



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
ENERGY INSTITUTE

## MODERNÍ BIOPLYNOVÁ STANICE JAKO SOUČÁST „SMART REGIONS“

MODERN BIOGAS STATION AS PART OF “SMART REGIONS“

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Bc. JAKUB HORÁK

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

Ing. MARTIN LISÝ, Ph.D.

BRNO 2015



Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

Akademický rok: 2014/15

## **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**

student(ka): Bc. Jakub Horák

který/která studuje v **magisterském studijním programu**

obor: **Energetické inženýrství (2301T035)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

### **Moderní bioplynová stanice jako součást „Smart Regions“**

v anglickém jazyce:

### **Modern Biogas Station as Part of "Smart Regions"**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem diplomové práce bude implementace výpočtového modelu bioplynové stanice do celkové koncepce inteligentního regionu ve vazbě na síť rozvodu tepla a chladu.

Cíle diplomové práce:

1. Popis moderní bioplynové stanice s technologií výroby elektřiny a produkce tepla s cílem vyspecifikovat hlavní technologické a energetické parametry pro výpočtový model.
2. Zvolit vhodné SW prostředí a zpracovat výpočtový model tak, aby mohl komunikovat s nadřazeným modelem celé sítě rozvodu tepla a chladu
3. Provést technicko – ekonomické porovnání provozu bioplynové stanice bez připojení na síť rozvodu tepla a chladu a s připojením na síť rozvodu tepla a chladu.

Seznam odborné literatury:

Jaroslav Koudřa: Bioplynové stanice s mokrým procesem, Vydavatelství: Informační centrum ČKAIT, 2008

Fereidoon Sioshansi: Smart Grid, 2011, ISBN 0123864526

Internetové zdroje

Vedoucí diplomové práce: Ing. Martin Lisý, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/15.

V Brně, dne 19.11.2014



*J. Pospíšil*

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.  
Ředitel ústavu

*J. Katolický*

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
Děkan

# ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá vytvořením výpočtového modelu bioplynové stanice a jeho využitím v koncepci inteligentního regionu se zaměřením na síť rozvodu tepla a chladu. V úvodu práce je provedena rešerše technologie bioplynové stanice. Rešerše je zaměřena na popis moderní bioplynové stanice a vypsycifikování technologických a energetických parametrů nutných pro výpočtový model. Další část práce se zabývá analýzou dynamiky provozu bioplynové stanice a možnostmi využití odpadního tepla z bioplynové stanice. Poslední, a také nejdůležitější, část práce popisuje vlastní návrh výpočtového modelu a možnosti připojení bioplynové stanice k síti rozvodů tepla a chladu.

## Klíčová slova

Anaerobní fermentace, bioplyn, bioplynová stanice, inteligentní region, kogenerační jednotka, matematický model, síť rozvodů tepla a chladu, udržitelné využívání odpadního tepla.

# ABSTRACT

This thesis deals with the design of computational model of a biogas plant and its use in the concept of intelligent region with focusing on district heating and cooling network. The introduction contains review of technology used in the biogas plant. This review covers the description of modern biogas plants and determination of the energy and technology parameters for computational model of biogas plant. The next part of thesis describes analyze of the dynamics of the operation and the possibilities of using waste heat from biogas plant. The last and also the most important part is based on design of computational model of a biogas plant and design of connection of a biogas plant to the district heating and cooling network.

## Key words

Anaerobic fermentation, biogas, biogas plant, CHP unit, mathematical model, heating and cooling networks, Smart Region, sustainable usage of waste heat.

## **Bibliografická citace**

HORÁK, J. *Moderní bioplynová stanice jako součást „Smart Regions“*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 74 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Martin Lisý, Ph.D.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Moderní bioplynová stanice jako součást „Smart Regions“ vypracoval samostatně pod vedením vedoucího práce s užitím uvedené odborné literatury a podkladů.

V Brně dne 29. 5. 2015

Podpis: .....

## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Martinu Lisému. Ph.D. za cenné připomínky a rady při vypracování této práce.

Mé velké poděkování patří také rodině a přátelům za podporu při psaní této diplomové práce i během celé doby vysokoškolského studia.



# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod .....</b>	<b>11</b>
<b>2</b>	<b>Bioplyn .....</b>	<b>12</b>
2.1	Vznik bioplynu .....	12
2.1.1	Mechanismus tvorby bioplynu .....	12
2.1.2	Faktory ovlivňující tvorbu bioplynu .....	14
2.2	Vsázkové materiály .....	16
2.2.1	Chemické složení substrátu .....	17
2.2.2	Výtěžnost vsázkových materiálů .....	18
<b>3</b>	<b>Bioplynová stanice .....</b>	<b>20</b>
3.1	Zemědělská bioplynová stanice .....	21
3.2	Čistírenská BPS .....	22
3.3	Ostatní BPS .....	23
<b>4</b>	<b>Využití tepla z bioplynové stanice .....</b>	<b>24</b>
4.1	Stávající možnosti využití tepla .....	24
4.1.1	Vytápění .....	25
4.1.1.1	Dálkové vytápění .....	26
4.1.1.2	Stáje .....	28
4.1.1.3	Skleníky .....	28
4.1.1.4	Akvakultury .....	28
4.1.1.5	Přenos tepla v zásobnících .....	29
4.1.2	Chlazení .....	30
4.1.2.1	Absorpční chlazení .....	30
4.1.2.2	Možnosti využití chlazení z odpadního tepla .....	32
4.1.3	Sušení .....	32
4.1.4	Dodatečná výroba elektřiny .....	33
4.1.4.1	CRC systémy .....	33
4.1.4.2	ORC systémy .....	34
4.1.4.3	Kalinův cyklus .....	35
4.1.4.4	Stirlingův motor .....	36
4.1.4.5	Plynová turbína na využití spalin .....	37
4.1.4.6	FLEXIVIT .....	37
4.2	Smart district heating and cooling networks .....	38
4.2.1	Smart metering .....	39
4.2.2	Koncepty Smart district heating and cooling networks .....	40
<b>5</b>	<b>Dynamika bioplynové stanice .....</b>	<b>43</b>
5.1	Zimní provoz .....	43
5.2	Jarní provoz .....	45
5.3	Letní provoz .....	46
5.4	Vyhodnocení dynamiky bioplynové stanice .....	48

