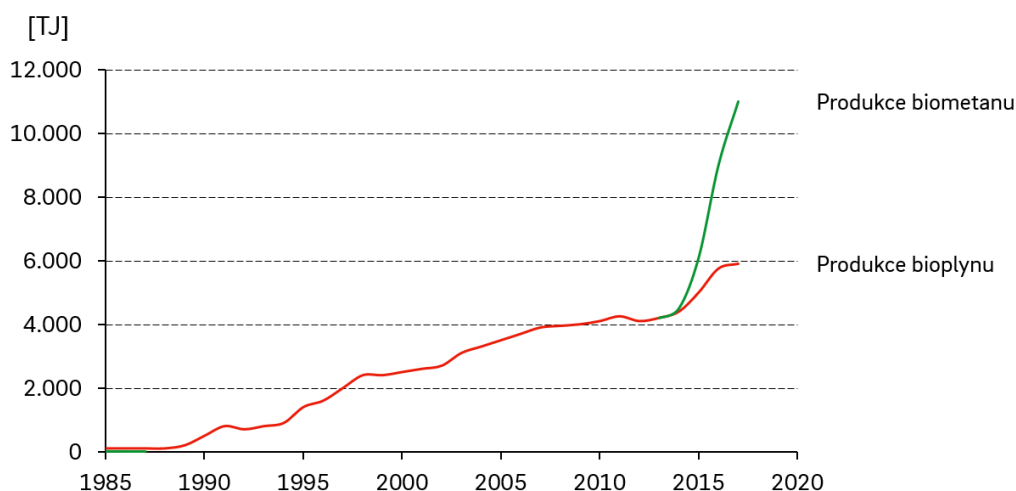
Obrázek 7: Vývoj počtu biometanových stanic ve Francii [16]

3.2.4. Dánsko [12]

Dánsko má dlouhou bioplynovou historii, sahající až do roku 1920, kdy se začal bioplyn využívat pro vytápění nádrží v úpravnách vody.

O téměř sto let později, v roce 2012, přišel zlom pro biometan. Tehdy vešel v platnost Energetický zákon, který ustanovil podporu ve formě výkupních cen. To spustilo vlnu výstavby několika větších stanic, zejména v podání velkých energetických společností (E. ON, Orsted apod.), ale postavilo se i pár stanic vlastněných většími farmáři a soukromými investory. Na konci roku tak bylo z 90 zemědělských bioplynových stanic 24 s upgradem a vtláčelo biometan do sítě. Tomu odpovídá i strmý nárůst vyprodukovaného biometanu patrný na obrázku 8.

V roce 2018 bylo představeno nové schéma podpory, které bude platit pro nové bioplynové stanice postavené po roce 2020. Jde o podobnou aukční podporu, která bude pro podporu OZE zavedena i v České republice. Toto opatření bude mít nejspíš za následek pomalejší rozvoj bioplynu i biometanu, na první pohled by se tak mohlo zdát, že zákon jde proti předsevzatým klimatickým cílům. Je ale potřeba uvědomit si polohu Dánska, která umožňuje pokrytí značné části spotřeby elektřiny a energie obecně z větrné energie.



Obrázek 8: Vývoj výroby bioplynu a biometanu v Dánsku [12]

3.3. Metody upgradu bioplynu [17]

3.3.1. Fyzikální absorpce

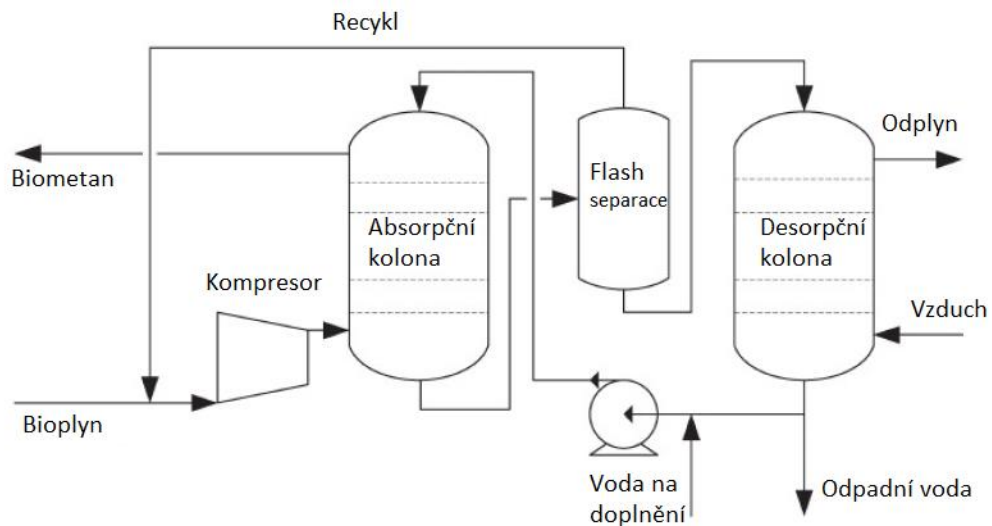
Vodní vypírka (water scrubbing)

Voda je v mnoha ohledech ideální rozpouštědlo. Je cenově i geograficky dostupná, netoxická a také je selektivní rozpouštědlo. Metoda je založená na rozdílné rozpustnosti metanu a oxidu uhličitého (25krát vyšší u CO_2 při 25°C). Teoreticky se touto metodou dá oddělit i H_2S , v praxi je ale lepší oddělit sulfan ještě před odstraněním CO_2 , z důvodu snížení koroze zařízení a nepříjemnému zápachu. K samotnému praní dochází ve válcovém reaktoru s náplní pro zajištění lepšího přenosu hmoty. Plyn je stlačen na 6 až 10 barů a vstupuje zespod, zatímco voda ze shora. Tato technologie dosahuje až 99 % čistoty metanu, v závislosti na vstupních koncentracích příměsí. Ztráty metanu jsou 3-5 %, z důvodu jeho rozpuštění ve vodě.

Voda se dá následně využít dvěma způsoby. První, nazývaná jednoduchá vypírka (single-pass scrubbing) a používá se v případech, že voda pochází z čistírny odpadních vod. Druhá metoda se nazývá regenerativní absorpce (regenerative absorption). Voda se recykluje v desorpční koloně, kde se jednoduše sníží tlak a CO_2 a H_2S se uvolní. Regenerace vody je u této metody důležitým aspektem, neboť pro upgrade $1000 \text{ Nm}^3/\text{hod}$ bioplynu je potřeba až $200 \text{ m}^3/\text{hod}$ vody.

Silná stránka této technologie je absence chemikálií v celém procesu, na druhé straně může dojít k ucpávání potrubí růstem mikroorganismů a také pění při příliš velkém množství nečistot ve vodě.

V současnosti má tato metoda 41% podíl na trhu upgradu bioplynu a její schéma následuje na obrázku 9.



Obrázek 9: Schéma technologie upgradu bioplynu vodní vypírkou [18]

Vypírka organickými rozpouštědly (organic solvent scrubbing)

Princip metody je stejný jako u vypírky vodou, ale použijí se rozpouštědla na organickém základu jako metanol a dimethylétery polyetylenglykolu. Jejich výhodou oproti vodě je výrazně vyšší rozpustnost CO_2 a také antikorozi povaha. Celý proces se liší tím, že z bioplynu je nejdříve potřeba odstranit vodu a předeřhřát rozpouštědlo na $40\text{ }^\circ\text{C}$, aby byla zajištěna co nejlepší rozpustnost CO_2 . Plyn i rozpouštědlo jsou stlačeny na 7-8 barů a vstupují do kolony zespod (bioplyn) a z vrchu (rozpouštědlo). Tímto způsobem dostaneme produkt až s 98 % obsahem metanu. Ztráty jsou podobně jako u vodní vypírky menší než 2 %.

V současnosti je na trhu několik komerčních produktů jako Genosorb, Selexol, Sepasolv apod. Jejich hlavní výhodou oproti vodě je vyšší rozpustnost CO_2 a H_2S a dá se tedy použít menší množství rozpouštědla na stejný objem zpracovávaného bioplynu, a tak dosáhnout nižších investic i provozních nákladů.

Regenerace rozpouštědla je klíčová pro zachování absorpčního výkonu. Musí se tedy buď přidávat nové, neznečištěné, nebo ho regenerovat. Regenerace je ale v tomto případě výrazně složitější než u vody, protože rozpustnost CO_2 a H_2S je značně vyšší. Zejména problematická bývá rozpustnost H_2S , proto je nutné ho při této technologii odstranit jiným způsobem před samostatným vypráním CO_2 .

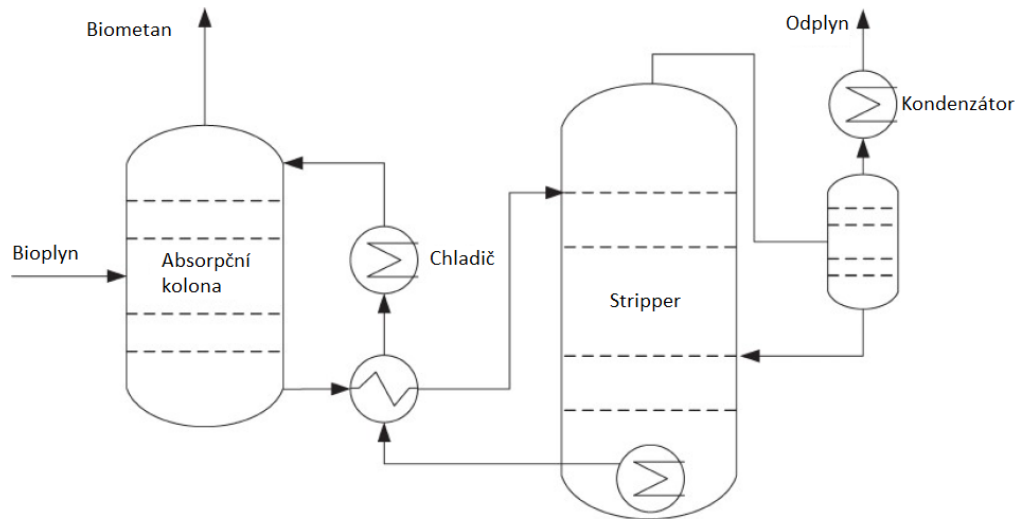
Tato metoda má zatím jen 6 % podíl na trhu.

3.3.2. Chemická absorpce

Technologie založená na chemické reakci mezi absorbentem a molekulami oxidu uhličitého. Obecně je výhodnější v případech, kdy je koncentrace CO_2 nižší. Také nedochází k žádným ztrátám metanu, protože reakce probíhá jen s molekulami CO_2 . Nejpoužívanější látkou jsou obecně aminy, které reakcí s oxidem uhličitým vytvoří uhličitany, které mohou být dále rozloženy zahřátím.

K absorpci tedy dochází při exotermní chemické reakci v reaktoru. Znečištěný absorbent je následně vyveden do desorpční jednotky, kde je při tlaku 1,5 – 3 bary a teplotě 120 – 160 °C regenerován. Schéma je nastíněno na obrázku 10. Dodané teplo narušuje chemické vazby a také vytváří páru, která se chová jako stripovací kapalina. Oba tyto procesy, absorpce i desorpce, jsou vysoce účinné. Další výhodou této technologie je možnost úplného odstranění H_2S .

Výhodou jsou nejnižší provozní náklady ze všech technologií používaných k upgradu bioplynu. To je dáno zejména nižším tlakem, který se pohybuje těsně nad atmosférickým. Odpadá tedy potřeba pohánět kompresor. Na druhou stranu je nutné použít množství tepla při desorpci z činidla, které je toxické pro životní prostředí.



Obrázek 10: Schéma technologie upgradu bioplynu chemickou absorbcí [18]

3.3.3. Adsorpce na pevném povrchu

Separace CO_2 od CH_4 se dá provést také adsorbci na pevném povrchu. Buď musí být CO_2 adsorbováno rychleji, nebo ve větším množství, což vede k selektivní separaci přiváděného bioplynu. Adsorbenty jsou typicky velmi porézní materiály s velkým specifickým povrchem. Typickými látkami tak jsou aktivní uhlí, zeolity, titanosilikáty a silicagely. Právě na druhu použitého adsorbentu záleží, co za látky bude z bioplynu odstraněno: CO_2 , H_2S , vlhkost a ostatní látky. Dobrý adsorbent by měl mít následující dvě vlastnosti. CO_2 by měl mít vyšší selektivitu než CH_4 a póry adsorbentu by měly být dostatečně veliké pro molekulu, která jimi má projít. Vodní pára ale musí být oddělena dříve, aby nedošlo k narušení adsorbentu. H_2S sice může být oddělen společně s CO_2 , ale vede ke značnému snížení životnosti adsorbentu.

Regenerace pevného materiálu je prováděna v cyklické operaci po uzavření přívodu bioplynu. Rozlišujeme tři typy regenerace: za snížení tlaku na úroveň atmosféry (PSA), za snížení tlaku k vakuu (VSA) a za zvýšení teploty ze 40 na 120 °C za konstantního tlaku (TSA). Na začátku regeneračního procesu je adsorbent stále plný bioplynu, proto je při uvolňování naadsorbovaného CO_2 ztracena i část metanu. Po nastavení nových podmínek (teploty nebo tlaku), se náplň pročistí již vyrobeným biometanem, aby došlo k úplné regeneraci adsorbentu. Nakonec je materiál přiveden zpět k pracovním podmínkám buď natlakováním bioplynem, nebo zchlazením.

Pro zajištění kontinuálního chodu linky jsou zařazeny dvě až devět kolon. Při první fázi regenerace je také přednostně uvolňován metan, který je následně hnán do další adsorpční kolony. Tím se dosáhne až 99% recyklace již adsorbovaného CH₄.

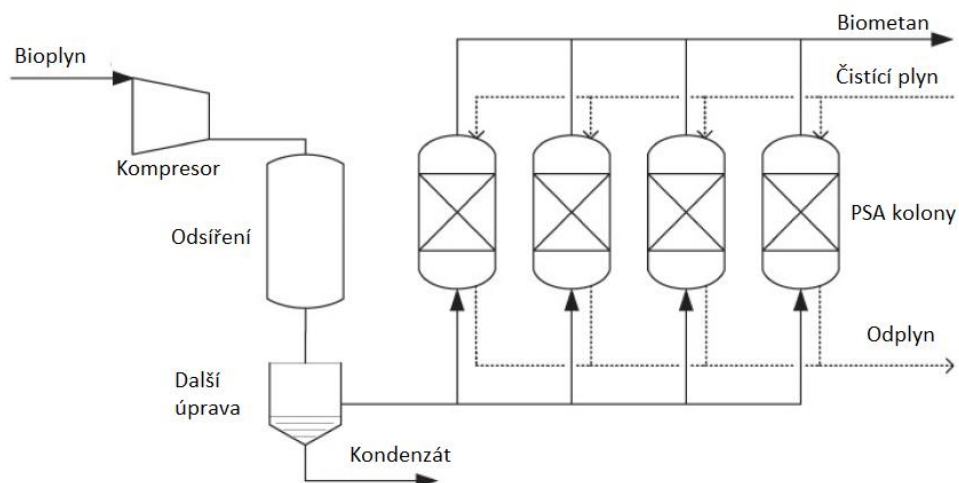
Hlavní výhoda této technologie spočívá v současném odstranění CO₂, O₂ a N₂ ze surového bioplynu a výsledné kvalitě biometanu 96 – 98%_{hm}. Hlavní nevýhodou je náchylnost na ulpívající plyny jako H₂S a NH₃, které blokují povrch adsorbentu a vedou k brzkému pronikání bioplynu dál do linky.

3.3.4. Střídání tlaků PSA

Metoda PSA (pressure swing adsorption) je založena na mechanismu selektivní adsorpci molekul na pevný povrch podle jejich velikosti. V řešeném případě je tedy výhodou, že molekuly CH₄ jsou větší než molekuly N₂, O₂ a CO₂.

Proces se odehrává ve vertikálních reaktorech, které mají několik částí: adsorpční, podtlaková, desorpční a tlaková. Výchozím předpokladem této metody je, že natlakovaný plyn má tendenci se vázat na pevný povrch. Za vysokého tlaku se tedy naadsorbuje velké množství plynu, které se za nižšího tlaku opět uvolní. V praxi se tak používá většího počtu kolon kvůli zajištění kontinuálního provozu. Poté, co je adsorbent v první koloně saturován CO₂ se bioplyn přivede na druhou kolonu, zatímco první kolona se dostane na atmosférický tlak a CO₂ se z náplně uvolní. Schéma opět následuje na obrázku 11 níže.

Nejpoužívanější adsorbenty jsou zeolity, aktivní uhlí, silica gely a umělé pryskyřice. Všechny používané materiály ale nevratně absorbují H₂S, je tedy nutné jej nejdříve odstranit a také plyn vysušit (zchladit). Kvalita metanu na výstupu je 96-98%, ztráty jsou 2-4%, v praxi se ale často jedná o vyšší číslo. Obecně se také dá říci, že čím větší kvalita biometanu je požadována, tím jsou ztráty větší. Tato metoda je výhodná zejména díky kompaktnosti technologie, nevyžaduje příliš energie pro provoz a i investiční náklady jsou nižší, zejména jde ale o poměrně nenáročný provoz.



Obrázek 11: Schéma technologie upgradu bioplynu metodou PSA [18]

3.3.5. Kryogenní separace

Díky rozdílné teplotě kondenzace se od sebe dají CH_4 , CO_2 a N_2 oddělit kondenzací a destilací. CO_2 má bod varu na -78°C a metan -160°C , takže se odseparuje při zchlazení plynu za zvýšeného tlaku. Tato technologie je stále ve stádiu vývoje, ale některé pilotní projekty jsou již v provozu. Kvůli problémům se zamrzním se musí voda, H_2S , halogeny, křemičitany a SO_2 odstranit před samotným chlazením. Toho se docílí stlačením surového bioplynu na 17 – 26 barů a až následným zchlazením na -260°C . Separace se dosáhne stlačením bioplynu na 80 barů a krokovým zchlazením až na -110°C . Čistoty produktu je dosaženo právě správným a postupným snižováním teploty.

Výhoda metody je vysoce koncentrovaný CH_4 , navíc v kapalném stavu. Také výchozí CO_2 má čistotu až 98%. Limitace u kryogenní metody je potřeba vysokých tlaků a velmi nízkých teplot, ve spojitosti s dostatečnou izolací celé technologie. Investiční i provozní náklady jsou tak značné, potřebná elektřina je $0,63 - 1,8 \text{ kWh/Nm}^3 \text{ CH}_4$, což se ukazuje jako ne příliš energeticky efektivní.

3.3.6. Membránová separace

Membránová separace je jedna z nejnovějších metod pro upgrade bioplynu a v posledních letech výrazně získává na významu. Historie membránové separace sahá do začátku devadesátých let v USA, kde se začala používat pro upgrade skládkového plynu, ačkoliv byla účinnost membrán výrazně horší než dnes. Princip spočívá v selektivní propustnosti membrány, která propustí jen vybrané složky vstupujícího bioplynu. Membrána propustí

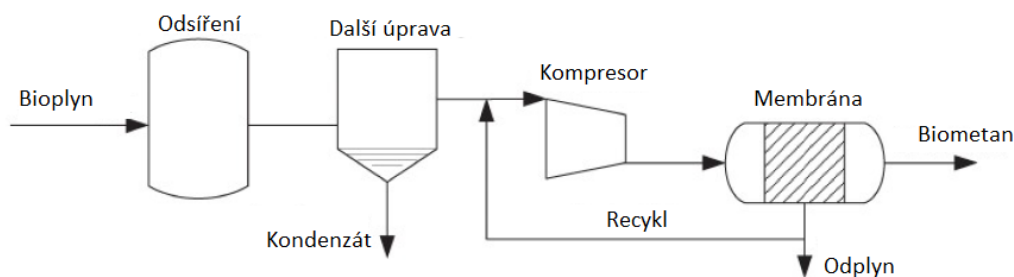
CO₂, zatímco CH₄ zůstane na straně vstupu. Zjednodušené schéma je uvedeno na obrázku 12.

Separace ale není dokonalá, takže některé molekuly CH₄ se mohou dostat skrz membránu. To znamená, že pro dosažení vysoké čistoty biometanu vznikají významnější ztráty. Kromě těchto ztrát je za další nevýhodu této technologie považován únik metanu do ovzduší, kde působí jako velmi silný skleníkový plyn.

Jako nejvhodnější membrány se ukázaly membrány z polyamidu a z acetátových vláken. Polyvinylové membrány byly také testovány, s až 98% čistotou CH₄. Membrány se dají rozdělit podle tlaku, za kterého pracují, na nízkotlaké a vysokotlaké. Vysokotlaké pracují při tlaku až 20 barů. Ve vícestupňových membránových separacích jsou odpadní plyny z prvních stupňů recyklovány, aby obohatili vstupní bioplyn. Nízkotlaké membrány pracují za tlaků blízkých atmosférickému. Bylo zjištěno, že použitím kapilárního modulu s polyamidovými membránami lze dosáhnout podobných výsledků jako u vícestupňového systému a zabránit navíc ztrátám CH₄.

Podle složek, které se separují lze proces rozdělit na suchý (separace plyn-plyn) a mokrý (separace plyn-kapalina). Polyamidové a acetátové membrány jsou schopny separovat CO₂ od CH₄ v suchém procesu. Propustnost takových membrán je závislá na sorpčních koeficientech plynů a materiálu membrány. Rozdíl mezi suchým a mokrým procesem je, že jsou využity hydrofobní vlastnosti mikroporézních membrán. Mokrý proces tak kombinuje výhody separace na membráně s absorpčními metodami. V praxi membrána separuje plyn a kapalinu. Plyn difunduje skrze membránu a je rozpouštěn v rozpouštědle, které proudí opačným směrem.

Po značném vývoji a výzkumu dosahuje tato technologie kvality větší než 99% CH₄. Obecně se tento proces považuje za bezpečný, dobře škálovatelný, jednoduchý na provoz a údržbu a nevyžadující žádné nebezpečné chemikálie. Na druhou stranu jsou membrány poměrně drahé a křehké, s životností 5 až 10 let. V poslední době se ale i tak jedná o velmi konkurenceschopnou technologii.



Obrázek 12: Schéma technologie upgradu bioplynu membránovou separací [18]

3.3.7. Chemická hydrogenace

Základní mechanismus tohoto separačního procesu je selektivní oddělení založené na oddělení látek v kapalném a plynném skupenství. Redukce CO_2 s H_2 může být dosaženo chemicky pomocí Sabatierovy reakce. Kvůli chemické hydrogenaci je potřeba použít katalyzátor, typicky s niklem. Skupenství hydrátu je stabilní za vysokého tlaku a nízké teploty a stává se aktivní naopak za teplot kolem 300°C a tlaku mezi 5 a 20 MPa. Plynný hydrát pak může být použit pro odstranění CO_2 . S tím se ale odstraní i část CH_4 . I proto je tato technologie zatím nepoužitelná, navíc jsou zde požadavky na extrémní tlaky a tím i na pořizovací a provozní náklady.

3.3.8. Biologické metody [19]

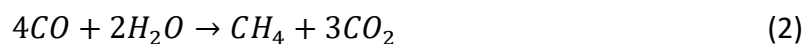
Základem pro většinu v současnosti zkoumaných biotechnologií je přenos CO_2 z bioplynu do mikrobiální nebo enzymatické suspenze. Všechny tyto metody jsou zatím v provozu pouze v laboratorním měřítku nebo pilotním provozu.

Chemoautotropický upgrade

Tato technologie je založena na schopnosti hydrogenotrofních methanogenů (některé archebakterie) používat CO_2 jako zdroj uhlíku a volného elektronu v reakci:

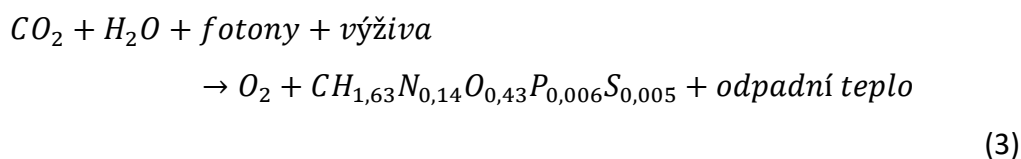


Tato biokonverze CO_2 na CH_4 využívající externí zdroj vodíku se již používá jak pro čištění bioplynu na biometan, tak ve snižování emisí CO_2 v elektronickém průmyslu, kde se využívá na místě vyrobeného vodíku z elektrochemického čištění odpadních vod obsahujících kyselinu fluorovodíkovou. I syntézní plyn ze zplyněného uhlí nebo biomasy obsahující CO , H_2 a CO_2 může být upraven na metan. Opět se využívá schopnosti některých bakterií přetvořit CO na CH_4 a CO_2 :



Fotosyntetický upgrade

Další metoda založena na schopnosti bakterií, konkrétně eukaryotické mikroalgaie a prokaryotické cyanobakterie, vytáhnout oxid uhličitý z bioplynu a uložit ho do svého živného roztoku za pomoci elektronů uvolněných při fotolýze vody. Jde o redukční reakci: kyslíkovou fotosyntézu:



Další metody

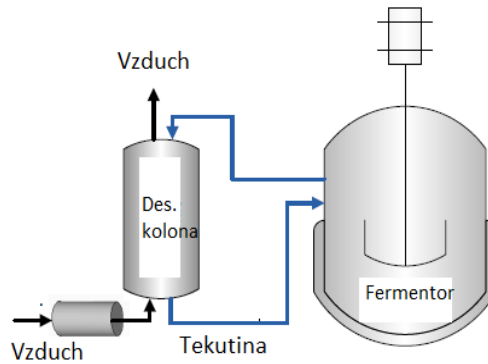
Základní studie použití znehyněných uhlíkových anhydráz, tedy enzymu, který katalyzuje reakce přeměny mezi oxidem uhličitým, vodou a ionty kyseliny uhličitě, což jsou reakce, které probíhají v krvi a v plicích:



Tato technologie byla již patentována a prezentována jako řešení pro čištění spalin. Bohužel naráží na ne příliš dlouhou životnost enzymu a tím i na vysoké provozní náklady.

Odstraňování CO₂ desorpcí in situ

Desorpce *in situ* je založena na vyšší rozpustnosti CO₂ ve vodě v porovnání s CH₄. Tato filosofie již byla aplikována na návrh nového anaerobního fermentoru, který se skládá z externí desorpční jednotky, která je propojena s fermentorem. Tekutina je proháněna protiproudou desorpční jednotkou a metan, sulfan a oxid uhlíčitý jsou tak stripovány z cirkulující tekutiny, což má za následek snížení podílu H₂S a CO₂ ve výsledném plynu.



Obrázek 13: Schéma technologie upgradu bioplynu desorpcí in situ [19]

4. Návrh a bilance upgradu

Jedním z praktických cílů této práce je vytvořit zjednodušené schéma a bilanci pro dvě porovnávané technologie upgradu bioplynu na biometan: chemickou absorpci aminovou vypírkou a membránovou separací. Jedná se tedy o situaci, kdy stávající bioplynová stanice zvažuje navýšení produkce bioplynu (dostavbou dofermentorů v souvislosti např. s plánovaným rozšířením živočišné výroby), ale z důvodů popsaných dále se nevyplatí obvyklé spalování vyprodukovaného bioplynu v kogenerační jednotce, nebo je její další instalace legislativně obtížná.

4.1. Bioplyn

Práce se věnuje dvěma zvoleným metodám upgradu (odseparování CO_2) bioplynu ze zemědělské bioplynové stanice. Vstupní suroviny jsou zejména hnůj od skotu, tráva na siláž a v menším množství silážovaná kukuřice. Právě vstupní suroviny do fermentoru ovlivňují složení bioplynu, nejde ale o jediný faktor. Dalšími jsou obsah vody v substrátu, fermentační teplota, doba zdržení a stáří substrátů [20].

Podrobnější složení bioplynu záleží na složení vsázky a podmínkách fermentace, zhruba lze ale vyjít z údajů uvedených v následující tabulce 2:

Složka	Podíl [%vol]
CH ₄	45 – 75
CO ₂	25 – 48
H ₂	0 – 3
H ₂ S	0,1 – 1
N	1 – 3
H ₂ O	0 – 5
NH ₃	Stopy

Tabulka 2: Obecné složení bioplynu [21]

Vidíme, že složení se uvádí v širokém intervalu. Pro další specifikaci byly použity materiály poskytnuté vedoucím této práce.

BPS 1	
Hněj od skotu	60 %
Travní siláž	40 %
Podíl metanu v bioplynu	53 %
BPS 2	
Hněj od skotu	42 %
Kukuřičná siláž	25 %
Travní siláž	19 %
GPS (siláž z celých rostlin)	14 %
Podíl metanu v bioplynu	53 %

Tabulka 3: Složení vsádek a výsledný podíl metanu v bioplynu

Výsledkem je, že pro obvykle používané suroviny lze uvažovat 53% podíl metanu v bioplynu na výstupu (tabulka 3).

4.2. Předpoklady

U obou dále rozpracovaných metod čištění bioplynu byla zanedbána separace H₂S. Většina bioplynových stanic totiž takovou technologií již disponuje, neboť sulfan škodí i kogeneračním jednotkám a ostatnímu zařízení, které se ve stávajících aplikacích hojně využívají. Pro další návrhy tedy předpokládáme, že stávající BPS již disponuje technologií pro separaci H₂S v dostatečné kapacitě.

Dále bylo počítáno se vstupními parametry, které jsou shrnuty v následující tabulce 4:

Uvažované složení odsířeného bioplynu z BPS	
CH ₄	53 % _{hm}
CO ₂	45 % _{hm}
N ₂	0,5 % _{hm}
H ₂	0,5 % _{hm}
H ₂ O	1 % _{hm}
Ostatní parametry	
Teplota	35°C
Tlak	1,2 bar

Tabulka 4: Uvažované složení bioplynu na vstupu do linky

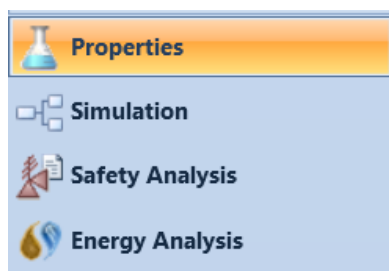
4.3. Aminová vypírka

Jako první metoda odstraňování CO₂ z bioplynu byla použita aminová vypírka, která spadá do kategorie chemické absorpce.

Pro bilanci linky byl použit program Aspen Plus V10. Jedná se o simulační software používaný pro široké spektrum aplikací v inženýrské chemii. Tento komplexní nástroj dává vybrat z nepřeberného množství chemických rovnic, reakcí a numerických nastavení výpočtů. To ale také znamená nutnost veškeré náležitosti správně nastavit. Při práci v programu bylo využito výukových videí kolegů z Univerzity v Miláně [22], publikace *CO₂ Capture by Reactive Absorption-Stripping* [23], práci kolegy Ing. Stanislava Viktorý [24] z minulého roku a cenné rady a základní schéma poskytl Ing. Jiří Trejbal, Ph.D. z VŠCHT.

4.3.1. Nastavení simulace

Hlavní strom se dělí na *Properties*, *Simulation*, *Safety Analysis* a *Energy Analysis*, ale běžně jsou potřeba jen první dvě části (viz obrázek 14). Nastavení bylo z velké části ponecháno stejné jako v jedné z přednastavených šablon dostupných v instalačních souborech programu, konkrétně v té s názvem *ENRTL-RK_Rate_Based_MEA_Model*. Model je primárně určen pro čištění spalin (největší rozdíl je zde v obsahu CO₂, který je výrazně nižší a stačí tak menší průtok aminového roztoku).



Obrázek 14: Základní dělení nastavení programu Aspen Plus

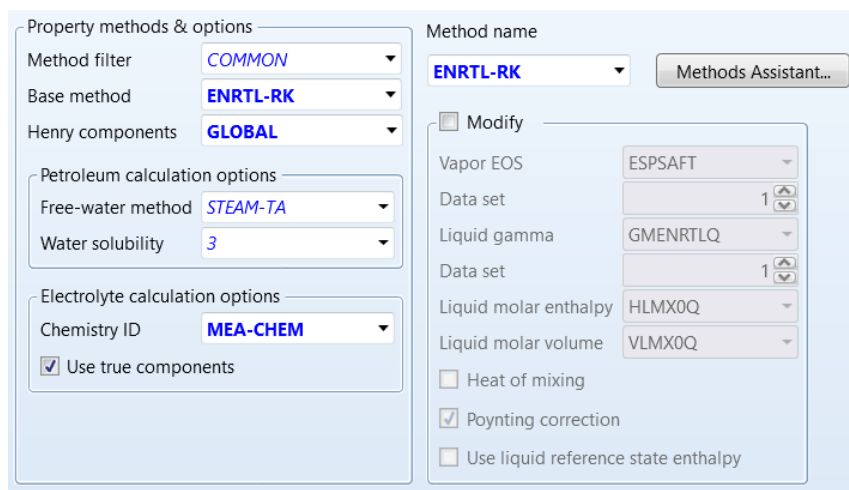
Vlastnosti látek – Properties

Properties, tedy vlastnosti, nastavují základní parametry, podle kterých budou děje v simulaci linky probíhat. Jako první se přirozeně vybírají chemické látky. V tomto případě bylo využito seznamu látek (obrázek 15) přednastaveného pro aminovou vypírku.

Component ID	Type	Component name	Alias
MEA	Conventional	MONOETHANOLAMINE	C2H7NO
H2O	Conventional	WATER	H2O
CO2	Conventional	CARBON-DIOXIDE	CO2
H2S	Conventional	HYDROGEN-SULFIDE	H2S
H3O+	Conventional	H3O+	H3O+
OH-	Conventional	OH-	OH-
HCO3-	Conventional	HCO3-	HCO3-
CO3-2	Conventional	CO3--	CO3-2
HS-	Conventional	HS-	HS-
S-2	Conventional	S--	S-2
MEA ⁺	Conventional	MEA+	C2H8NO+
MEACOO-	Conventional	MEACOO-	C3H6NO3-
N2	Conventional	NITROGEN	N2
O2	Conventional	OXYGEN	O2
CO	Conventional	CARBON-MONOXIDE	CO
H2	Conventional	HYDROGEN	H2
CH4	Conventional	METHANE	CH4
ETHYL-01	Conventional	ETHYL-MERCAPTAN	C2H6S-1
N-HEX-01	Conventional	N-HEXANE	C6H14-1

Obrázek 15: Seznam použitých sloučenin pro uvedenou simulaci

Následuje volba metody pro výpočet termofyzikálních vlastností. Opět byla ponechána přednastavená metoda označena jako ENTRL-RK (*Unsymmetric Electrolyte NRTL-Redlich-Kwong*) s metodou PC-SAFT (*Statistical Associating Fluid Theory*) pro výpočet stavových vlastností páry. Metody mají přednastavené elektrolytické páry a všechny další náležitosti.



Obrázek 16: Nastavení výpočtových metod pro simulaci

Dalším bodem je zadání příslušných reakcí. Zde byly z nastaveného balíčku reakcí MEA-CHEM vymazány ty, které obsahovaly sloučeniny síry (jelikož je na vstupu uvažován již odsířený bioplyn).