<b>6</b>	<b>Návrh bioplynové stanice .....</b>	<b>50</b>
6.1	Návrh výpočtového modelu.....	50
6.1.1	Vsázka.....	51
6.1.2	Proces anaerobní fermentace .....	52
6.1.2.1	Kinetika tvorby metanu .....	54
6.1.2.2	Denní výroba metanu.....	55
6.1.2.3	Denní výroba bioplynu .....	56
6.1.2.4	Denní produkce digestátu .....	57
6.1.2.5	Teplu potřebné pro vytápění fermentorů .....	58
6.1.3	Kogenerační jednotka .....	59
6.1.3.1	Výpočet elektrického výkonu .....	60
6.1.3.2	Výpočet tepelného výkonu .....	61
6.1.4	Výstupy z provozu bioplynové stanice .....	62
6.2	Napojení BPS na síť rozvodu tepla a chladu .....	63
6.3	Hodnocení modelu referenční bioplynové stanice .....	64
6.3.1	Technické vyhodnocení .....	65
6.3.2	Ekonomické vyhodnocení.....	65
<b>7</b>	<b>Závěr .....</b>	<b>67</b>
	<b>Seznam zdrojů .....</b>	<b>68</b>
	<b>Seznam symbolů a zkratk .....</b>	<b>71</b>
	<b>Seznam příloh .....</b>	<b>74</b>

# 1 Úvod

Bioplyn a bioplynové systémy v podobě bioplynových stanic (BPS) zažívají v posledních letech výrazný rozvoj. Míru rozvoje je možné dokumentovat na počtu bioplynových stanic, kdy v období od roku 2005 do května 2015 vzrostl počet provozovaných stanic ze 133 na 554. Tento rozvoj je způsoben značným technologickým pokrokem v možnostech výroby a využití bioplynu, díky kterému se z bioplynové stanice stává perspektivní technologie pro zpracování organických odpadů. Druhým výrazným impulsem rozvoje je zahrnutí bioplynových stanic mezi podporované zdroje energie. [1]

Bioplynová stanice představuje perspektivní zdroj pro výrobu elektrické a tepelné energie. V současnosti je však bioplynových stanic provozována pouze v režimu výroby elektrické energie a vyráběné teplo se dále nijak nevyužívá, obvykle z důvodu velké vzdálenosti stanice od potenciálních odběratelů tepla a překážek technického charakteru. Díky podpoře kombinované výroby elektřiny a tepla se však stále objevují nové perspektivní technologie a možnosti využívání odpadního tepla z bioplynových stanic.

Současně s vývojem nových technologií pro výrobní zdroje energií probíhá i vývoj nových řešení pro distribuční sítě. Hlavní pozornost vývoje se upíná na uplatnění konceptu energetiky „inteligentních“ regionů (měst), nazývaných „Smart Regions“ („Smart Cities“). Koncept „inteligentních“ regionů (měst) spočívá v používání „inteligentních“ sítí rozvodů energie (Smart Grids, Smart Networks). „Intelligence“ těchto sítí je založena velkým množstvím měřených parametrů, které umožňují řídit jednotlivé zdroje i spotřebiče a optimalizovat tak provoz sítě..

Diplomové práce vznikla v souvislosti s řešením projektu TE02000077 „Smart Regions - Buildings and Settlements. Information Modelling, Technology and Infrastructure for Sustainable Development.“

## 2 Bioplyn

Bioplyn se řadí mezi obnovitelné zdroje se širokými možnostmi využití. Mezi jeho přednosti patří upravitelnost, skladovatelnost a použitelnost k pohonu vozidel, výrobě elektrické energie v palivových člancích, výrobě tepla v plynových kotlích a kombinované výrobě v kogeneračních jednotkách.

Z fyzikálně-chemického hlediska se jedná o plynou směs metanu ( $\text{CH}_4$ ), oxidu uhličitého ( $\text{CO}_2$ ) a minoritních látek. V ideálním případě bioplyn tvoří směs  $\text{CH}_4$  a  $\text{CO}_2$  100 % objemu, s výraznou převahou metanu. V praxi získávaný bioplyn často obsahuje různé další plyny ( $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$ , Ar), příměsi ( $\text{H}_2\text{S}$ , HCN a další sloučeniny dusíku a síry) a stopové prvky. Přehled objemového zastoupení nejdůležitějších složek bioplynu je uveden v tabulce 2.1. [2][3]

Tab. 2.1 Elementární složení bioplynu [2]

Složka	Vzorec	Objemová koncentrace
Metan	$\text{CH}_4$	40–85 %
Oxid uhličitý	$\text{CO}_2$	20–50 %
Dusík	$\text{N}_2$	0–3 %
Sulfan	$\text{H}_2\text{S}$	0–2 %
Vodík	$\text{H}_2$	0–1 %
Kyslík	$\text{O}_2$	0–1 %