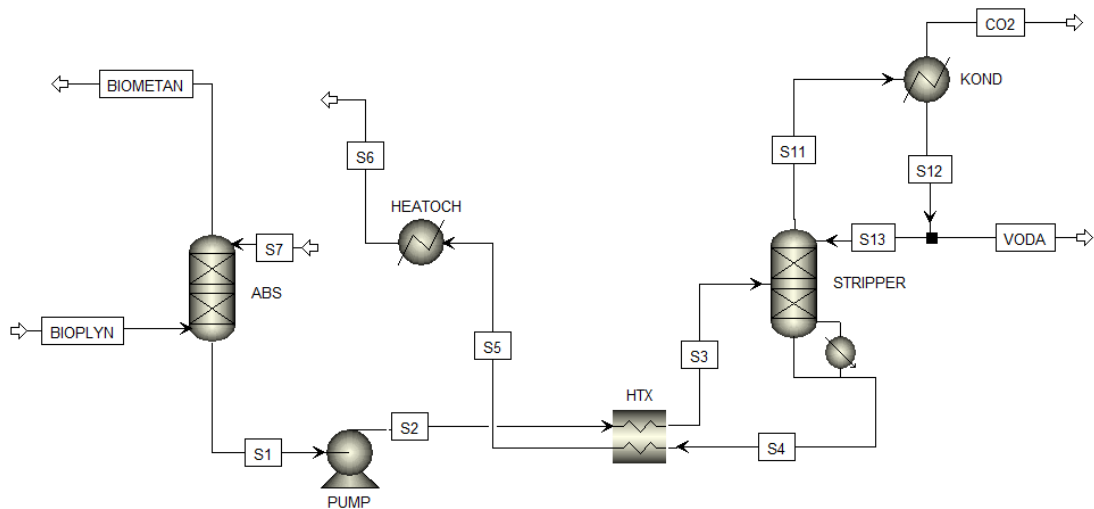
	Reaction	Type	Stoichiometry
>	1	Equilibrium	2,0 H ₂ O <--> H ₃ O ⁺ + OH ⁻
>	2	Equilibrium	CO ₂ + 2,0 H ₂ O <--> HCO ₃ ⁻ + H ₃ O ⁺
>	3	Equilibrium	HCO ₃ ⁻ + H ₂ O <--> CO ₃ ²⁻ + H ₃ O ⁺
>	4	Equilibrium	MEAH ⁺ + H ₂ O <--> MEA + H ₃ O ⁺
>	5	Equilibrium	MEACOO ⁻ + H ₂ O <--> MEA + HCO ₃ ⁻

Obrázek 17: Seznam použitých chemických rovnic

Následuje záložka *Property sets*, kde se nastavují vlastnosti určitých složek a proudů pro jejich zobrazení po doběhnutí výpočtu, například molární koncentrace složky v mixu, tepelná kapacita složky, tepelná kapacita směsi za stálého tlaku a podobně.

V záložce *Estimation* se uživatel musí rozhodnout, co má program udělat, pokud během výpočtu narazí na nezadanou veličinu nebo nějaký jiný vstup. Možnost je nechat program odhadnout vše, nic, nebo jen něco. V tomto případě bylo nastaveno, že si program může odhadnout vše, co bude třeba. Tím bylo nastaveno vše potřebné v první části, která se týká obecných chemicko-fyzikálních parametrů.

Vlastní simulace – Simulation



Obrázek 18: Schéma simulované linky

V prostředí simulace je nejprve nutné vytvořit z bloků PFD schéma, konkrétní je uvedeno na obrázku 18, a poté je možné začít nastavovat jejich vlastnosti. Logicky je nastavení kolony složitější a zdlouhavější než nastavení tepelného výměníku nebo čerpadla. Vlastní čištění vstupujícího bioplynu se děje v první, absorpční, koloně. Zde se molekula MEA spojuje s CO_2 a vytváří iont MEACOO^- . Zbytek linky se již věnuje recyklaci tohoto obohaceného absorpčního roztoku. Tato technologie je vhodná i pro absorpci H_2S , to zde ale není uvažováno, protože, jak již bylo zmíněno, většina existujících bioplynových stanic již má odsiřovací technologii nainstalovanou.

Cyklus je rozpojen mezi proudy S7 a S6. Je to z důvodu lepší a rychlejší konvergence simulace. Pokud jsou si proudy po úspěšném dopočítání dostatečně podobné co do průtoku a složení, je možné je zkusit spojit do jednoho a následně nechat program počítat celou smyčku. Zpravidla se ale ani toto nepovede na první pokus a je potřeba dalšího ladění. Určitě je tak lepší začít s rozpojeným schématem.

Jako první tedy již odsiřený bioplyn vstoupí zespodu do absorpční kolony (ve schématu označeno jako ABS), do které zároveň z vrchu vstupuje aminový roztok. Dochází zde tak k přestupu hmoty (CO_2) z plynné do tekuté fáze. Specifikaci absorpční kolony shrnuje tabulka 5.

Absorpční kolona ABS	
Výpočtová metoda	Rate-based
Počet pater	20
Kondenzátor/reboiler	Ne/ne
Počet vstupujících proudů	2 (bioplyn a aminy)
Počet vystupujících proudů	2 (biometan a obohacené aminy)
Tlak na horním patře kolony	1,1 bar
Tlaková ztráta	0,01 bar
Náplň	Flexipack 250Y; výška 6 m; šířka 2,7m
Nastavení výpočtu „Rate-based“	Model toku: mixed Metoda výpočtu koef. přestupu hmoty: Brf-85 Metoda výpočtu koef. přestupu tepla: Chilton and Colburn

Tabulka 5: Nastavení absorpční kolony

Produkt, v našem případě biometan, poté vystupuje z prvního (nejvyššího) patra kolony. Obohacený aminový roztok naopak ze spodu kolony a přes čerpadlo (*PUMP*) do víceproudého výměníku tepla (*HTX*). Aspen Plus nabízí více druhů výměníku, konkrétně tento typ umožňuje připojit větší množství proudů. V tabulkách 6 a 7 jsou uvedeny nastavené parametry.

Čerpadlo PUMP	
Tlak na výstupu	5 bar

Tabulka 6: Nastavení čerpadla

Výměník tepla HTX	
Výstupní teplota teplého proudu	65 °C

Tabulka 7: Nastavení víceproudého výměníku tepla

Ohřátý proud s obohaceným absorpčním roztokem pak vstupuje do stripperu, kde se zregeneruje. Blok je totožný s absorpční kolonou, jen je přidán reboiler. Z kolony tak vystupuje zrecyklovaný, nyní již ochuzený, absorpční roztok. Dále po kondenzaci par odchází oxid uhličitý a zkondenzovaná vodní pára se vrací jako reflux do kolony, jejíž nastavení následuje v tabulce 8.

Regenerační kolona <i>STRIPPER</i>	
Výpočtová metoda	Rate-based
Počet pater	21
Kondenzátor/reboiler	Ne/vařák
Počet vstupujících proudů	2 (obohacené aminy a reflux)
Počet vystupujících proudů	2 (páry a zregenerovaný roztok)
Tlak na horním patře kolony	4 bar
Tlaková ztráta	0,02 bar
Náplň	Flexipack 250Y; výška 2 m; šířka 1,4 m
Nastavení výpočtu „Rate-based“	Model toku: mixed Metoda výpočtu koef. přestupu hmoty: Brf-85 Metoda výpočtu koef. přestupu tepla: Chilton and Colburn

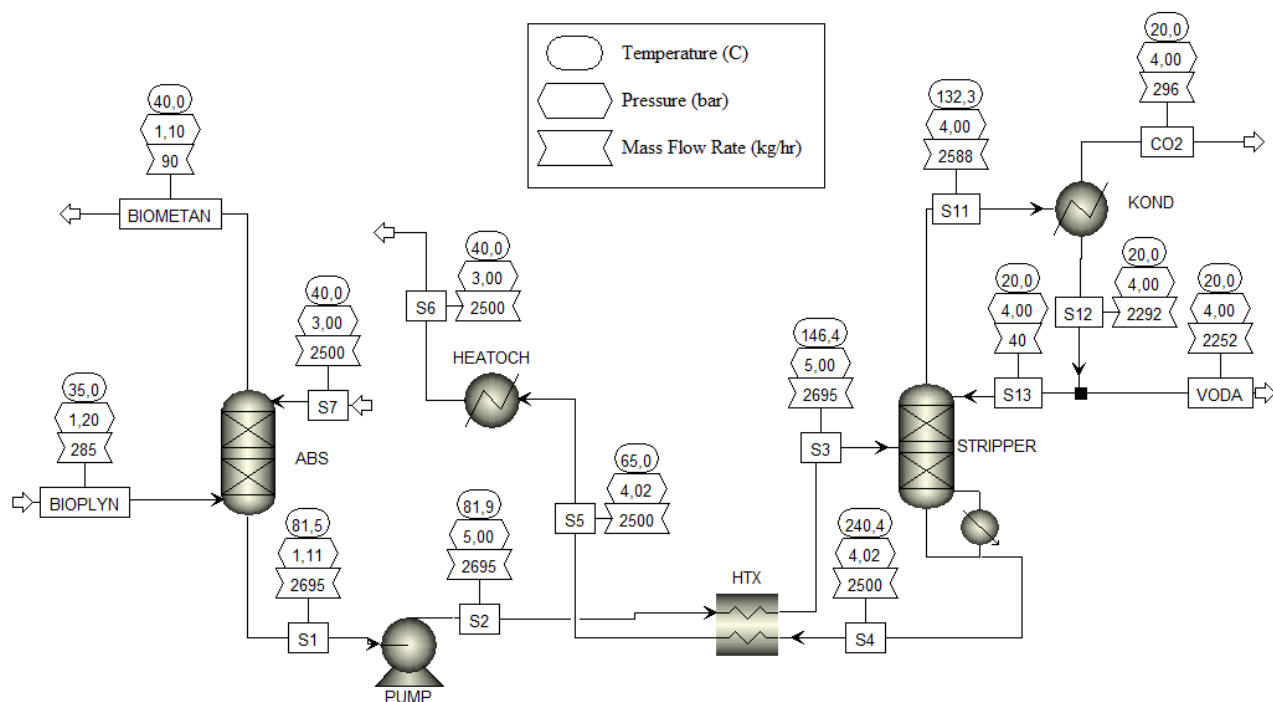
Tabulka 8: Nastavení stripperu

Zregenerovaný aminový roztok pak přes již zmíněný rekuperační výměník vstupuje do dalšího výměníku, který jej dále ochladí.

Výměník <i>HEATOCH</i>	
Výstupní teplota	40°C
Výstupní tlak	3 bar

Tabulka 9: Nastavení výměníku

4.3.2. Výsledky simulace



Obrázek 19: Schéma s výsledky po dokončení výpočtu

Ze zobrazených průtoků na obrázku 19 můžeme okamžitě vidět nejen množství biometanu na výstupu, ale bohužel také ne zcela odpovídající hmotovou bilanci v pravé, desorpční, části. Nejdříve tedy okomentuji pro nás zajímavý produkt – biometan, jehož složení následuje v tabulce 10.

Složení vstupu (bioplynu) a výstupu (biometanu)		
Složka	Bioplyn [%mol]	Biometan [%mol]
MEA	0	$6,08 \times 10^{-3}$
H ₂ O	1	5,9
CO ₂	45	$1,3 \times 10^{-4}$
N ₂	0,5	0,8
H ₂	0,5	0,8
CH ₄	53	92,3

Tabulka 10: Porovnání molárního složení bioplynu a biometanu

Výstupní složení by bylo v pořádku, nebýt příliš vysokého podílu vody. V technické praxi by řešením bylo plyn sušit, což se ostatně často i děje. Možným vysvětlením problému je „strhávání“ části absorpčního roztoku proudem plynu, čemuž by odpovídalo i stopové

množství MEA ve výstupním plynu. Hmotnost vody ve výstupu je asi trojnásobná oproti vstupu, je tak potřeba zaměřit pozornost i na hmotnostní průtoky, uvedené v tabulce 11.

Složení vstupu (bioplynu) a výstupu (biometanu)		
Složka	Bioplyn [kg/hod.]	Biometan [kg/hod.]
MEA	0	0,021
H ₂ O	1,79	6,1
CO ₂	197,1	0,00032
N ₂	1,4	1,4
H ₂	0,1	0,1
CH ₄	84,62	84,56

Tabulka 11: Porovnání hmotnostních průtoků bioplynu a biometanu

Pro pořádek tedy můžeme v tabulce 12 uvést dva základní parametry pro porovnávání účinnosti upgradu bioplynu: výslednou čistotu a takzvanou *recovery*, tedy zůstatek metanu ve výstupním plynu po odseparování CO₂.

Parametry aminové vypírky použité pro upgrade bioplynu	
Výsledná čistota metanu	92,4 % _{mol}
Zůstatek původního metanu	99,93 % _{mol}

Tabulka 12: Výsledné parametry uvažované aminové vypírky

Kromě vyššího podílu vody, který lze snadno snížit například snížením teploty plynu pod rosný bod, tak lze výsledky označit za velmi dobré a odpovídající obecně uváděním výsledkům pro tento typ technologie [25] [26].

Pro dosažení těchto výsledků je podle simulace potřeba 2500 kg/hod. absorpčního roztoku o složení:

Složení absorpčního roztoku	
Složka	[% _{mol}]
MEA	10,5
H ₂ O	88,9
MEAH ⁺	0,3
MEACOO ⁻	0,3

Tabulka 13: Složení absorpčního roztoku

Tohoto výsledku bylo dosaženo postupným navyšováním průtoku podle toho, jak byl navyšován průtok bioplynu. To po čase vedlo k zahlcení absorpční kolony, bylo tedy potřeba zvětšit její průměr. Samozřejmě je nutné kontrolovat veškerá upozornění a chyby, které program při výpočtu zobrazuje. Zásadní chyby ale většinou vznikají kumulací menších, které se nijak nepropisují do výsledků. Zároveň se, stejně jako v jiných numerických programech, nedá jednoduše vrátit k předchozímu nastavení a výslednému řešení. Kombinace těchto dvou věcí tedy v určitém momentu způsobila „rozhození“ desorpční kolony.

Nastavení reboileru vyřeší problém s nízkým průtokem roztoku zpět do absorbéru, vybalancovat kolonu ale nedokáže. Největším problémem je totiž vysoký průtok kondenzátu odcházející pryč z linky. Ani po desítkách změn v nastavení kolony bohužel nebylo dosaženo optimálního stavu v recyklaci aminů.

4.4. Membránová separace

Pro bilancování separace CO₂ z bioplynu pomocí membrán byl použit program MS Excel. Jako první se samozřejmě nabízel opět software Aspen Plus, ten bohužel membránu jako takovou v základu nezná. Existují akademické práce [27] [28] [29], které se touto problematikou zabývají, využívají ale vlastních naprogramovaných bloků v prostředí ACM (*Aspen Custom Modeller*). Další variantou bylo využít komerčního CapeOpen softwaru, například MEMSIC [30] nebo MemCal [31], ty ale nenabízejí akademickou licenci a podle autorovi poskytnutých informací se cena ročních licencí pohybuje v jednotkách tisíc eur.

Schéma procesu

Jednotlivá PFD schéma membránových separací se liší zejména tím, kolik membrán obsahují. Zpravidla jde o dvě nebo tři, možná je samozřejmě i jedna membrána, nebo naopak čtyři. Jejich počet ale ovlivňuje nejenom čistotu výsledného biometanu, ale také ztráty CH₄ v lince. Dále je samozřejmě potřeba brát v úvahu pořizovací a provozní náklady – složitější schéma bude jednak vyžadovat vyšší investici, dále může mít také vyšší tlakovou ztrátu, kterou je třeba dorovnávat. Jeho výhodou ale bude vyšší čistota produkovaného metanu a menší ztráty díky refluxům.

Druhy membrán

Komerčně se v současnosti využívají dva druhy membrán: acetát-celulózové a polyamidové. Obecně se v průmyslovém měřítku vždy používaly polymerní materiály, nyní vede právě acetát celulóza [32]. Přehled zkoumaných materiálů obsahuje tabulka 14.

Pro orientaci v problematice membrán je nejprve potřeba definovat několik pojmů:

Permeabilita (P) – (propustnost) schopnost membrány propouštět procházející plyn. Závisí na tlakovém spádu, průtoku, tloušťce membrány a její ploše. Jednotkou je

$$\text{Barrer: } 1 \text{ Barrer} = 10^{-10} * \frac{\text{cm}^3(\text{STP})\text{cm}}{\text{cm}^2\text{s cmHg}}$$

Selektivita (α) – vyjadřuje poměr permeabilit daných plynů. Dá se tedy dopočítat jako poměr permeabilit pro čisté plyny.

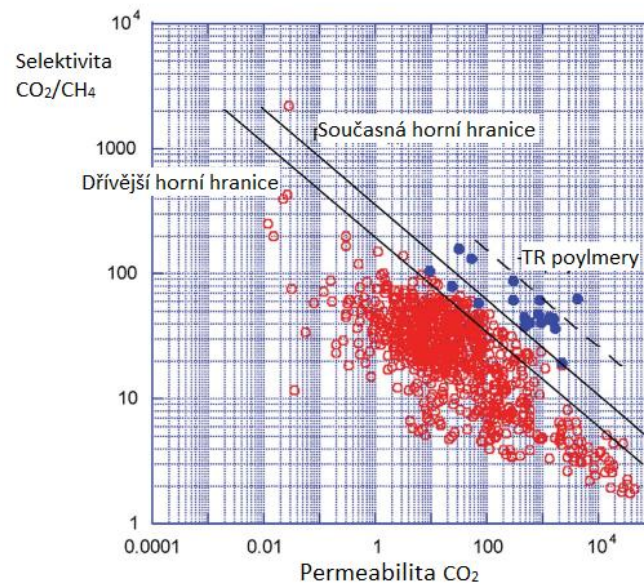
Plasticizace – jev, kdy membrána pod vlivem tlaku začne propouštět všechny složky vstupní směsi (mění se tak selektivita). Vliv má i složení plynu, například právě s rostoucím podílem CO₂ se plasticizace zvětšuje.