### 2.1 Vznik bioplynu

Bioplyn vzniká rozkladem a přeměnou organických látek působením metanotvorných organismů. Rozkladný a následný vyhnívací proces, nazývaný fermentace, probíhá pouze bez přístupu vzduchu a určité vlhkosti. Celý tento biochemický proces tvorby metanu se proto označuje jako anaerobní fermentace. [2]

#### 2.1.1 Mechanismus tvorby bioplynu

Anaerobní fermentace je složitý biochemický proces, který se skládá z celé řady fyzikálních, fyzikálně-chemických, biologických a chemických procesů. Fermentace probíhá v teplotním rozmezí 0–70 °C (v praxi se nejčastěji používá rozmezí 20–45 °C) a jejím výsledkem je tvorba bioplynu, s majoritní složkou metanem, a fermentačního zbytku (digestátu). Během procesu biometanizace nevzniká dostatečné množství tepla pro rozkladné a metanotvorné reakce, je proto nutné dodávat teplo k ohřevu reaktorů. [2][4]

Proces tvorby bioplynu se v současné době dělí podle skupin působících mikroorganismů do čtyř základních fází:

#### **Hydrolýza**

V první fázi dochází k rozkladu vysokomolekulárních látek z hlavních skupin lipidů, polysacharidů a proteinů na nízkomolekulární látky rozpustné ve vodě. Rozklad probíhá pomocí mimobuněčně působících hydrolytických enzymů, které produkují převážně fermentační bakterie. Vedle hydrolýzy obvykle probíhá i acidogeneze.

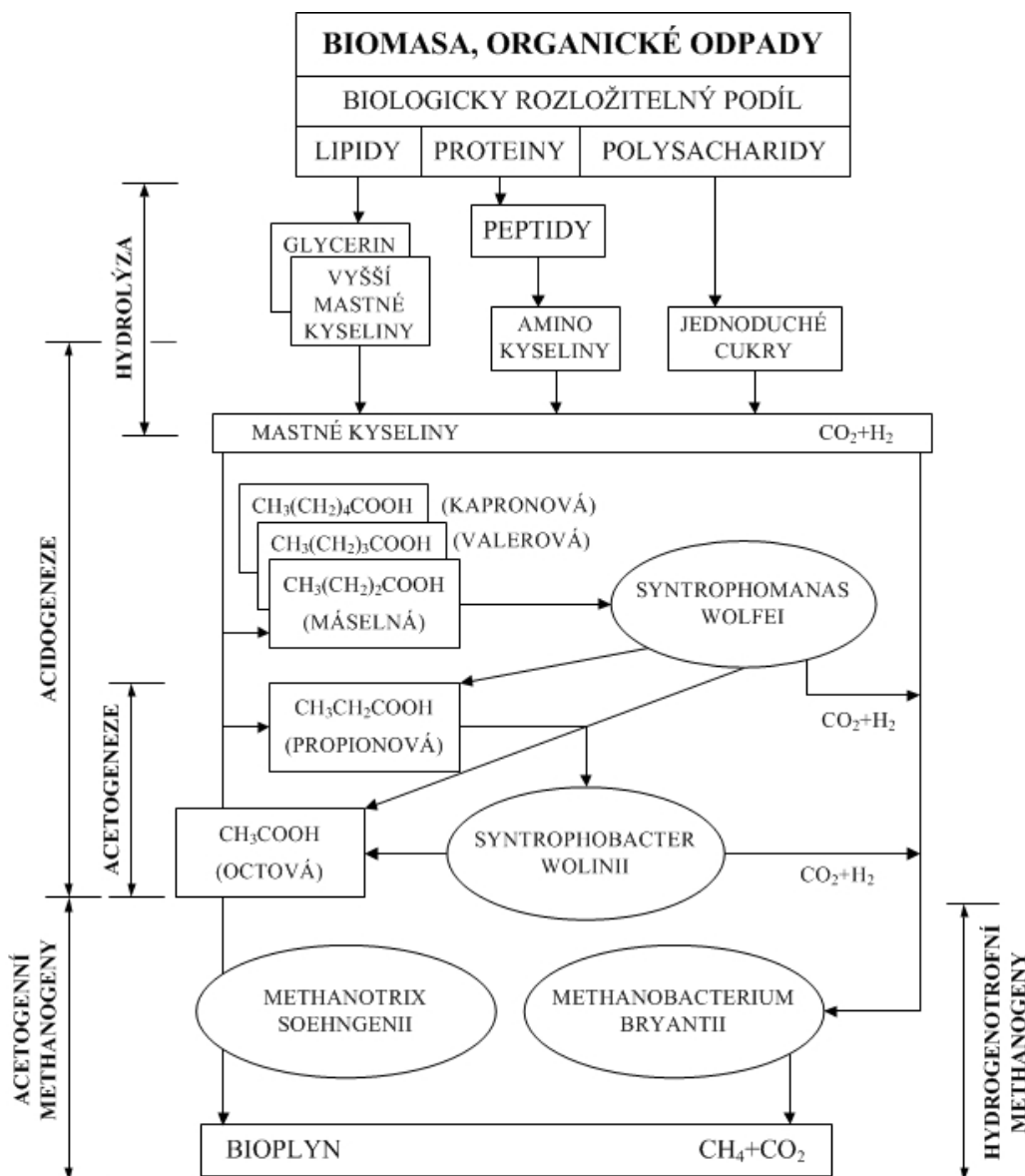
#### **Acidogeneze**

V průběhu acidogeneze dochází k rozkladu produktů z hydrolýzy na jednodušší látky ( $\text{H}_2$ ,

CO<sub>2</sub>, kyseliny a alkoholy). Druh a množství rozkladných produktů závisí na parciálním tlaku vodíku. Při vyšším hodnotách parciálního tlaku se tvoří kyselina mléčná, etanol, organické kyseliny apod., při nízkém parciálním tlaku vzniká kyselina octová, H<sub>2</sub> a CO<sub>2</sub>. Acidogeneze a hydrolýza, je zajištěna početnými kulturami bakterií z čeledí Streptococcaceae a Enterobacteriaceae a z rodů Bifidobacterium, Eubacterium a dalších.

**Acetogeneze**

Acetogeneze je zvláštní případ acidogeneze, obecněji označovaná jako syntrofní acidogeneze. Pro svou důležitou úlohu v procesu tvorby metanu je uváděna jako samostatná fáze. Podstata acetogeneze spočívá v přeměně vyšších organických kyselin na kyselinu octovou, vodík a oxid uhličitý za pomoci acidogenních kmenů bakterií, hlavně čeledí Syntrophobacter a Syntrophomonas.



Obr. 2.1 Schéma vzniku odpadu z biologicky rozložitelného materiálu [2]

**Metanogeneze**

Finální fáze tvorby metanu, kde dochází k rozkladu kyseliny octové metanogeními acetotrofními bakteriemi, např. čeledí *Methanotrix* a *Methanosarcina*, na oxid uhličitý a metan (2.1). Produkovaný oxid uhličitý je spolu s vodíkem je hydrogenotrofními bakteriemi, např. čeledí *Methanobacterium* a *Methanogenium*, přeměňován na metan (2.2). Existují však i druhy bakterií, např. druh *Methanococcus mazei* a *Methanosarcina barkeri*, které současně zvládají acetotrofní i hydrogenotrofní proces a ještě i proces hydrogenace methanolu (2.3).

**Důležité doprovodné procesy**

Pro hladký a plynulý průběh anaerobního procesu biomethanizace jsou důležité některé doprovodné anaerobní procesy. Mezi nejdůležitější patří homoacetogeneze, při které dochází působením bakterií ke tvorbě kyseliny octové bez doprovodné tvorby vodíku. Dalšími důležitými procesy jsou sulfátredukce a nitrátredukce, během kterých mikroorganismy spotřebovávají síronové, respektive dusičnanové anionty. [2.][3][4]

**2.1.2 Faktory ovlivňující tvorbu bioplynu**

Proces tvorby bioplynu je ovlivňován velkým množstvím faktorů. Základním faktorem pro zajištění stálého a stabilního procesu biomethanizace je udržování vhodných podmínek k životu bakterií a ostatních mikroorganismů, které je podílejí na tvorbě metanu. Dalším důležitým faktorem je omezení vnějších vlivů, které mohou mít nežádoucí účinek na proces biomethanizace. Mezi konkrétní faktory ovlivňující tvorbu bioplynu patří:

**Hodnota pH**

Koncentrace iontů  $H_3O^+$  ovlivňuje proces tvorby metanu přímo i nepřímo pomocí acidobazických rovnováh (rovnováha mezi vznikem a odbouráváním kyselin a zásad uvnitř organismu) anorganických a organických iontů, které se vyskytují v roztoku suspenze. Pro tvorbu metanu jsou důležité rovnováhy  $CO_2$ ,  $H_2S$ ,  $NH_3$ , kyseliny octové a propionové. Pro znázornění acidobazických rovnováh se používají tzv. logaritmické distribuční diagramy.

Metanogenní bakterie mají svá optima v oblasti pH 6,2–7,8. Některé druhy bakterií pracují v úzkém rozmezí pH, některé druhy mají pracovní rozmezí širší než obvyklé optimum. Obecně je pokles pH < 6 doprovázen inhibicí vznikem neionizovaných kyselin (kyselin, které nevyloučily vodíkové kationty do vodného roztoku) a při nárůstu pH > 7,6 inhibicí biomethanizace vlivem nárůstu volného amoniaku. Optimální oblast pH lze udržovat zvýšením množství kejdy a hnoje v substrátu, kde během fáze acidogeneze dokáží vyrovnat pH do žádaných hodnot. Kyselé substráty jako siláž, mléčné látky a výpalky je nutné upravit přidáním zásadité látky, obvykle přidáním vápna. [2]

**Inhibitory**

Organické kyseliny, antibiotika, chemoterapeutika, dezinfekční prostředky a těžké kovy mohou proces metanizace výrazně brzdit nebo úplně zastavit, pokud jsou v substrátu přítomny ve velkých koncentracích. Je proto nutné dbát na kvalitu vstupních surovin, tj. používat na ošetřování zvířat vhodná léčiva a na zemědělské plodiny vhodné postřiky a hnojiva. Dále

je nutné dbát, aby nedocházelo ke kontaminaci složek substrátu vlivem poruch zařízení, např. únik provozních kapalin, a vlivem úniku nežádoucích látek skladovaných ve stejném areálu.

### **Přísun živin**

Metanové bakterie nemají schopnost rozkládat složité látky, jako jsou tuky, bílkoviny, uhlovodíky (škrob, cukr) a celulóza v čisté formě. Živiny pro svou buněčnou stavbu potřebují dostávat ve formě minerálních látek, stopových prvků a rozpustných dusíkatých sloučenin. Hojné zastoupení těchto jednoduchých živin lze nalézt v kejďě, hnoji, v trávě, v kuchyňských a potravinářských odpadech – zbytky jídla, mláto, apod.