Materiál	Permeabilita CO ₂ [cm ³ cm/cm ² cmHg]	Selektivita za id. podmínek (CO ₂ /CH ₄)
PDMS (polydimetylsiloxan)	2700	3,4
PMP (polymethylpenten)	84,6	5,8
PPO (polyfenyloxid)	75,8	6,9
EC (etyl celulóza)	26,5	1,4
PI (polyamid)	10,7	42,8
PSf (polysulfon)	5,6	22,4
CA (acetát celulóza)	6,3	30,0
PC (polykarbonát)	4,2	32,5

Tabulka 14: Přehled vlastností vybraných membrán [32]

Vývoj materiálů pro membrány určené k separaci složek z bioplynu je nejlépe ilustrován na Robesonově křivce (obrázek 20), jejíž první verze byla publikována Lloyd M. Robesonem v roce 1991 [33] a aktualizovaná pak v roce 2008 [34]. Ukazuje závislost mezi selektivitou

CO₂/CH₄ a permeabilitou CO₂ a naměřenými hodnotami pro různé materiály prokládá horní mez optimálního poměru vlastností.



Obrázek 20: Robesonova křivka [35]

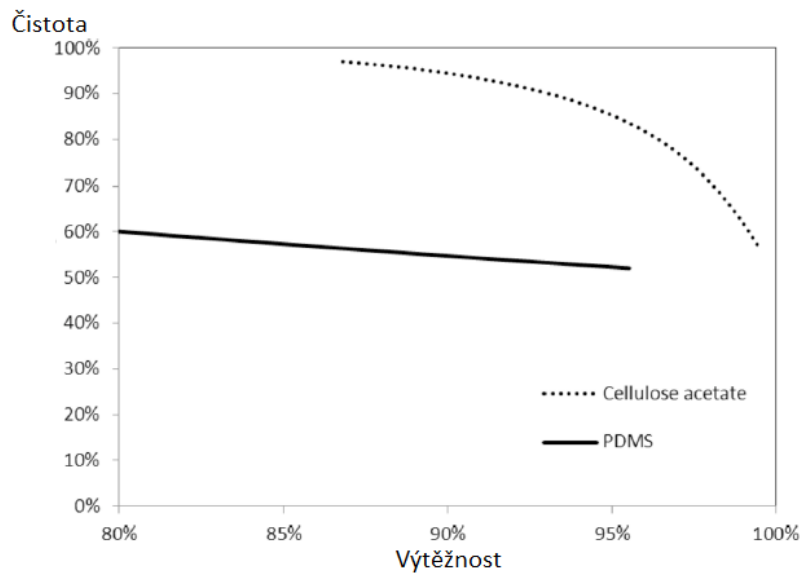
Graf (obrázek 20) zobrazuje obě křivky znázorňující nejlépe pracující membrány a navíc materiály z teplotně rearanžovaných polymerů, které se pohybují nad křivkou z roku 2008. Obecně jsou takovými materiály ještě uhlíkové molekulární síta (*Carbon Molecular Sieve, CMS*).

4.4.1. Uvažovaná membrána

Pro nastavení výpočtu bylo potřeba zjistit konkrétní výstupní poměry bioplynu z membrány. Zde různé studie uvažují různá schémata a různé typy membrán, protože pro některé membrány stačí méně stupňů. Dalším hlediskem je zapojení recyklů, které sice pomáhají výtěžnosti (zmenšují ztráty metanu), ale přidávají na složitosti (zvýšené investiční náklady) a většinou vedou k nutnosti použití dalšího nebo dalších kompresorů (zvýšené provozní náklady).

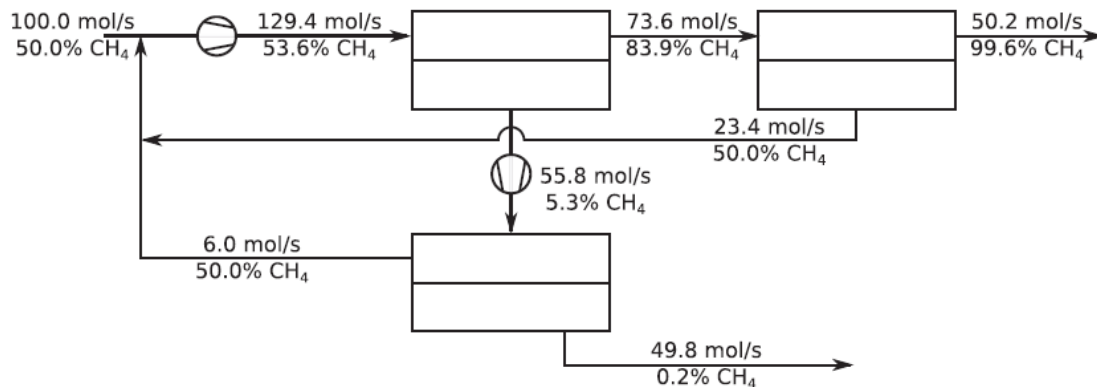
Pro bilanci byla nakonec zvolena polymerní celulósovou membrána ve spirálovém modulu a konkrétní údaje o ní použity z hojně citované studie *Gas permeation applied to biogas upgrading using cellulose acetate and polydimethylsiloxane membranes* [32]. V ní se například ukazuje, že kvůli plasticizaci má celulósová membrána při provozním tlaku několika bar o 12 až 15 bodů menší selektivitu než normálně. Dále se i podle ostatních studií [36] [37]

ukazuje, že vztah mezi čistotou výsledného biometanu a jeho výtěžnosti je výrazně lepší, než například PDMS membrány, jak ilustruje následující obrázek 21.



Obrázek 21: Vztah čistoty a výtěžnosti pro CA a PDMS membránu [32]

Konkrétně práce vychází z výsledků zobrazených na následujícím třístupňovém schématu (obrázek 22) dosažených při tlaku 16 bar a teplotě 25°C:



Obrázek 22: Schéma a průtoky třístupňového zapojení s recyklem; celulózová membrána [32]

Celkové srovnání jednostupňové a vícestupňové technologie je k dispozici v přehledové tabulce 15:

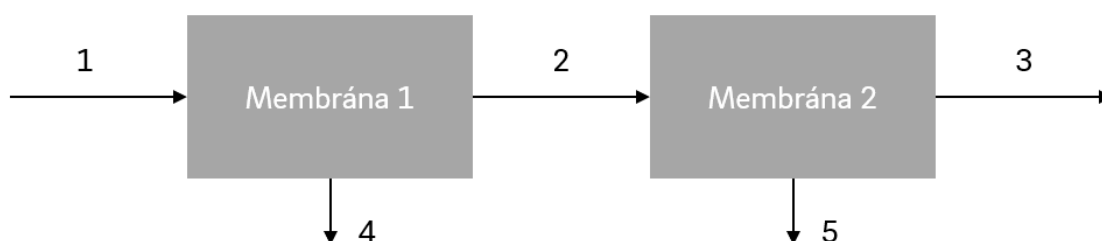
Membrána	Konfigurace	Čistota metanu [%]	Výtěžnost [%]	Průtok [mol/s]	Plocha membrány [m ²]
Acetát celulóza	Jednostupňová	97,0	86,8	100	13
Acetát celulóza	Třístupňová	99,6	99,8	100	29

Tabulka 15: Porovnání výsledků jednostupňové a třístupňové separace [32]

Průtok zde odpovídá laboratorním podmínkám experimentu, je tedy nutné se vypořádat s navýšením plochy membrán na úroveň potřebnou pro průmyslovou aplikaci.

4.4.2. Bilance

K vytvoření bilance je potřeba základní definice toho, co bude bilancováno a jaké blokové schéma je k dispozici. Jako schéma byla zvolena dvoustupňová separace s nezapojeným recyklem, aby bylo možné sledovat, jak se změní ztráty metanu, pokud je linka o něco zjednodušena. Účinnost separace je totiž bezpodmínečně nutné znát pro tvorbu bilance, je tedy poněkud bezpředmětné zapojovat další stupně membrány, protože již se třemi je bezpečně dosaženo limitů daných pro veškeré aplikace nahrazující zemní plyn biometanem.



Obrázek 23: Schéma bilancované membránové separace

Na schématu na obrázku 23 jsou očíslovány proudy a aparáty, což je další krok k řešení bilance. Následují seznamy proudů, aparátů a složek v tabulkách 16, 17 a 18.

Seznam proudů	
1	Vstup bioplynu
2	Retentát 1
3	Retentát 2 - biometan
4	Permeát 1
5	Permeát 2

Tabulka 16: Seznam proudů ze schématu

Seznam aparátů	
1	1. Membrána
2	2. Membrána

Tabulka 17: Seznam aparátů ze schématu

Seznam složek	
1	Metan
2	Oxid uhličitý

Tabulka 18: Seznam složek ze schématu

Další na řadě je takzvaná incidenční matice (tabulka 19), která říká, jaké proudy vstupují a vystupují z jednotlivých aparátů. Tu je potřeba vyplnit manuálně podle blokového schématu. Plus jedna značí vstup, minus jedna výstup.

Aparát	Proud				
	1	2	3	4	5
1	1	-1	0	-1	0
2	0	1	-1	0	-1

Tabulka 19: Incidenční matice

Obdobnou funkci má tabulka dat (tabulka 20), která značí, jaká složka je přítomna v kterém proudě. Opět je potřeba vyplnit ručně. Zde je logika standardně 0 (není přítomna) a 1 (je přítomna).

Složka	Proud				
	1	2	3	4	5
1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1

Tabulka 20: Tabulka dat

Tímto došlo k jakémusi překladu z grafické podoby schématu do jazyka počítače. Nyní se již obejdeme s maticovými operacemi programu. Další na řadě je totiž určení počtu neznámých parametrů bilance. To se provede přes funkci *SOUČIN.SKALÁRNÍ* tabulky dat. V tomto případě vyšlo 10 neznámých.

Pro vyjádření počtu již sestavitelných bilančních rovnic pro určení neznámých nejprve vytvoříme další matici maticovým součinem tabulky dat s transponovanou incidenční maticí v absolutní hodnotě (nyní metodu přímo nezajímá, který proud vstupuje a který vystupuje). Dále stačí jen sečíst nenulové složky.

		Aparát	
Složka		1	2
1		3	3
2		3	3

Tabulka 21: Počet bilančních rovnic

n_bil.rce 4

Porovnáním počtu neznámých s právě obdrženým počtem bilančních rovnic zjistíme počet rovnic, nebo spíše definic, které musíme dodat, aby byla bilance řešitelná. V našem případě se jedná o 6 vztahů. Doplnkové vztahy jsou typicky: referenční proud, koncentrace složek v proudech, poměr složek v různých proudech a pak definice chemických reakcí, například konverze. V tomto případě jde o první dva typy. Vztahy jsou uvedeny v tabulce 22.

	Proud	Složka	Hodnota
Ref. proud	1	1	118,1176

	Proud	Složka	Koncentrace
Koncentrace	1	1	0,53
	2	1	0,96
	4	2	0,96
	5	2	0,98
	3	1	0,99

Tabulka 22: Doplnkové vztahy

Poměry složek počítají s určitou účinností membrány při daném tlaku. Zde bylo nutné spolehnout se na data z již naměřených studií, které jsou zmíněny výše.

Poslední fází je sestavení matice koeficientů a vektor pravých stran. Matice má dvě části: automaticky vyplňující se „horní“ polovinu a tu „dolní“, do které jsou ručně doplněny uvedené dodatečné vztahy. V tomto případě tedy průtok složky v proudu, obecně:

$$V_{i,j} = C \quad (5)$$

A koncentrace složky v proudu vyjádřený z rovnice:

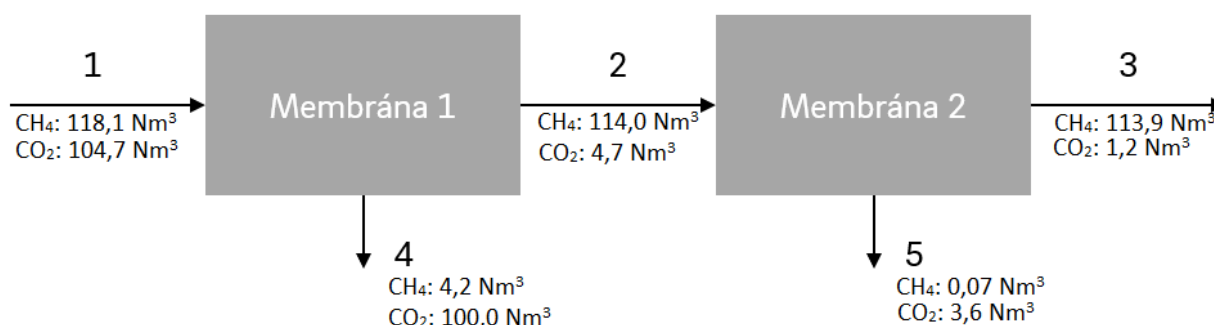
$$\dot{V}_{i,j} = c * (\dot{V}_{i;1} + \dot{V}_{i;2} + \dots + \dot{V}_{i;n-1} + \dot{V}_{i;n}) \quad (6)$$

Matrice koeficientů, uvedená v Příloze 3, je výsledná matice, ze které se maticovým součinem s vektorem pravých stran počítají výsledky bilance, v tomto případě průtoky složek v jednotlivých prouděch. Kritériem řešitelnosti matice, a tím i celé bilance, je samozřejmě determinant, který musí být nenulový.

Podmínka nenulového determinantu byla splněna, můžeme tak získat výsledky jednotlivých neznámých, které jsou vypsány v následující tabulce 23:

Průtok složky v proudě	[Nm ³ /hod]
V1;1	118,12
V1;2	104,75
V2;1	113,95
V2;2	4,75
V3;1	113,88
V3;2	1,15
V4;1	4,17
V4;2	100,00
V5;1	0,07
V5;2	3,60

Tabulka 23: Výsledné průtoky složek v prouděch



Obrázek 24: Schéma s výslednými průtoky složek v prouděch

Obrázek 24 shrnuje výsledky ve schématu. Na výstupu (proud číslo 3) je průtok 129 Nm³/hod. s 99% obsahem metanu. Ztráty metanu v proudech permeátu (proud 4 a 5, složka 1) se tak pohybují okolo 3,6 % a to bez zapojení recyklu. Nedosahujeme tak hodnot zmíněných ve studii pro třístupňový proces s několika recykly, hodnoty ale lze označit za uspokojivé, protože splňují nároky kladené na biometan jako náhradu zemního plynu. Stejně jako u aminové vypírky jsou uvedeny základní parametry metody (tabulka 24).

Parametry membránové separace použité pro upgrade bioplynu	
Výsledná čistota metanu	99 % _{vol}
Zůstatek původního metanu	96,4 % _{vol}

Tabulka 24: Výsledné parametry uvažované membránové separace

Pro tvorbu dalších bilančních schémat by bylo potřeba znát jiné údaje – provést experiment, nebo pokročilejší numerickou simulaci membrány, což by bylo nad rámec této práce. Matice koeficientů měla pro ostatní zapojení s recyklem (2 membrány s recyklem a 3 membrány s recyklem) vždy nulový determinant. Bylo nutné definovat další vztahy formou neznámých podmínek, které by bylo nutné experimentálně určit, nebo simulovat.

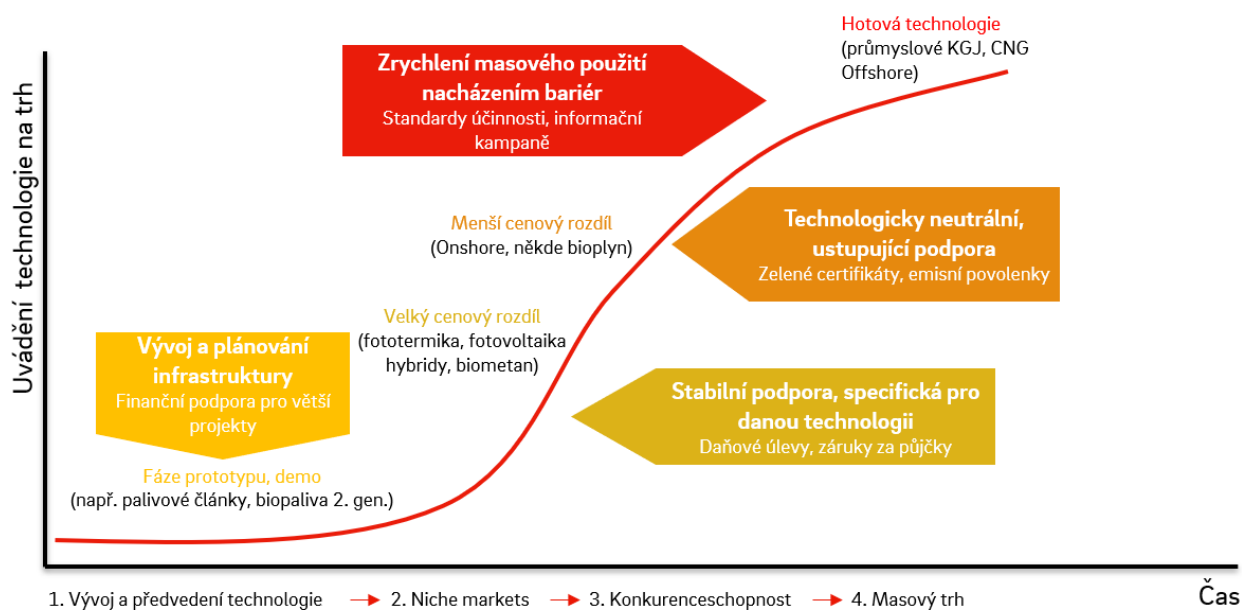
5. Ekonomická část

5.1. Úvod

Pro rozhodování o vhodné technologii je nutné provést i ekonomické vyhodnocení metod čištění bioplynu na biometan. V této kapitole tak budou obě navržené metody čištění bioplynu vyhodnoceny a porovnány z hlediska ekonomiky těchto projektů. V systému tržního hospodářství totiž nestačí jen technická proveditelnost, projekt musí vycházet i po finanční stránce. Jistě se dá hovořit o určitých projektech, které větší společnosti berou spíše jako nástroj pro propagaci a možnost přidat do výroční zprávy kolonku CSR (*Corporate Social Responsibility*), technologie se tak ale masověji šířit nebude.