### **Rovnoměrný přísun substrátu**

Aby nedocházelo k nadměrnému zatížení plnicí zóny fermentoru, je nutné zajistit rovnoměrný přísun substrátu. Ideální přísun substrátu probíhá v co nejkratších intervalech, např. jednou až dvakrát denně, čímž se také zabrání většímu poklesu teploty v plnicí části fermentoru. Tyto podmínky platí nejen základní substrát (kejda, hnůj), ale i pro zvlášť dávkované vysoce koncentrované kofermentátory, např. tuky. [2][4]

### **Odplyňování substrátu**

Vysoký rozkladný výkon je podmíněn kontinuálním odvodem plynu ze substrátu. Pokud není plyn z fermentoru dostatečně odváděn, může dojít k jeho nahromadění ve fermentoru a k razantnímu zvýšení tlaku plynu. U řídkých substrátů dokonce dochází k samovolnému vzniku malých plynových bublin. Riziko nedostatečného odplyňování roste s obsahem sušiny v suspenzi. Účinným opatřením k zajištění dostatečného odplyňování se ukazuje promíchání obsahu fermentoru několikrát denně. [4][5]

### **Teplota uvnitř fermentoru**

Metanové bakterie jsou schopny pracovat v rozmezí 0 až 70 °C, některé kmeny až do teploty 90°C, při dosažení vyšších teplot však již umírají. Jako dolní pracovní hranice, kdy bakterie ještě aktivně pracují, se udává teplota 3 až 4 °C. Teploty pod bodem mrazu okamžitou smrt bakterií nezpůsobují, ale zamezí bakteriím provádět biochemické procesy.

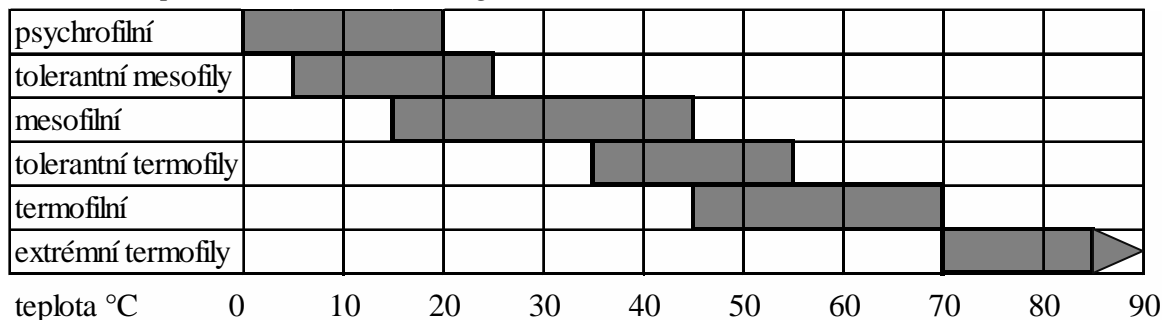
V praxi se mikroorganismy rozdělují do tří typických teplotních skupin:

- psychrofilní kmeny – teploty < 20 °C
- mesofilní kmeny – teploty mezi 15 °C a 45 °C
- termofilní kmeny – teploty > 45 °C

Rozdělení mikroorganismů a teplotních skupin je mnohými autory různě upravováno, častou úpravou je přidání meziskupin „termotolerantních druhů“ (tab. 2.1). Do „termotolerantních druhů“ jsou obvykle zařazovány druhy bakterií, které jsou schopny se adaptovat na nové podmínky s výrazně nižší teplotou oproti teplotám typické teplotní skupiny. [2][5]

Pro stabilní produkci bioplynu je nutné omezit teplotní výkyvy, které mají negativní vliv na metanogenní organismy. Obecně platí, že čím je teplota ve fermentoru vyšší, tím jsou bakterie citlivější na teplotní výkyvy, zejména na krátkodobé výkyvy s výraznějším poklesem teploty. Za tolerované denní teplotní výkyvy se v mesofilní teplotní oblasti považuje změna teploty o 2–3 °C, v termofilní oblasti změna o 1 °C. [2]

Tab. 2.2 Teplotní rozdělení mikroorganismů [2]



Teplota má, kromě stability produkce, vliv i na rychlost procesu biomethanizace. Se vzrůstající teplotou roste rychlost a účinnost rozkladu zpracovávaného substrátu, a tím i vzrůstá produkce bioplynu. Zvýšení teploty má též pozitivní efekt na úpravu a hygienizaci zpracovávané suspenze a tuhého zbytku, kdy vlivem vysoké teploty dochází k hluboké destrukci patogenů. Termofilní procesy však mají pro praxi významná negativa [4]:

- nižší obsah metanu v bioplynu
- vyšší náklady na ohřev reaktorů, případně na jejich izolaci
- vyšší koncentrace těkavých alifatických karboxylových kyselin, např. kyseliny octové, ve fugátu (separovaná kapalná část odpadu z fermentoru), čímž dochází k odchodu látek schopných metanizace z fermentoru. Bioplyn z termofilních procesů má tedy nižší obsah metanu.
- vyšší transfer volného amoniaku a sulfanu do fugátů, čímž dochází k jeho znehodnocování pro pozdější použití.

### Vlhké prostředí

Metanové bakterie nemohou žít v pevném substrátu, proto musí být v substrátu zastoupena voda nejméně z 50 %.

### Zabránění přístupu světla

Světlo bakterie neničí, ale má na ně výrazný brzdící účinek.