Pro rozvoj jakékoliv technologie je potřeba do jejího vývoje investovat většinou nemalé prostředky. Ve světlech událostí tohoto roku je zřejmé, že se společnosti budou snažit spíše spořit, než podporovat nepříliš známé projekty, které sice v zahraničí fungují již několik let a leckde je naplánován jejich strmý rozvoj (například Francie), zdejší legislativní podmínky s nimi ale nepříliš počítají a zúčastněné strany teprve nacházejí společnou řeč. Jsou to tak

spojené nádoby, nebo ještě přesněji, odvěký problém „vejce nebo slepice“ – bude první postaven projekt, nebo se vyjasní regulační rámec? Hádanka se v tomto případě vyřešila instalací v Rapotíně, která je zmíněna v úvodu práce. Absence jasného legislativního rámce v ČR pro upgrade bioplynu na biometan ale stále přináší spoustu významných nejistot pro masovější implementaci těchto projektů.



Obrázek 25: S křivka vývoje technologií [39]

Pro uvádění technologie (nebo produktu obecně) na trh, se běžně uvádí S křivky, které znázorňují nasazení produktu v čase. Graf výše (obrázek 25) navíc znázorňuje potřebu přesně cílit podporu, pokud má být produkt co nejrychleji komerčně proveditelný. Jde samozřejmě o příklady z energetiky, která je nyní pod tlakem na výraznou proměnu a rychlé zapojování technologií je velmi žádoucí. Do této kategorie lze jistě počítat i biometan.

5.2. Dotační tituly

Jak již bylo zmíněno, biometan je v České republice spíše na pomyslné startovní čáře a žádná finanční podpora doposud poskytnuta nebyla. Pro biometan taktéž není definován jasný legislativní rámec, např. zákon 165/2012 Sb. o podporovaných zdrojích, v platném znění se o biometanu prakticky nezmiňuje, první vlašťovkou je však novelizované znění Energetického zákona 458/2000 Sb. v platném znění, který již zmiňuje podporu biometanu v definici působnosti energetického regulačního úřadu (§17, odst. 4). Bližší vymezení a konkrétní podmínky podpory však stále chybí.

Přesto se ale dají najít některé tituly nebo programy, ze kterých by bylo možné čerpat podporu na realizaci projektu.

1. Operační program PIK

Už v úvodu bylo napsáno o plánech v sektoru dopravy, kde se emise podaří snížit buď elektromobilitou, nebo právě biopalivy druh generace. O rychlém růstu vozidel na elektrický pohon na našich silnicích se příliš hovořit nedá, právě zemní plyn by tak mohl být dočasným mostem mezi tradičním spalovacím motorem a tím elektrickým. Dne 1. 7. 2020 tak byla zveřejněna „Výzva VI programu podpory NÍZKOUHLÍKOVÉ TECHNOLOGIE – Úpravu bioplynu na biometan a jeho vtláčení do sítě nebo jeho plnění v rámci místní infrastruktury“ [40]. Je zaměřena na jak na vtláčení vyrobeného biometanu do plynárenské soustavy, tak na vznik místních CNG systémů a plnicích stanic. Minimální dotace je 500 tisíc, maximální pak 35 milionů korun při procentuální podpoře 55/45/35 % pro malé, střední a velké podniky.

2. Provozní podpora (Cenové rozhodnutí ERÚ)

Již v roce 2019 se začaly objevovat informace, že v Cenovém rozhodnutí pro rok 2021 se objeví provozní podpora v podobě výkupního bonusu. Podrobnější informace jsou zatím dostupné jen v různých vyjádřeních představitelů Regulačního úřadu [41]. Mělo by se jednat o maximálně 1 700 Kč/MWh a výše se bude každý rok novelizovat.

3. Inovační fond

V roce 2021 by měl být spuštěn další dotační program, který se bude zaměřovat přímo na unikátní technické projekty, jmenovitě vodíkový průmysl, obnovitelné zdroje energie a technologie zachytávání a skladování uhlíku z plyných emisí. Příjemci tak mohou být i v chemickém průmyslu nebo v teplárenství. Program by měl poskytovat až 60% investiční podporu, hlavně by ale mělo být umožněno kombinovat jej s dalšími tituly [42].

4. Just Transition Fund (Fond pro spravedlivou transformaci) [43][44]

Fond na podporu transformace uhelných regionů, které budou logicky zasaženy odklonem od uhlí. Z Evropských zemí se to bude nejvíce týkat Polska. Česká republika je na pomyslném čtvrtém místě a mělo by tak získat asi 581 milionu eur v letech 2021 až 2027. Podle stránek Evropské komise: „Podporují se tedy produktivní investice do malých a středních podniků, vzniku nových podniků, výzkumu a inovací, obnovy

životního prostředí, ekologické energie,...“ [44], biometan a podobné technologie by tak jistě měly mít nárok na prostředky z tohoto programu, byť přesná čísla ani podmínky na národní úrovni ještě nejsou známé.

5.3. Scénáře

Představme si, že se vlastník stávající bioplynové stanice rozhoduje, zda po navýšení kapacity stanice nainstaluje:

1. Další kogenerační jednotku

Jde o známou technologii s poměrně jasnými investičními náklady a příjmy v podobě garantované výkupní ceny za vyrobenou elektrickou energii. Tato možnost však novelou zákona 165/2012 Sb. o podporovaných zdrojích, v platném znění přináší značné komplikace, jelikož je tímto zákonem požadováno zajištění efektivního využití pro alespoň 50 % primární energie, ze které je bioplyn vyroben, a je vyroben alespoň z 30 % z jiné biomasy, než je cíleně pěstovaná biomasa na orné půdě. V případě elektrické energie se podpora elektřiny z OZE vztahuje pouze na výrobní elektřiny uvedené do provozu do 31. 12. 2013 (z tohoto důvodu se po roce 2014 neuvedla do provozu žádná nová bioplynová stanice). Instalace další nové kogenerační jednotky by tak nebyla považována za výrobu uvedenou do provozu do 31. 12. 2013, čili na vyprodukovanou elektrickou energii v další kogenerační jednotce nelze v tuto chvíli získat žádnou podporu, což je značný ekonomický handicap. Jedinou možností je získání podpory ve formě zeleného bonusu na dodávku tepla z kogenerační jednotky (např. do soustavy CZT), ovšem toto s sebou přináší nutnost dostupnosti vhodného odběratele tepelné energie a možnost připojení k distribuční soustavě tepla, což v případě BPS není vždy zaručeno (velká vzdálenost do obce, neexistující infrastruktura, žádný významný odběratel tepla v okolí atp.).

2. Upgrade na biometan s využitím chemické absorpce

Nová technologie, která má ale poměrně známé a stabilní výsledky. Pořizovací náklady se budou hůře odhadovat dopředu a příjmy, v podobě prodaného biometanu s certifikátem, také.

3. Upgrade na biometan s využitím membrány

Podobná situace jako u druhé varianty, jen s rozdílem progresivnější technologie, která má potenciálně snadnější povolovací řízení, díky absenci nebezpečných chemikálií.

Aby bylo možné stanovit návratnost investice, je počítáno s náklady na bioplyn, jako kdyby byla technologie samostatně stojící bez bioplynové stanice. Jedná se tak o pomyslný scénář nula, kdy by vlastník stanice navýšil výrobu, ale přebytečný bioplyn prodával. Náklady na bioplyn v sobě zahrnují všechny přímé i nepřímé náklady producenta bioplynu (zejména pak náklady na suroviny, energie, osobní náklady obsluhy, náklady na údržbu a opravy, pojištění, odpisy investiční technologie a režii bioplynové stanice s navýšenou kapacitou).

5.4. Výchozí parametry

Pro každou ekonomickou analýzu je potřeba definovat parametry společné pro všechny scénáře, které budou v průběhu výpočtu konstantní. Jedná se o daňové sazby, kategorie a druhy odpisů, směnné kurzy měn, diskontní sazbu a inflaci. Pro tuto práci byly zvoleny následovně:

Parametry		
Daň z příjmu	19 %	
Odpisová skupina 2	Doba odepisování	5 let
	Odpisy v 1. roce	11 %
	Odpisy následně	22,25 %
Odpisová skupina 4	Doba odepisování	20 let
	Odpisy v 1. roce	2,15 %
	Odpisy následně	5,15 %
Kurz EUR/CZK	26 -	
Diskontní sazba	4 %	
Inflace	2 %	
Doba hodnocení projektu	20 let	

Tabulka 25: Výchozí parametry ekonomické bilance

Další skupinou jsou energetické náklady uvedené v tabulce 26. Ty byly odhadnuty s přihlédnutím k reálné studii pro energetickou společnost, která zvažovala výstavbu právě biometanové jednotky v České republice [45]. Zdroj je to sice jediný, na druhou stranu

poměrně kvalitní a také se jedná o běžně ne zcela dostupné údaje. Surovinami jsou elektřina, bioplyn (z důvodů popsaných v úvodu) a biometan jako výsledný produkt a zdroj příjmů navrhovaného projektu (mimo scénář s uvažováním kogenerační jednotky). Cena biometanu bude později také jeden ze sledovaných parametrů citlivostní analýzy.

Jednotkové ceny energií a bioplynu	
Cena elektrické energie	1,5 Kč/kWh
Náklady na bioplyn	8,5 Kč/Nm ³
Výkupní cena biometanu	0,06 EUR/kWh
Výkupní cena elektřiny	1,3 Kč/kWh

Tabulka 26: Ceny energií a bioplynu [45]

5.5. Náklady na technologii

Tato data jsou bezesporu nejobtížněji dohledatelná. Ceny konkrétních projektů nejsou veřejné a žádné katalogy s cenovou nabídkou přirozeně neexistují.

Přeci jen o něco příznivější situace je u kogeneračních jednotek, které se běžně používají a jsou tak dostupné i náklady na provoz. Zde použité částky byly poskytnuty vedoucím této práce.

Pro separaci CO₂ z bioplynu membránovou metodou byla opět využita již zmiňovaná konkrétní studie [45], která počítala s membránovou jednotkou, byť není specifikován materiál membrány. Dá se ale s určitou jistotou předpokládat, že šlo buď o celulózová vlákna, nebo vlákna polyamidová, protože právě tyto dva materiály se komerčně nasazují.

Náklady na chemickou absorpci vypíráním aminy pak byly odhadnuty s využitím údajů ze studie od *The Royal Society of Chemistry* [35], která uvádí relativní částky podle výkonu v několika rozmezích. Výsledné investiční náklady na tuto technologii byly dále navýšeny uvažováním 2% inflace pro přiblížení k aktuálním cenám.

Výše zmíněné náklady na pořízení obou technologií upgradu na biometan jsou uvažovány včetně nákladů na dopravu zařízení, montáž a uvedení do provozu.

Pro obě varianty upgradu na biometan byly k pořizovacím nákladům na technologii připočteny náklady na nezbytné stavební práce ve výši 1 milion Kč a náklady na projekční a

inženýrskou činností ve výši 10 % celkových investičních nákladů. Porovnání investičních nákladů pro všechny uvažované scénáře je patrné z následující tabulky 27.

Investiční náklady				
	Jednotka	Scénář 1 – další kogenerační jednotka	Scénář 2 – upgrade na biometan – aminová vypírka	Scénář 3 – Upgrade
Náklady na pořízení technologie (vč. montáže)	tis. Kč	18 500	34 244	26 855
Náklady na stavební práce	tis. Kč	0	1 000	1 000
Náklady na projekční a inženýrskou činnost	tis. Kč	1 850	3 524	2 785
Celkové investiční náklady	tis. Kč	20 350	38 768	30 640

Tabulka 27: Investiční náklady jednotlivých technologií

Již při pohledu na tabulku je zřejmé, že membránová technologie bude vycházet ve srovnání lépe. Za pravdu tomu dávají koneckonců i nedávná instalace v tuzemsku a ostatní uvažované.

5.6. Provozní náklady (OPEX)

Provozní náklady byly opět odhadnuty s využitím studií z předchozí kapitoly [35] [45]. Ceny elektrické energie a bioplynu byly počítány jako v tabulce 26. K provozním nákladům byla také připočtena spotřeba elektřiny na vtláčení vyprodukovaného biometanu do středotlakého plynovodu ($0,075 \text{ kWh}_e/\text{Nm}^3$) a poplatek za distribuci plynu distribuční společnosti ($0,9 \text{ Kč}/\text{Nm}^3$) [45]. Shrnutí nákladů je pak uvedeno v tabulce 28.

Provozní náklady				
	Jednotka	Scénář 1 – další kogenerační jednotka	Scénář 2 – upgrade na biometan – aminová vypírka	Scénář 3 – Upgrade na biometan – mem. separace
Množství bioplynu na vstupu	Nm ³ /h	219	219	219
Náklady na bioplyn	Kč/Nm ³	8,5	8,5	8,5
Celkové náklady na bioplyn	tis. Kč/rok	16 307	16 307	16 307
Náklady na údržbu a servis KGJ	tis. Kč	110	-	-
Jednotkové ostatní provozní náklady (el. energie, média, ostatní materiál, údržba) – MEA	euro/Nm ³ biometanu	-	0,144	-
Jednotkové provozní náklady (el. energie) – membrána	kWh _e /Nm ³ bioplynu	-	-	0,3
Ostatní provozní náklady (spotřební materiál, údržba, obsluha)	tis. Kč/rok	-	4 118	2 113
Množství vyprodukovaného biometanu	Nm ³ /rok	-	1 100 000	1 100 00
Spotřeba el. energie na vtláčení biometanu do soustavy	kWh _e /Nm ³	-	0,075	0,075
Spotřeba el. energie na vtláčení biometanu do soustavy	kWh _e /rok	-	82 500	82 500
Náklady na vtláčení biometanu do soustavy	tis. Kč	-	124	124
Poplatek za distribuci	Kč/Nm ³	-	0,9	0,9
Náklady na distribuci	tis. Kč	-	990	990
Celkové provozní náklady	tis. Kč/rok	16 417	21 539	19 534

Tabulka 28: Provozní náklady jednotlivých technologií

5.7. Příjmy projektu

První scénář, kogenerační jednotka, má standardní produkty: elektřinu a teplo. Elektrická energie se z většiny dodává do distribuční soustavy, pro vlastní spotřebu BPS je počítáno s 5 %. Pro spotřebovávání vlastní elektřiny v areálu BPS by bylo nutné mít „vlastní jističe“, tedy vlastní, oddělený okruh. Teplo se dá samozřejmě také prodat, v naprosté většině se ale naráží na absenci teplovodní infrastruktury, jejíž budování nepřejí ani ekonomické, ani psychologické okolnosti. I přes to obsahuje následná analýza scénář s prodejem 0/50/100 % vyrobeného tepla s aktuálním zeleným bonusem (dle aktuálně platného cenového rozhodnutí ERÚ).

Druhý a třetí scénář počítá s prodejem vyrobeného biometanu. Ten bude obchodován na základě záruk původu, tedy potvrzení o každé vyrobené MWh, která bude následně vtlačena do distribuční soustavy. Certifikaci a vykazování má na starosti operátor trhu – OTE. Jednotková cena biometanu je uvažována 16,38 Kč/kWh.

Příjmy				
	Jednotka	Scénář 1 – další kogenerační jednotka	Scénář 2 – upgrade na biometan – aminová vypírka	Scénář 3 – Upgrade na biometan – membránová separace
El energie dodaná do sítě – KGJ	kWh _e /rok	3 670 551	-	-
Maximální teoreticky dodávané teplo	kWh/rok	3 202 835	-	-
Roční produkce biometanu	kWh/rok	-	11 550 000	11 550 000
Roční příjem projektu	tis. Kč/rok	9 569 996	18 018 000	18 018 000

Tabulka 29: Příjmy projektu podle jednotlivých technologií

5.8. Sestavení cash flow

Nejprve je nutné stanovit cash flow (tedy tok hotovosti) projektu. Na investiční náklady se uplatní příslušná odpisová kategorie, stanoví se zisk před zdaněním, z něj se vypočítá daň z příjmu a dojdeme k toku hotovosti. Ten je základním údajem pro získání všech obvyklých parametrů hodnotících investice. Ukazuje totiž, kolik je projekt každý rok v „plusu“ nebo

„minusu“. V kalkulaci je zahrnut i základní úvěr ve výši 5 milionu Kč, který ale výsledky příliš neovlivňuje, neboť projekt vychází vesměs záporně.

5.9. Ekonomické vyhodnocení

5.9.1. Prostá doba návratnosti

Je nasnadě, co dané číslo udává – za jakou dobu se ta která investice vrátí, bez uvažování dalších externích faktorů. Počítá s konstantní hodnotou peněz a tak jednoduše sleduje, v jakém okamžiku životnosti projektu se kumulované cash flow dostane na nulu. Parametr však neuvažuje časovou hodnotu peněz.

$$PDN = \frac{\text{počáteční investice}}{CF_{rok}} \quad (7)$$

5.9.2. Reálná doba návratnosti

Podobně jako jeho jednodušší varianta, doba návratnosti je ukazatel vyjadřující počet let provozu pro navrácení investované částky. V tomto případě se už ale uvažuje s diskontovaným cash flow, je tedy počítáno s časovou hodnotou peněz. Nejprve je tak potřeba určit diskontované cash flow, ze kterého se poté získá kumulativní a doba návratnosti se již spočítá jako v předchozím případě.

$$\text{Diskontované } CF_{rok} = \frac{CF_{rok}}{(1+\text{disk.sazba})^{rok}} \quad (8)$$

5.9.3. Čistá současná hodnota (NPV)

Jde o rozdíl mezi očekávaným cash flow přepočteným na současnou hodnotu a dnešní hodnotu investic.

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{CF_{rok}}{(1+\text{disk.sazba})^{rok}} - \text{počáteční investice} \quad (9)$$

5.9.4. Vnitřní výnosové procento (IRR)

Případně diskontovaná míra výnosnosti. Nejčastěji používaný parametr ze zde uvedených. IRR má největší význam porovnáním s ukazatelem WACC, který říká, jaké jsou náklady na peněžní prostředky (typicky úroky). Pakliže je IRR vyšší než WACC, investice by měla být výnosná.

$$0 = \sum_{t=1}^n \frac{CF_{rok}}{(1+IRR)^{rok}} - \text{počáteční investice} \quad (10)$$

5.10. Proměnné

Pro posouzení všech okolností projektu je žádoucí provést citlivostní analýzu, která je užitečná sama o sobě, také ale může definovat rizika projektu a určit jejich míru. Je tak možné určit optimistický, pesimistický a základní scénář, jak se běžně udává.