### Zabránění přístupu vzduchu

Methanogenní bakterie pracují pouze v anaerobním prostředí, takže obsahuje-li substrát kyslík, dojde k přerušení tvorby metanu. K obnovení tvorby metanu dojde až po spotřebování obsaženého kyslíku. [2]

## 2.2 Vsázkové materiály

Bioplynové stanice umožňují zpracovat velké množství odpadu organického původu a organického materiálu, jenž lze jinak pouze velmi obtížně zpracovat:

- bioodpady z domácností a zahrad
- bioodpady z potravinářských provozů (lihovary, masokombináty, pekárny, pivovary)
- bioodpady z údržby veřejné zeleně
- cíleně pěstovaná biomasa (kukuřice, senáž)
- prošlé potraviny a bioodpady z obchodu
- výstupy z chovu hospodářských zvířat (hnůj, kejda, podestýlka)
- zbytky z jídelen, restaurací a hotelu



Materiály zpracovávané v bioplynových stanicích musí splňovat kritéria kvality, která jsou dána nařízeními Evropského parlamentu a Rady (ES), např. nařízení č. 1774/2002, nebo technickými doporučení GAS. [4][5][6]

Při skladbě vsázky pro bioplynovou stanici je nutné zhodnotit mnoho různých technických a ekonomických parametrů. Důležitým faktorem při volbě materiálu se ukazuje schopnost zajištění dlouhodobých dodávek vsázky ať už z vlastních zdrojů či přes smluvní závazky s dodavateli. Pouze pravidelné a dlouhodobé dodávky zaručí stabilní provoz. Na dlouhodobost dodávek se váže problém ekonomiky svozové vzdálenosti, kde obecně platí, že svozová vzdálenost by měla být co nejkratší. Důraz na ekonomiku svozu vzrůstá se snižováním ceny za zpracování dovážených materiálů a u materiálů s nízkou výtěžností, jako je např. kejda.

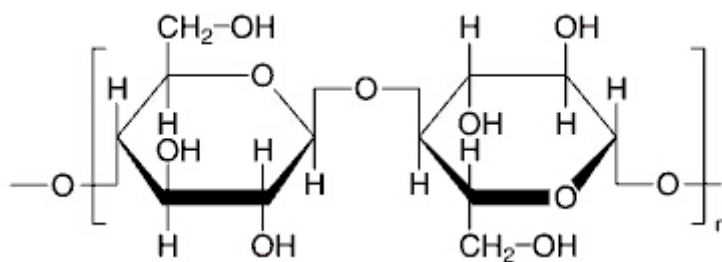
Po vyřešení dodávek vsázky patří mezi nejdůležitější parametry vlastní kvalita vsázkového materiálu, hlavně pak chemické složení substrátu a výtěžnost bioplynu, případně čistého metanu. Oba tyto parametry jsou podrobněji popsány níže. [5]

### 2.2.1 Chemické složení substrátu

V biologicky rozložitelných podílech odpadů a v biomase jsou z hlediska tvorby metanu významné chemické látky ze skupiny polysacharidů, lipidů a proteinů. Ve většině případů mají největší význam polysacharidy. Pouze u zpracování některých druhů odpadních vod a průmyslových odpadů, např. zejména živočišných zbytků z potravinářské výroby, jsou hlavním zdrojem pro vznik metanu lipidy a proteiny. [2]

#### Polysacharidy

Skupina polysacharidů tvoří buněčnou stavbu rostlinné biomasy. Buněčná struktura má kompozitní povahu a zjednodušeně si ji lze představit jako celulózová vlákna (celulózové fibrily) obtáčená rozvětvenými řetězci hemicelulóz, jejichž struktura jako celek je zpevňována síťovanou výplní fenylpropanoidů, ligninu a lignanu, a terpenů.



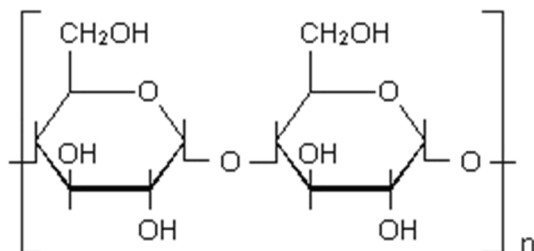
Obr. 2.2 Struktura celulózy [7]

Celulóza je schopna vytvářet různé prostorově orientované řetězce (spirální a lineární struktury), proto je nazývána „buněčnou armaturou“. Základním cukernou složku tvoří jednoduchý sacharid D-glukóza, která je v průměrném celulózovém řetězci za sebou vázána v počtu zhruba 1000 molekul. D-glukóza slouží jako živiny pro metanotvorné organismy a je získávána enzymatickým štěpením během hydrolýzy.

Hemicelulóza je mnohem složitější polysacharid než celulóza a obvykle má v rostlinné biomase větší zastoupení. Základní stavební prvek tvoří opět jednoduchý sacharid D-xylóza, jenž se váže do různých polysacharidů xylan. Ačkoli se hemicelulóza řadí mezi složité polysacharidy, tak podléhá enzymatické hydrolýze mnohem snáz než celulóza. [2][3]

Lignin, lignan a terpeny tvoří obtížně rozložitelnou složku rostlinné biomasy. Pro proces biometanizace mají negativní význam, protože zpožďují hydrolyzu a mohou způsobovat úhyn bakterií. Z procesu odcházejí v digestátu v nezměněné podobě. V digestátu se podílí na vzniku humusu a huminových kyselin a zvyšují tak hodnotnost digestátu jako hnojiva.