5.10.1. Vliv výše investičních nákladů (CAPEX)

Investiční náklady jsou u každého projektu průmyslového měřítka značnou položkou. Jde navíc o náklady, které je nutné zaplatit v jeden okamžik (i když částku rozdělíme například na zálohu a doplatek po úspěšném pilotním provozu). Do jejich výše také vstupuje mnoho faktorů, které jednoduše nelze ovlivnit. Například směnný kurz koruny vůči euru, který hraje roli i v této kalkulaci. Dalším může být motivace dodavatele, který by v tomto případě mohl uvažovat o jistém snížení částky, jelikož upgrade biometanu je v České republice stále unikátní technologie a mít referenční provoz z dalšího regionu se vždy hodí.

Z tohoto důvodu bylo uvažováno šest dalších scénářů: +/-30% změna, vždy po 10 procentech.

5.10.2. Vliv výkupní ceny biometanu

Logickým parametrem je dále cena produktu – biometanu. Jeho cena je totiž značně závislá na ochotě odběratelů kupovat „zelený“ certifikovaný plyn, který je sice náhradou zemního, jeho cena je ale vyšší. Jde tedy o jakousi společenskou poptávku, která je stimulována rozhodnutím vlád, regulátora nebo dalších institucí. Z těchto důvodů je tak možné usuzovat růst jeho ceny. Ostatně při pohledu právě do zahraničí je vidět, že se výkupní ceny pohybují výrazně výše než u nás. Ve Velké Británii se pohybuje v rozmezí 86 – 127 EUR/MW, což je o 50 respektive 100 % více, než cena uvažovaná jako základní scénář v této práci (60 EUR/MW).

Opět zde byly uvažovány tři scénáře, počítající s 10 až 30% růstem cen biometanu.

5.10.3. Vliv výše případné dotace

Z důvodů společenské poptávky, zmíněné v předchozím odstavci, existuje i dotační titul [40], který se soustředí právě na investiční podporu. Jeho výše je rozhodně nezanedbatelná, pro návratnost investice se tak může jednat o zásadní faktor. Parametry dotace jsou uvedeny v tabulce 30. Výpočet soustředí na zatím oficiálně existující podporu.

Investiční dotace Výzva VI programu podpory NÍZKOUHLÍKOVÉ TECHNOLOGIE – Úpravu bioplynu na biometan	
Alokace výzvy	100 000 000 Kč
Procentuální podpora ze způsobilých nákladů pro malé podniky	45 %
Procentuální podpora ze způsobilých nákladů pro střední podniky	35 %
Procentuální podpora ze způsobilých nákladů pro velké podniky	25 %

Tabulka 30: Parametry vyhlášené investiční dotace [40]

Provozní podpora, která je zmíněna v kapitole 5.2, by měla nastat až v roce 2021, navíc se bude určovat přes předem stanovený WACC (vážený průměr nákladů kapitálu; parametr určující přiměřený zisk, typický pro regulovaná prostředí), není tak dopředu možno určit, jaká bude její přesná výše. Nebude tedy použita jako parametr pro scénáře.

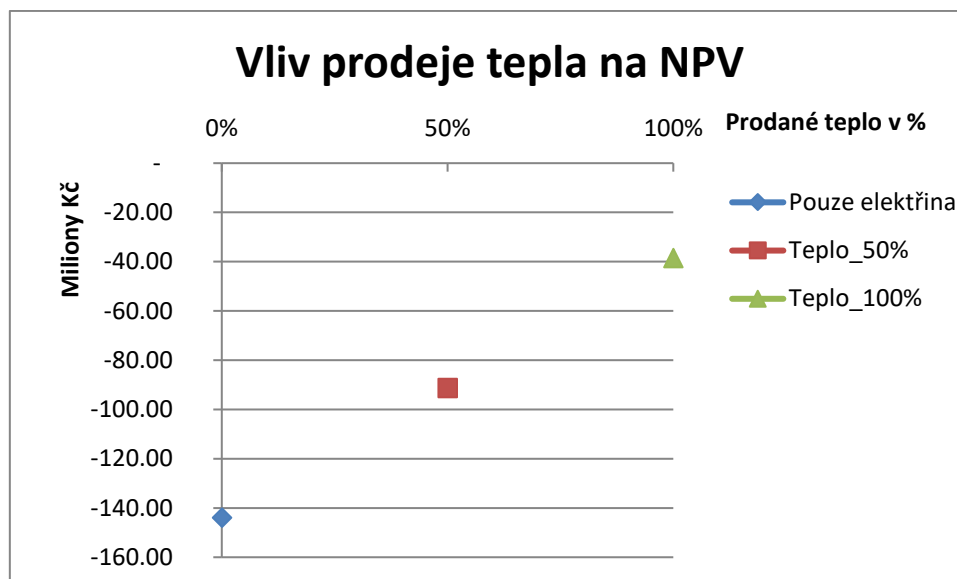
5.11. Výsledky

Následují výsledky pro jednotlivé scénáře. Vzhledem ke špatným ekonomickým výsledkům většiny posuzovaných scénářů jsou dále uvedeny hlavně hodnoty NPV, které mají význam i v záporných hodnotách (na rozdíl od například záporné doby návratnosti, kde vyjde záporný čas).

5.11.1. Kogenerační jednotka

Zásadním parametrem u kogenerační jednotky je výkupní cena elektřina. Ta byla dlouho navyšována takzvaným zeleným bonusem, ten ale platí jen pro výroby uvedené do provozu do konce roku 2013. Stát sice ustanovil novou provozní podporu, ta se však týká jen vyrobeného a účelně využitého tepla [46], elektřina se tak prodá pouze za běžnou tržní cenu silové elektřiny. I při zahrnutí prodeje veškerého nevyužitého (tj. 70 % z celkového) tepla nevychází sledované parametry příliš optimisticky. Toto také vysvětluje, proč se po zrušení podpory na výkup vyprodukované elektřiny od 1. 1. 2014 pro nové projekty (kam spadá i navýšení instalovaného elektrického výkonu výroby – další KGJ) nepostavila v ČR jediná BPS. Vzhledem k tomu, že veškeré ukazatele jsou záporné, nemá příliš význam je uvádět (záporná doba návratnosti není příliš dobře představitelná). Jedinou výjimkou je NPV, tedy hodnota projektu na konci jeho provozu, zde uvažováno 20 let. Vzhledem k výši počáteční investice a její dostatečně přesné předpovědi zde bylo upuštěno od vyjadřování scénáře se

změnou její hodnoty. Výsledky pro scénáře tak následují na obrázku 26. Jak vidíme, ani při 100% prodeji tepla nedojde ke splacení investice.

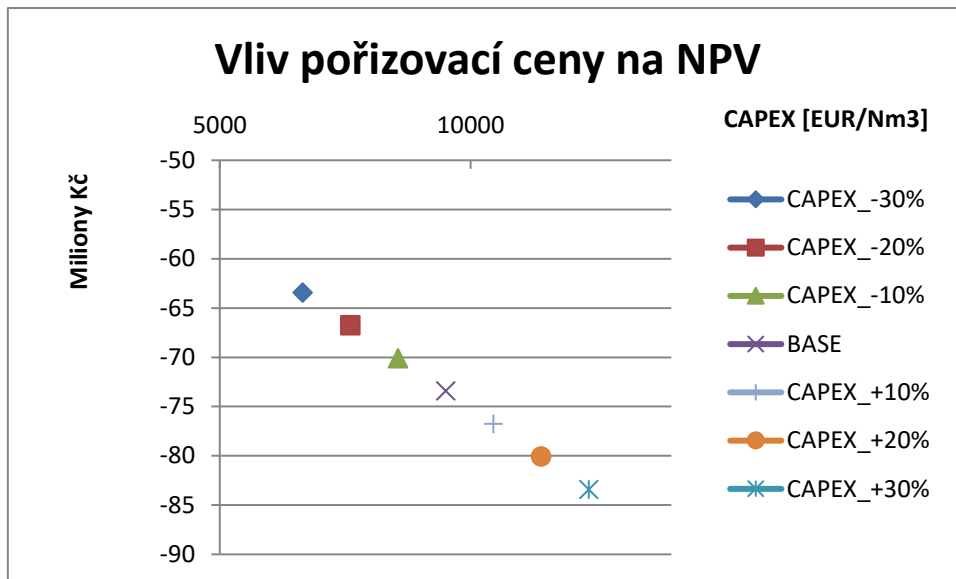


Obrázek 26: Vliv prodeje tepla NPV projektu uvažující kogenerační jednotku

Zde je dobré připomenout, že bioplyn se zde uvažuje za cenu 8,5 Kč/Nm³, což by měla být jeho „tržní“ cena. Za kolik jej dokáže vyprodukovat přímo výrobce tak zůstává druhou otázkou, nicméně cena je pro všechny porovnávané scénáře a technologie stejná, porovnání by tak mělo být nezkreslené.

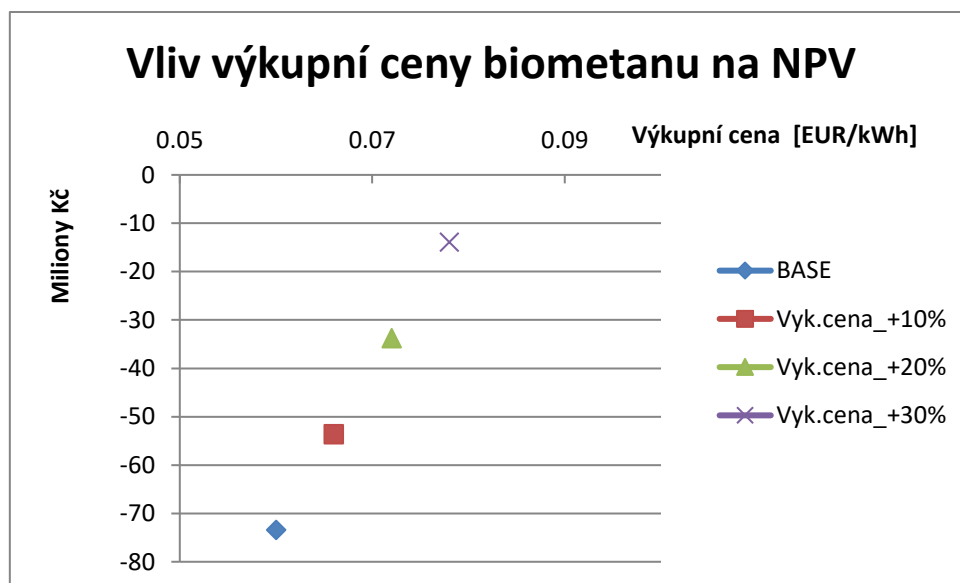
5.11.2. Upgrade na biometan – aminová vypírka

Pro obě uvažované možnosti upgradu bioplynu byly provedeny tři analýzy z hlediska výše kapitálové investice, prodejní ceny biometanu a případů získání dotace. Dotace byla rozdělena na případy malého, středního a velkého podniku, tedy tak, jak určuje Operační Program PIK.



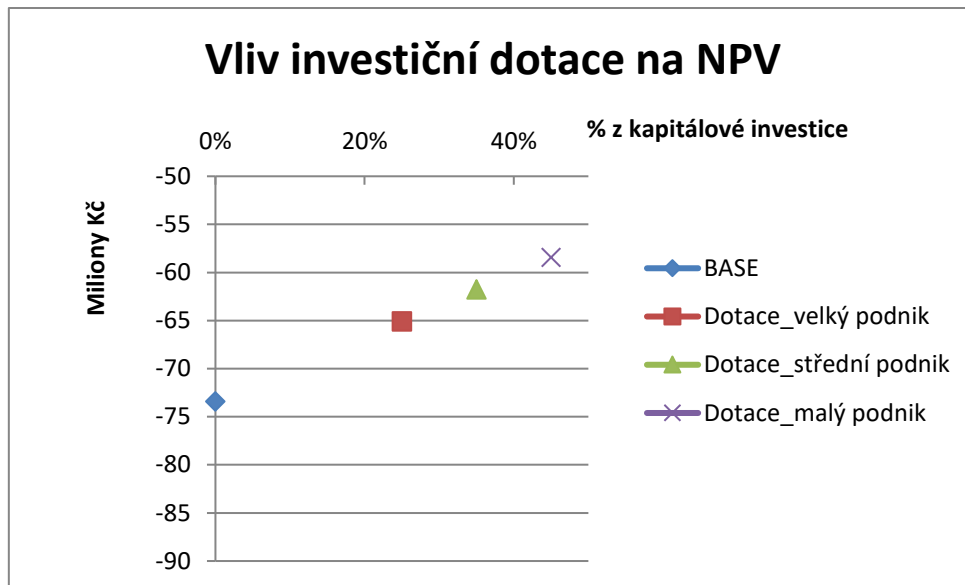
Obrázek 27: Vliv pořizovací ceny na NPV projektu uvažující upgrade bioplynu aminovou vypírkou

Na obrázku 27 vidíme, že vztah pořizovací ceny technologie a konečné hodnoty projektu je jasně lineární. Zároveň je ale zřejmé, že ani v optimistickém scénáři není projekt ziskový.



Obrázek 28: Vliv výkupní ceny biometanu na NPV projektu uvažující upgrade bioplynu aminovou vypírkou

Obdobně je tomu pro výkupní cenu biometanu, i když zde je dopad výrazně větší. Scénáře jsou uvedeny na obrázku 28.

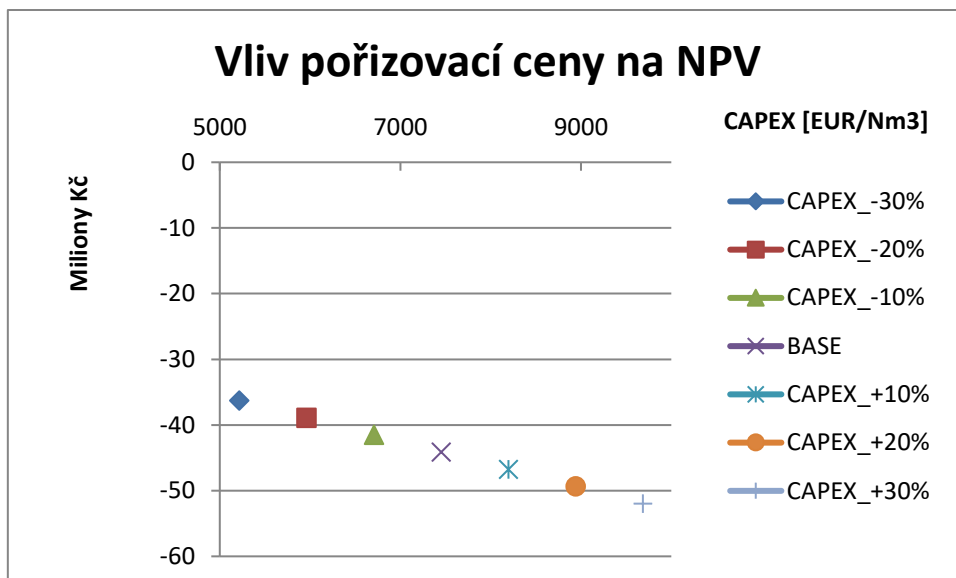


Obrázek 29: Vliv investiční dotace na NPV projektu uvažující upgrade bioplynu aminovou vypírkou

Dotace má samozřejmě pozitivní dopad do ekonomického hodnocení, jedná se ale vlastně o již vyhodnocený scénář se změnou pořizovací ceny, což je vidět na obrázku 29. Bohužel proti objemu surovin, které se ročně spotřebují, je změna investiční částky nepříliš podstatná. Dalším úskalím je procentuální plnění v závislosti na kategorii podniku. Podobný projekt pravděpodobně nebude realizován společností, která spadá do „malého“ podniku. Nejlepší scénář je tak zde bohužel spíše hypotetický.

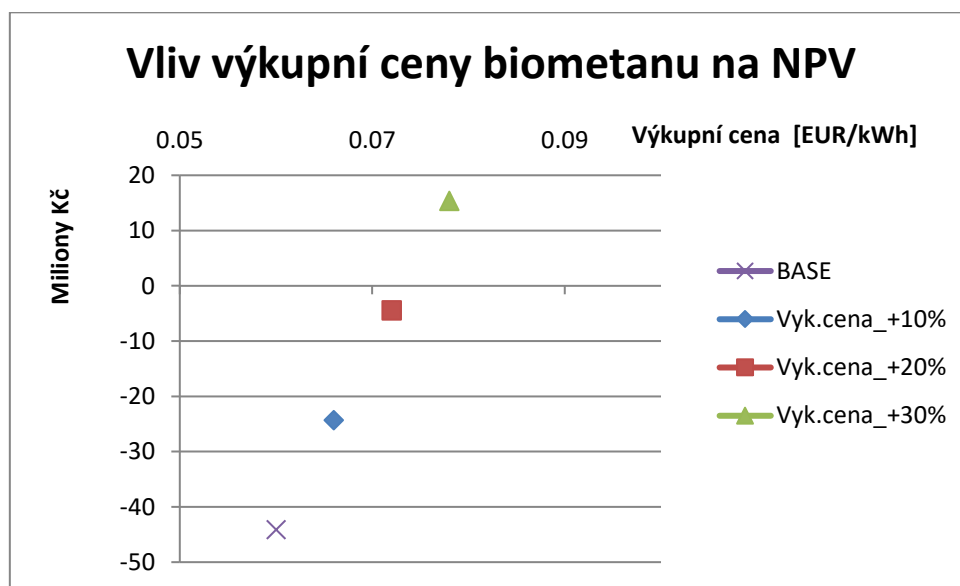
5.11.3. Upgrade na biometan – membránová separace

Tato technologie slibuje nižší investiční i provozní náklady než upgrade pomocí chemické absorpce, zejména v menších měřítkách, do kterého se stále vejde i zde řešený případ. Výsledky tak budou o něco příznivější, dopad jednotlivých proměnných bude ale stejný. Jako první následuje vliv pořizovací ceny, shrnutý na obrázku 30.