V rostlinách lze ještě nalézt jednu významnou skupinu polysacharidů, a to škroby. Škroby, obvykle sestavené z polysacharidů amylozy a amilopektinu, slouží jako energetická rezerva rostlin, snadno se proto rozkládají, a jako produkt rozkladu dodávají D-glukózu. [2]



Obr. 2.3 Struktura amylozy [8]

### Lipidy

Pro lipidy se někdy užívá nesprávný výraz „tuky“. „Tuky“, nebo-li triglyceridy vyšších mastných kyselin, však tvoří jen část skupiny lipidů. Do skupiny lipidů obecně patří všechny estery vyšších mastných kyselin zastoupených v rostlinné a živočišné hmotě. Nejčastěji se lze setkat s triglyceridy, kam patří např. kyselina olejová a stearová (zastoupené v rostlinných olejích) či cholesterol (zastoupený v živočišných tkáních). V procesu fermentace se lipidy štěpí na polyalkoholy, jejichž následné zpracování metanotvornými bakteriemi dosahuje vysokých výtěžků. Vysoké výtěžky jsou však kompenzovány velkým zatížením fermentoru.

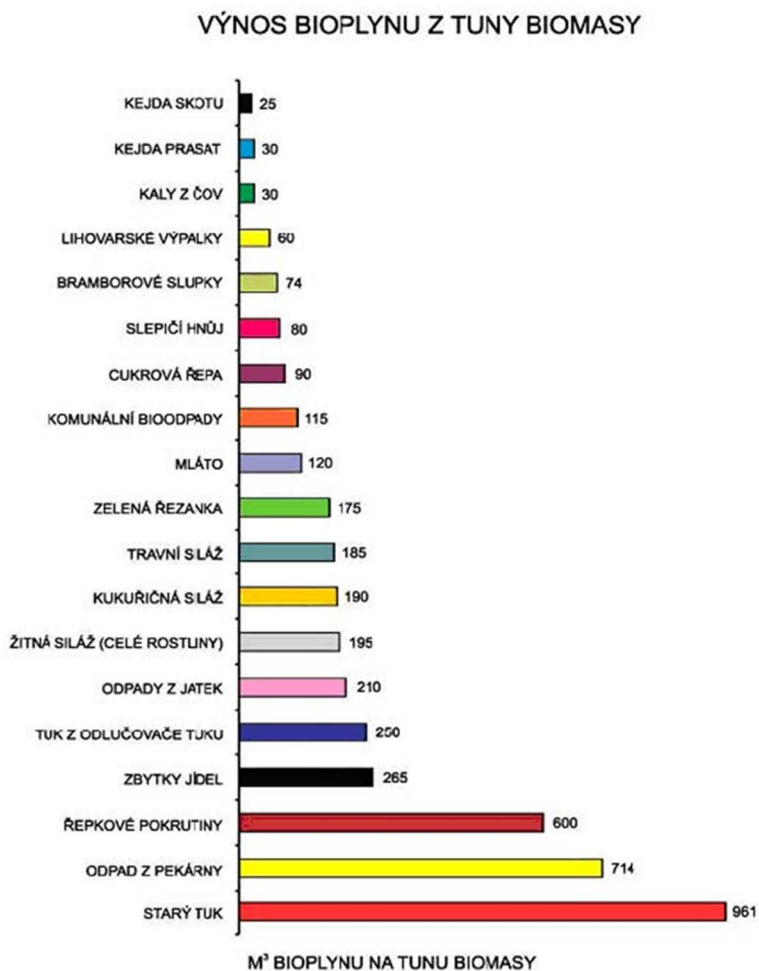
### Proteiny

Proteiny, nebo-li bílkoviny, se nalézají v rostlinných i živočišných tkáních. Obvykle se jedná o vysokomolekulární polymery aminokyselin, které jsou vzájemně řetězeny pomocí peptidických vazeb. Peptidické vazby jsou kovalentní vazby vytvářené při kondenzaci aminokyselin a obsahující seskupení atomů  $-CO-NH-$ . Při procesu fermentace dochází k rozbíjení těchto vazeb a rozpadu na jednotlivé aminokyseliny, které mohou metanotvorné organismy dále využít. [2][3]

## 2.2.2 Výtěžnost vsázkových materiálů

Hlavní kvalitativní vlastností, na níž závisí výtěžnost bioplynu, je obsah sušiny materiálu. Výtěžnost, nebo-li měrná produkce bioplynu, se tedy obvykle udává vzhledem k sušině, případně vzhledem ke hmotnosti materiálu. Teoretickou výtěžnost metanu či bioplynu lze stanovit pomocí tabelovaných průměrných hodnot (příklad uveden na obr. 2.2). Pokud není možné použít tabulkové hodnoty, provede se laboratorní stanovení obsahu sušiny konkrétního materiálu a výpočet podle příslušných rovnic. Laboratorního stanovení sušiny pro konkrétní materiál se používá např. u kejdy. Obsah sušiny v kejdě závisí na používaném krmivu pro hospodářská zvířata, použité technologii sběru a úpravě pro využití v bioplynové stanici.