Obrázek 30: Vliv pořizovací ceny na NPV projektu uvažující upgrade membránovou separací

Výsledky tedy dopadly dle očekávání, výstup se mění jen v jednotkách procent.

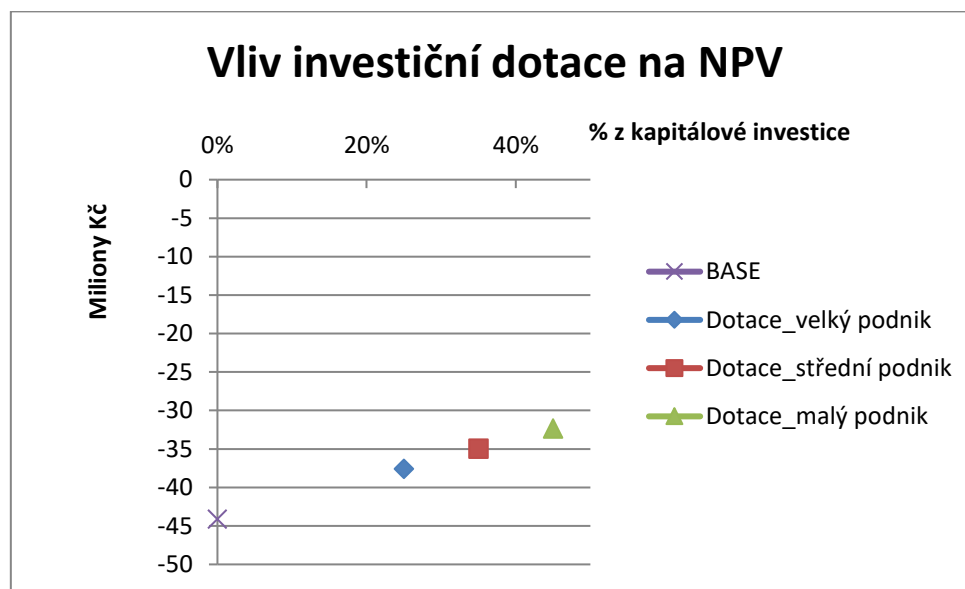


Obrázek 31: Vliv výkupní ceny biometanu na NPV projektu uvažující upgrade membránovou separací

Na grafu výše (obrázek 31) se projekt poprvé dostává do černých čísel. Vděčí za to růstu výkupní ceny, v porovnání s aminovou vypírkou ale také nižším investičním i provozním nákladům. Hraniční cena biometanu, kdy projekt bude mít na konci životnosti vyrovnanou finanční bilanci (*breakeven price*) je 0,0725 EUR/kWh, tedy okolo 20 Kč/Nm³. Pro úplnost jsou v tabulce 31 uvedeny finanční ukazatele scénářů s 20 resp. 30% nárůstem výkupních cen.

Finanční ukazatele			
Scénář	NPV [Kč]	Návratnost	IRR [%]
Výkupní cena biometanu +20 %	- 1 655 667	15,9 let	3,3
Výkupní cena biometanu +30 %	18 178 843	9,1 let	10,4

Tabulka 31: Ekonomické parametry nadějných scénářů membránové separace



Obrázek 32: Vliv investiční dotace na NPV projektu uvažující upgrade membránovou separací

Investiční dotace, jejíž vliv je znázorněn na obrázku 32, opět nemá přílišný dopad na hodnotu projektu. Nelze říci, že by byla zanedbatelná, v obou scénářích je ale vidět, že sama o sobě ekonomickou situaci bioplyn upgradujících projektů nezlepší.

5.12. Optimisticko – realistický scénář

Na základě poznatků z minulé kapitoly je vhodné zamyslet se nad okolnostmi, které by umožnily stavbu technologie realizovat a které by mohly v budoucnu nastat. Jako klíčová se ukázala výkupní cena biometanu, která se nyní v České republice pohybuje kolem již zmiňovaných 16 Kč/kWh. Investiční podpora je jistě na místě, ve vyhodnocovaných scénářích ale nedokázala projekty posunout do černých čísel. Pro cenu technologie platí totéž.

Zásadní pro uvažovaný scénář je tak výkupní cena, která by měla do budoucna stoupat. Růst to bude jednak přirozený, na základě poptávky energetických společností, ale i růst skrze podporu ve formě zeleného bonusu, která by měla oficiálně existovat od příštího roku. Její maximální výše 1700 Kč/MWh by znamenala více než 100% nárůst ceny zde uvažované jako základní. Z tohoto důvodu bude zastropována jistou mírou výnosnosti [41]. Zde se tak 20%

nárůst jeví jako celkem realistický, vzhledem k výslednému IRR, které se drží pod úrovní novelizovaného IRR pro bioplyn i biomasu (10,6 resp. 9,5 %) [47]. V případě nemožnosti kombinování podpory je zcela jistě výhodnější podpora provozní, tedy zelený bonus za vyrobený biometan. Přesné parametry scénáře jsou uvedeny v tabulce 32.

Optimisticko – realistický scénář	
Investiční dotace	Ano; střední podnik (35 %)
Cena technologie	Základní
Výkupní cena biometanu	+20 %
NPV	6 545 058 Kč
Návratnost (diskontovaná)	13,63 let
IRR	7,65 %

Tabulka 32: Předpoklady a výsledky optimisticko-realistického scénáře

6. Závěr

Cílem práce bylo vypracovat technicko-ekonomickou studii upgradu bioplynu na biometan a porovnat dvě technologické varianty tohoto postupu. Nejdříve byla provedena simulace upgradu chemickou absorpcí – aminovou vypírkou v programu Aspen Plus V10 a bilance dvoustupňové membránové separace v MS Excel. Aminová vypírka dosáhla čistoty metanu 92,4 %_{mol} a ztrát asi 0,07 %_{mol}, membránová separace čistoty 99 %_{obj} a ztrát 3,6 %_{obj}.

Po obdržení výsledků byla provedena základní ekonomická analýza, která ukázala, že rozhodujícím faktorem pro realizaci takového projektu je výkupní cena biometanu. Oba projekty byly v základním scénáři prodělečné, membránová technologie se ale ve scénáři s 30% růstem výkupních cen ukázala jako zisková s IRR 9,1 %.

Dále byl identifikován scénář, který by v blízké budoucnosti umožnil masivnější rozšíření této technologie. Jedná se právě o růst výkupních cen, a to jednak přirozeně zvýšenou poptávkou po emisně méně náročném zdroji, tak také případným zavedením provozní podpory biometanu ve formě zeleného bonusu. Přesné parametry shrnuje tabulka 32.

7. Seznam použité literatury

- [1] *Vyhláška o požadavcích na biometan, způsob měření biometanu a kvality biometanu dodávaného do přepravní soustavy, distribuční soustavy nebo podzemních zásobníků plynu*. In: . ročník 2012, 171/2012. Dostupné také z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2012-459>
- [2] *Natural gas explained* [online]. 2019 [cit. 2020-07-30]. Dostupné z: <https://www.eia.gov/energyexplained/natural-gas/natural-gas-and-the-environment.php>
- [3] *Vnitrostátní plán České republiky v oblasti energetiky a klimatu* [online]. [cit. 2020-07-30]. Dostupné z: <https://www.mpo.cz/cz/energetika/strategicke-a-koncepcni-dokumenty/vnitrostatni-plan-ceske-republiky-v-oblasti-energetiky-a-klimatu--252016/>
- [4] *Tomáš Smejkal (MPO): Role zemního plynu v rámci Integrovaného klimaticko-energetického plánu do roku 2030*. Podzimní plynárenská konference 9. - 10. 11. 2018. Sborník prezentací. Dostupné z: <https://www.cgoa.cz/vzdelavani.e-sborniky/>
- [5] *Roční zpráva o provozu plynárenské soustavy 2019*. In: *ERÚ* [online]. [cit. 2020-07-30]. Dostupné z: http://www.eru.cz/documents/10540/5380768/Rocni_zprava_provoz_PS_2019.pdf/bf492c79-4f89-4aa3-8cb6-d819f676487a
- [6] MARŠÁLEK, Jiří, Pavel BROŽ a Marek BOBÁK. *Complex biogas membráně upgrading to BioCNG at agriculture biogas plant*. *Chemical Papers* [online]. [cit. 2020-07-30]. DOI: 10.1007/s11696-020-01238-7. ISSN 2585-7290. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s11696-020-01238-7>
- [7] *BioCNG vyjíždí na české silnice*. www.innogy.cz [online]. [cit. 2020-07-30]. Dostupné z: <https://www.innogy.cz/o-innogy/innogy-magazin/magazin-prehled-clanku/biocng-vjizdi-na-ceske-silnice/>
- [8] *První výroba biometanu v České republice zahájena* [online]. [cit. 2020-07-30]. Dostupné z: <https://www.vakinfo.cz/prvni-vyroba-biometanu-v-ceske-republice-zahajena/>
- [9] *Praha je blíž vlastní bioplynové stanici, biometan by mohla vyrábět už za tři roky* [online]. [cit. 2020-07-30]. Dostupné z: <https://www.e15.cz/domaci/praha-je-bliz-vlastni-bioplynovy-panice-biometan-by-mohla-vyrabet-uz-za-tri-roky-1369449>
- [10] *Na Karvinsku má vyrůst teprve druhá výroba biometanu v Česku* [online]. [cit. 2020-07-30]. Dostupné z: <https://www.e15.cz/byznys/prumysl-a-energetika/na-karvinsku-ma-vyrust-teprve-druha-vyroba-biometanu-v-cesku-1368720>

- [11] *European Biogas Association - Annual report 2019* [online]. [cit. 2020-07-30]. Dostupné z: <https://www.europeanbiogas.eu/wp-content/uploads/2020/01/EBA-AR-2019-digital-version.pdf>
- [12] EYL-MAZZEGA, Marc-Antoine a Carole MATHIEU. *Biogas and Biomethane in Europe: Lessons from Denmark, Germany and Italy* [online]. Études de l'Ifri, 2019 [cit. 2020-07-30]. ISBN 979-10-373-0025-6. Dostupné z: https://www.ifri.org/sites/default/files/atoms/files/mathieu_eyl-mazzega_biomethane_2019.pdf
- [13] *EBA Statistical Report 2018* [online]. 2019 [cit. 2020-07-30]. Dostupné z: https://www.europeanbiogas.eu/wp-content/uploads/2019/05/EBA_Statistical-Report-2018_AbridedPublic_web.pdf
- [14] *Incentives for Anaerobic Digestion* [online]. [cit. 2020-07-30]. Dostupné z: <http://www.biogas-info.co.uk/about/incentives/>
- [15] *Biomethane: The Pathway to 2030: The no regrets option for the hardest to decarbonise sectors* [online]. 2020 [cit. 2020-07-30]. Dostupné z: http://adbioresources.org/docs/Biomethane_-_Pathway_to_2030_-_Full_report.pdf
- [16] *Global Gas Report 2019* [online]. 2019 [cit. 2020-07-30]. Dostupné z: <https://www.igu.org/resources/global-gas-report-2019-2/>
- [17] PANDEY, Ashok. *Biomass, Biofuels, Biochemicals: Biofuels: Alternative Feedstocks and Conversion Processes for the Production of Liquid and Gaseous Biofuels* [online]. 2nd ed. San Diego, 2019 [cit. 2020-07-30]. Biomass, Biofuels, Biochemicals Ser. ISBN 978-012-8173-114.
- [18] BAUER, Fredric, Tobias PERSSON, Christian HULTEBERG a Daniel TAMM. Biogas upgrading – technology overview, comparison and perspectives for the future. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining* [online]. 2013, 7(5), 499-511 [cit. 2020-08-06]. DOI: 10.1002/bbb.1423. ISSN 1932104X. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/bbb.1423>
- [19] MUÑOZ, Raúl, Leslie MEIER a Israel DIAZ. A review on the state-of-the-art of physical/chemical and biological technologies for biogas upgrading. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology* [online]. 2015, (14), 727-759 [cit. 2020-07-30]. DOI: s11157-015-9379-1. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11157-015-9379-1>
- [20] *Průvodce výrobou a využitím bioplynu* [online]. 2009 [cit. 2020-07-30]. Dostupné z: https://www.mpo-efekt.cz/upload/7799f3fd595e0001fa66875530f33e8a/Pruvodce_vyrobou_vyuzitim_bioplynu_2.pdf
- [21] *BIOPLYN* [online]. [cit. 2020-07-30]. Dostupné z: <https://biom.cz/upload/6e01d6d4c4835ec93cda508772f3bf6e/bioplyn.pdf>

- [22] CO2 Capture with MEA using Aspen Plus. *Youtube.com* [online]. [cit. 2020-07-30].
Dostupné z:
<https://www.youtube.com/playlist?list=PLPNWwk0JcMbv8g55NRREoO1W5hye0cle>
- [23] MADDEDU, Claudio, Massimiliano ERRICO a Roberto BARATTI. *CO2 Capture by Reactive Absorption-Stripping* [online]. Springer, Cham, 2019 [cit. 2020-07-30]. ISBN 978-3-030-04579-1. Dostupné z: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-04579-1>
- [24] VIKTORA, Stanislav. *Způsoby separace CO2*. Praha, 2019. Diplomová práce. ČVUT. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/84895>
- [25] CAPRA, Federico, Federico FETTARAPPA, Francesco MAGLI, Manuele GATTI a Emanuele MARTELLI. Biogas upgrading by amine scrubbing: solvent comparison between MDEA and MDEA/MEA blend. *Energy Procedia* [online]. 2018, **148**, 970-977 [cit. 2020-07-30]. DOI: 10.1016/j.egypro.2018.08.065. ISSN 18766102. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1876610218303564>
- [26] XU, Yajing, Ying HUANG, Bin WU, Xiangping ZHANG a Suojiang ZHANG. Biogas upgrading technologies: Energetic analysis and environmental impact assessment. *Chinese Journal of Chemical Engineering* [online]. 2015, **23**(1), 247-254 [cit. 2020-07-30]. DOI: 10.1016/j.cjche.2014.09.048. ISSN 10049541. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S100495411400158X>
- [27] KOZLOVA, A. A., M. M. TRUBYANOV, A. A. ATLASKIN, N. R. YANBIKOV a M. G. SHALYGIN. Modeling Membrane Gas and Vapor separation in the Aspen Plus Environment. *Membranes and Membrane Technologies* [online]. 2019, **1**(1), 1-5 [cit. 2020-07-30]. DOI: 10.1134/S2517751619010049. ISSN 2517-7516. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1134/S2517751619010049>
- [28] HAIDER, Shamim, Arne LINDBRÅTHEN a May-Britt HÄGG. *Techno-economical evaluation of membrane based biogas upgrading system: A comparison between polymeric membrane and carbon membrane technology* [online]. 2016, **1**(3), 222-234 [cit. 2020-07-30]. DOI: 10.1016/j.gee.2016.10.003. ISSN 24680257. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2468025716300590>
- [29] HAIDER, Shamim, Arne LINDBRÅTHEN, Jon Arvid LIE, Petter Vattekar CARSTENSEN, Thorbjørn JOHANNESSEN a May-Britt HÄGG. *Vehicle fuel from biogas with carbon membranes; a comparison between simulation predictions and actual field demonstration* [online]. 2018, **3**(3), 266-276 [cit. 2020-07-30]. DOI: 10.1016/j.gee.2018.03.003. ISSN 24680257. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2468025717301887>
- [30] MEMSIC [online]. [cit. 2020-07-30]. Dostupné z: <http://memsic.tech/memsic/>
- [31] HOORFAR, Mina, Yousif ALCHEIKHHAMDON a Bo CHEN. *A novel tool for the modeling, simulation and casting of membrane based gas separation processes using Aspen HYSYS: Optimization of the CO2/CH4 separation process* [online]. 2018, **117**, 11-24

- [cit. 2020-07-30]. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2018.05.013. ISSN 00981354.
Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0098135418301509>
- [32] CERVEIRA, Graziela Salvan, Cristiano Piacsek BORGES a Frederico de Araujo KRONEMBERGER. Gas permeation applied to biogas upgrading using cellulose acetate and polydimethylsiloxane membranes. *Journal of Cleaner Production* [online]. 2018, **187**, 830-838 [cit. 2020-07-30]. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.03.008. ISSN 09596526. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652618306577>
- [33] ROBESON, Lloyd M. Correlation of separation factor versus permeability for polymeric membranes. *Journal of Membrane Science* [online]. 1991, **62**(2), 165-185 [cit. 2020-07-30]. DOI: 10.1016/0376-7388(91)80060-J. ISSN 03767388. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/037673889180060J>
- [34] ROBESON, Lloyd M. The upper bound revisited. *Journal of Membrane Science* [online]. 2008, **320**(1-2), 390-400 [cit. 2020-07-30]. DOI: 10.1016/j.memsci.2008.04.030. ISSN 03767388. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0376738808003347>
- [35] CHEN, XiaoYuan, Hoang VINH-THANG, Antonio Avalos RAMIREZ, Denis RODRIGUE a Serge KALIAGUINE. Membrane gas separation technologies for biogas upgrading. *RSC Advances* [online]. 2015, **5**(31), 24399-24448 [cit. 2020-07-30]. DOI: 10.1039/C5RA00666J. ISSN 2046-2069. Dostupné z: <http://xlink.rsc.org/?DOI=C5RA00666J>
- [36] MOLINO, A., F. NANNA, M. MIGLIORI, P. IOVANE, Y. DING a B. BIKSON. Experimental and simulation results for biomethane production using peek hollow fiber membrane. *Fuel* [online]. 2013, **112**, 489-493 [cit. 2020-07-30]. DOI: 10.1016/j.fuel.2013.04.046. ISSN 00162361. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0016236113003475>
- [37] HARASIMOWICZ, M., P. ORLUK, G. ZAKRZEWSKA-TRZNADEL a A.G. CHMIELEWSKI. Application of polyimide membranes for biogas purification and enrichment. *Journal of Hazardous Materials* [online]. 2007, **144**(3), 698-702 [cit. 2020-07-30]. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2007.01.098. ISSN 03043894. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0304389407001653>
- [38] DITL, Pavel a Michal NETUŠIL. *Bilancování a simulace systémů v MS Excel*. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2018. ISBN ISBN978-80-01-06396-5.
- [39] *NOTWENDIGKEIT UND CHANCEN FÜR POWER-TO-X-TECHNOLOGIEN* [online]. [cit. 2020-07-30]. Dostupné z: https://www.uniper.energy/storage/sites/default/files/2017-12/2017_okt_energiawirtschaftliches_kurzgutachten_fur_ptx-allianz.pdf
- [40] *Výzva VI programu podpory NÍZKOUHLÍKOVÉ TECHNOLOGIE –Úpravu bioplynu na biometan a jeho vtláčení do sítě nebo jeho plnění v rámci místní infrastruktury* [online]. [cit. 2020-07-30]. Dostupné z:

<https://www.mpo.cz/assets/cz/podnikani/dotace-a-podpora-podnikani/oppik-2014-2020/vyzvy-op-pik-2020/2020/7/VI--vyzva-vtlaceni-bioplynu.pdf>

- [41] *Současnost a budoucnost provozní podpory POZE: Bioplyn, biomasa* [online]. [cit. 2020-07-30]. Dostupné z: https://czbiom.cz/konf/files/3_Arnoldova%CC%81-Sou%C4%8Dasnost-a-budoucnost-provozn%C3%AD-podpory-POZE.pdf
- [42] *Pavel Zámyslický (MŽP): Možnosti financování*. 20. Energetický kongres ČR 13. 2. 2020. Poznámky autora. Sborník dostupný online z: <https://www.business-forum.cz/cz/prezentace-20-energeticky-kongres-cr>
- [43] *Just transition fund* [online]. [cit. 2020-07-30]. Dostupné z: <https://www.niedermayer.cz/o-eu-a-cr-v-ni/articles/just-transition-fund>
- [44] *Fond pro spravedlivou transformaci* [online]. [cit. 2020-07-30]. Dostupné z: https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal/actions-being-taken-eu/just-transition-mechanism/just-transition-funding-sources_cs
- [45] Interní analýza společnosti E.ON ČR, s.r.o. poskytnutá autorovi
- [46] *Cenové rozhodnutí Energetického regulačního úřadu č. 3/2019 ze dne 26. září 2019, kterým se stanovuje podpora pro podporované zdroje energie*. In: . Jihlava, 2019, ročník 19. Dostupné také z: <https://www.eru.cz/cs/-/eru-vydal-cenove-rozhodnuti-pro-podporovane-zdroje-energie>
- [47] *Vláda schválila snížení podpory pro solární elektrárny* [online]. [cit. 2020-08-06]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektrarny-cr/vlada-schvalila-snizeni-podpory-pro-solarni-elektrarny>

8. Seznam obrázků

Obrázek 1: Schéma cíle Energie z OZE [3]	9
Obrázek 2: Cíle podílů OZE v sektoru dopravy dle MPO [4]	9
Obrázek 3: Vývoj dodávek CNG do plnicích stanic a jejich počet [5]	10
Obrázek 4: Vývoj počtu biometanových stanic v Evropě [11]	13
Obrázek 5: Vývoj počtu biometanových stanic v Německu [12]	14
Obrázek 6: Podíly jednotlivých technologií na upgradu bioplynu v Německu	14
Obrázek 7: Vývoj počtu biometanových stanic ve Francii [16]	16
Obrázek 8: Vývoj výroby bioplynu a biometanu v Dánsku [12]	17
Obrázek 9: Schéma technologie upgradu bioplynu vodní vypírkou [18]	18
Obrázek 10: Schéma technologie upgradu bioplynu chemickou absorbcí [18]	20
Obrázek 11: Schéma technologie upgradu bioplynu metodou PSA [18]	22
Obrázek 12: Schéma technologie upgradu bioplynu membránovou separací [18]	24
Obrázek 13: Schéma technologie upgradu bioplynu desorpcí in situ [19]	26
Obrázek 14: Základní dělení nastavení programu Aspen Plus	29
Obrázek 15: Seznam použitých sloučenin pro uvedenou simulaci	29
Obrázek 16: Nastavení výpočtových metod pro simulaci	30
Obrázek 17: Seznam použitých chemických rovnic	30
Obrázek 18: Schéma simulované linky	31
Obrázek 19: Schéma s výsledky po dokončení výpočtu	34
Obrázek 20: Robesonova křivka [35]	38
Obrázek 21: Vztah čistoty a výtěžnosti pro CA a PDMS membránu [32]	39
Obrázek 22: Schéma a průtoky třístupňového zapojení s recyklem; celulózová membrána [32]	39
Obrázek 23: Schéma bilancované membránové separace	40
Obrázek 24: Schéma s výslednými průtoky složek v prouděch	43
Obrázek 25: S křivka vývoje technologií [39]	45
Obrázek 26: Vliv prodeje tepla NPV projektu uvažující kogenerační jednotku	56
Obrázek 27: Vliv pořizovací ceny na NPV projektu uvažující upgrade bioplynu aminovou vypírkou ...	57
Obrázek 28: Vliv výkupní ceny biometanu na NPV projektu uvažující upgrade bioplynu aminovou vypírkou	57
Obrázek 29: Vliv investiční dotace na NPV projektu uvažující upgrade bioplynu aminovou vypírkou .	58
Obrázek 30: Vliv pořizovací ceny na NPV projektu uvažující upgrade membránovou separací	59
Obrázek 31: Vliv výkupní ceny biometanu na NPV projektu uvažující upgrade membránovou separací	59
Obrázek 32: Vliv investiční dotace na NPV projektu uvažující upgrade membránovou separací	60

9. Seznam tabulek

Tabulka 1: Parametry biometanové stanice v EFG Rapotín	11
Tabulka 2: Obecné složení bioplynu [21]	27
Tabulka 3: Složení vsádek a výsledný podíl metanu v bioplynu	27
Tabulka 4: Uvažované složení bioplynu na vstupu do linky	28
Tabulka 5: Nastavení absorpční kolony	32
Tabulka 6: Nastavení čerpadla	32
Tabulka 7: Nastavení víceproudého výměníku tepla	32
Tabulka 8: Nastavení stripperu	33
Tabulka 9: Nastavení výměníku	33
Tabulka 10: Porovnání molárního složení bioplynu a biometanu	34
Tabulka 11: Porovnání hmotnostních průtoků bioplynu a biometanu	35
Tabulka 12: Výsledné parametry uvažované aminové vypírky	35
Tabulka 13: Složení absorpčního roztoku	35
Tabulka 14: Přehled vlastností vybraných membrán [32]	37
Tabulka 15: Porovnání výsledků jednostupňové a třístupňové separace [32]	39
Tabulka 16: Seznam proudů ze schématu	40
Tabulka 17: Seznam aparátů ze schématu	40
Tabulka 18: Seznam složek ze schématu	41
Tabulka 19: Incidenční matice	41
Tabulka 20: Tabulka dat	41
Tabulka 21: Počet bilančních rovnic	42
Tabulka 22: Doplnkové vztahy	42
Tabulka 23: Výsledné průtoky složek v prouděch	43
Tabulka 24: Výsledné parametry uvažované membránové separace	44
Tabulka 25: Výchozí parametry ekonomické bilance	48
Tabulka 26: Ceny energií a bioplynu [45]	49
Tabulka 27: Investiční náklady jednotlivých technologií	50
Tabulka 28: Provozní náklady jednotlivých technologií	51
Tabulka 29: Příjmy projektu podle jednotlivých technologií	52
Tabulka 30: Parametry vyhlášené investiční dotace [40]	55
Tabulka 31: Ekonomické parametry nadějných scénářů membránové separace	60
Tabulka 32: Předpoklady a výsledky optimisticko-realistického scénáře	61

10. Seznam použitých zkratek

CNG.....	Compressed Natural Gas
MS.....	Microsoft
OZE.....	obnovitelné zdroje energie
MPO.....	Ministerstvo průmyslu a obchodu
OTE.....	Operátor trhu s elektřinou
PSA.....	Pressure Swing Adsorption
VSA.....	Vacuum Swing Adsorption
TSA.....	Temperature Swing Adsorption
BPS.....	bioplynová stanice
MEA.....	Monoethanolamine
ENTRL-RK.....	Unsymmetric Electrolyte NRTL-Redlich-Kwong
PC-SAFT.....	Statistical Associating Fluid Theory
PFD.....	Process Flow Diagram
OP PIK.....	Operační Program Podnikání, inovace a konkurenceschopnost
ERÚ.....	Energetický regulační úřad
CZT.....	Centrální zásobování teplem
CAPEX.....	Capital Expenditures
OPEX.....	Operating Expense
KGJ.....	kogenerační jednotka
PDN.....	prostá doba návratnosti
CF.....	cash flow
NPV.....	Net Present Value
IRR.....	Internal Rate of Return
WACC.....	Weighted Average Cost of Capital

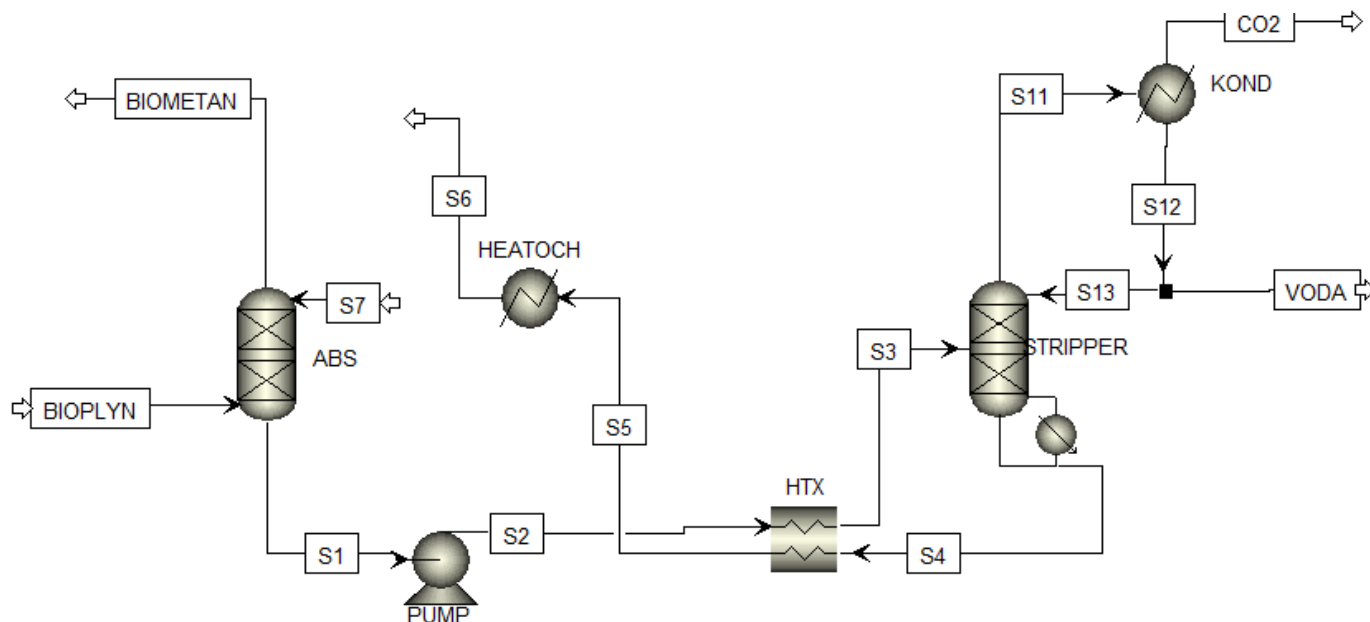
11. Seznam použitých symbolů

P	permeabilita	[Barrer]
α	selektivita	[-]
\dot{V}	objemový průtok	[m ³ /hod]
c	koncentrace	[-]
CF_rok	roční cash flow	[Kč]

12. Seznam příloh

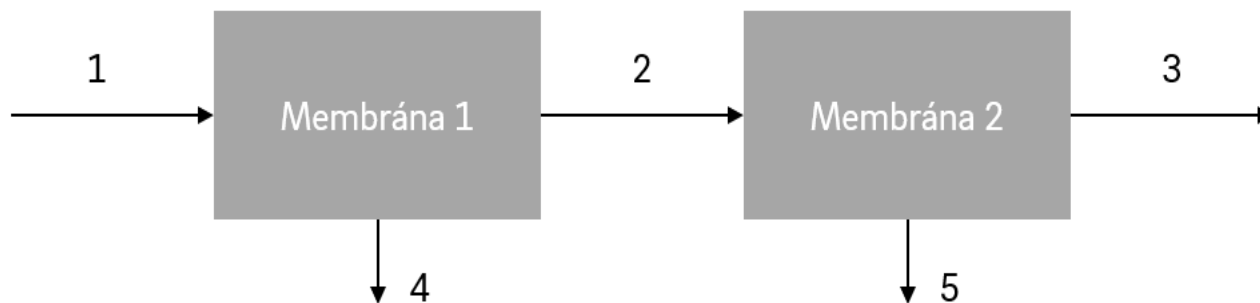
1. Příloha 1 – PFD schéma aminové vypírky z programu Aspen Plus
2. Příloha 2 – PFD schéma membránové separace z programu MS Excel
3. Příloha 3 – Matice koeficientů a vektor pravých stran

Příloha 1 – PFD schéma aminové výpírky z programu Aspen Plus



	Jednotky	BIOMETAN	BIOPLYN	CO2	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S11	S12	S13	VODA
Teplota	C	40,012532	35	20	80,98332	81,33571	146,4585	240,386	65	40	40	132,3181	20	20	20
Tlak	Bar	1,1	1,2	4	1,11	5	5	4,02	4,02	3	3	4	4	4	4
Hm. průtok	kg/hr	92,158654	285	295,6161	2692,841	2692,841	2692,841	2500	2500	2500	2500	2586,05	2290,434	40	2250,434
MEA	kg/hr	0,0211926	0	0,018616	182,8307	183,0597	421,9928	610,4691	610,8859	610,6217	698,8453	1687,094	1686,715	29,45668	1657,258
H2O	kg/hr	6,0870554	1,792886	0,464549	1731,022	1730,966	1732,253	152,8612	163,0974	163,1406	1745,222	603,7559	603,185	10,53399	592,651
CO2	kg/hr	0,0003265	197,0941	6,40E-19	0,114568	0,117562	86,67888	3,57E-09	0,000637	4,48E-05	4,08E-06	1,92E-10	2,09E-20	3,64E-22	2,05E-20
H3O+	kg/hr	0	0	0	3,89E-07	3,96E-07	1,31E-06	1,53E-06	2,11E-09	3,64E-10	4,93E-10	0	1,35E-13	2,35E-15	1,32E-13
OH-	kg/hr	0	0	0	0,003506	0,003504	0,005511	1,59E-06	0,001199	0,001466	0,03578	0	0,100414	0,001754	0,09866
HCO3-	kg/hr	0	0	0	30,77029	30,9907	29,64567	6,11E-06	0,418838	0,157555	0,115346	0	1,55E-14	2,71E-16	1,53E-14
CO3-2	kg/hr	0	0	0	3,350486	3,319467	0,347575	34,70239	0,188448	0,300784	0,386013	0	2,79E-13	4,87E-15	2,74E-13
MEAH+	kg/hr	0	0	0	302,2108	302,1745	176,982	649,1784	613,4712	613,5892	21,35378	0	0,366582	0,006402	0,36018
MEACOO-	kg/hr	0	0	0	442,4765	442,1472	244,8729	1052,789	1111,936	1112,189	34,04152	0	4,54E-10	7,93E-12	4,46E-10
N2	kg/hr	1,393347	1,393955	277,4464	0,000608	0,000608	0,000608	9,12E-14	0	0	0	277,5056	0,059124	0,001033	0,058091
H2	kg/hr	0,1002419	0,10031	0	6,86E-05	6,86E-05	6,86E-05	7,99E-29	0	0	0	1,45E-28	0	0	0
CH4	kg/hr	84,556491	84,61876	17,6865	0,062268	0,062268	0,062268	7,17E-10	7,17E-10	7,17E-10	0	17,69469	0,008191	0,000143	0,008048

Příloha 2 – PFD schéma membránové separace z programu MS Excel



	Jednotky	1	2	3	4	5
Celkový průtok	m3/hod	222,8634	118,699	115,0279	104,1644	3,671103
CH4	m3/hod	118,1176	113,951	113,8776	4,166577	0,073422
CO2	m3/hod	104,7458	4,74796	1,150279	99,99786	3,597681

Příloha 3 – Matice koeficientů a vektor pravých stran

Proud			1	1	2	2	3	3	4	4	5	5
Složka			1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Neznámá	Aparát	Složka	V1;1	V1;2	V2;1	V2;2	V3;1	V3;2	V4;1	V4;2	V5;1	V5;2
	1	1	1	0	-1	0	0	0	-1	0	0	0
	1	2	0	1	0	-1	0	0	0	-1	0	0
	2	1	0	0	1	0	-1	0	0	0	-1	0
	2	2	0	0	0	1	0	-1	0	0	0	-1
		Ref. proud	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		konc P1S1	-0,47	0,53	0	0	0	0	0	0	0	0
		konc P2S1	0	0	-0,04	0,96	0	0	0	0	0	0
		konc P4S2	0	0	0	0	0	0	0,96	-0,04	0	0
		konc P5S2	0	0	0	0	0	0	0	0	0,98	-0,02
		konc P3S1	0	0	0	0	-0,01	0,99	0	0	0	0

0
0
0
0
118,1176
0
0
0
0
0