Anaerobní fermentace je, jako každý proces realizovaný mikroorganismy, citlivá na kvalitu vstupního materiálu a podmínky prostředí, které jsou vedeny v podkapitole 2.1.2 Faktory ovlivňující tvorbu bioplynu. [2][3][9]



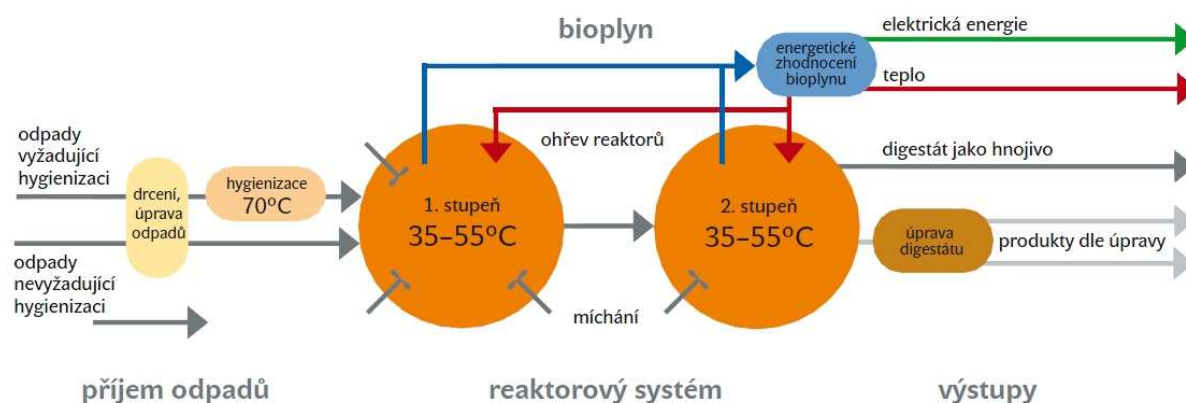
Obr. 2.2 Teoretická výtěžnost vstupních surovin [9]

### 3 Bioplynová stanice

Bioplynovou stanicí (BPS) lze obecně definovat jako technologické zařízení používající procesu anaerobní fermentace ke zpracování biologicky rozložitelných materiálů.

Na základě této definice je možné rozdělovat bioplynové stanice podle mnoha rozdílných kritérií. Mezi běžně používaná kritéria patří dělení podle fermentačního procesu na suchou a mokrou fermentaci.

Vzhledem k tomu, že v podmínkách střední Evropy se téměř výhradně používá mokrá anaerobní fermentace, se tato kapitola bude zabývat pouze mokrou anaerobní fermentací.



Obr. 3.1 Schéma mokré anaerobní fermentace [10]

Na základě legislativy ČR a EU se bioplynové stanice s mokrou fermentací dělí podle zpracovávaného substrátu na:

- zemědělské
- čistírenské
- ostatní

Legislativa také stanovuje podmínky schvalování a provozování bioplynových stanic. Pro schvalování BPS např. existuje Metodický pokyn vydaný Ministerstvem životního prostředí – sekcí ochrany klimatu a ovzduší a sekcí technické ochrany ŽP „K podmínkám schvalování bioplynových stanic před uvedením do provozu“. Tento metodický pokyn sjednocuje přístup orgánů státní správy při schvalovacím procesu a uvádí požadavky na stavbu, vybavenost a provoz technologií a dalších technickoorganizačních opatření. Dále také popisuje nakládání se vstupními surovinami, odpady a substrátem. [10]

Na základě výše uvedeného metodického pokynu a doporučení uznávaných autorit v oboru, společnosti GAS a České bioplynové asociace, jsou pro bioplynovou stanicí nejdůležitější následující předpisy [11]:

- fáze návrhu BPS
  - zákon č. 183/2006 Sb., o územním plánování a stavebním řádu, ve znění pozdějších předpisů („stavební zákon“)
  - zákon č. 100/2001 Sb., o posuzování vlivů na životní prostředí a o změně některých souvisejících zákonů („zákon o posuzování vlivů na životní prostředí“)
  - zákon č. 185/2001 Sb., o odpadech a o změně některých dalších zákonů
  - zákon č. 500/2004 Sb., správní řád

- fáze povoloovacího procesu (kolaudační proces)
  - zákon č. 254/2001 Sb., o vodách a o změně některých zákonů („vodní zákon“)
  - zákon č. 86/2002 Sb., o ochraně ovzduší a o změně některých dalších zákonů („zákon o ochraně ovzduší“)

### 3.1 Zemědělská bioplynová stanice

Zemědělské bioplynové stanice jsou definované jako bioplynové stanice, které zpracovávají materiály rostlinného charakteru a statkových hnojiv, resp. podestýlky. Na těchto bioplynových stanicích není možné zpracovávat odpady podle zákona o odpadech č. 185/2001 Sb., a ani vedlejší živočišné produkty spadající pod Nařízení Evropského parlamentu a Rady (ES) č. 1069/2009. [10]

Tyto bioplynové stanice jsou tedy určeny pro zpracování následujících materiálů [11]:

- Živočišné suroviny
  - kejda prasat
  - hnůj prasat se stelivem
  - kejda skotu
  - hnůj skotu se stelivem
  - hnůj a stelivo z chovu koní, koz, králíků
  - drůbeží exkrementy, vč. steliva
- Rostlinné suroviny
  - sláma všech typů obilovin i olejin
  - plevy a odpad z čištění obilovin
  - bramborová nať i slupky z brambor
  - řepná nať z krmné i cukrové řepy
  - kukuřičná sláma i jádro kukuřice
  - travní biomasa nebo seno (senáže)
  - nezkrmitelné rostlinné materiály (siláže, obiloviny, kukuřice)
- Pěstovaná biomasa
  - obiloviny v mléčné zralosti (celé rostliny) – čerstvé i silážované
  - kukuřice ve voskové zralosti (celé rostliny) – čerstvá i silážovaná
  - kukuřice vyzrálá (celé rostliny) – čerstvá i silážovaná
  - krmná kapusta (celé rostliny) – čerstvá i silážovaná
  - „prutová“ biomasa (štěpky anebo řezanka z listnatých dřevin)

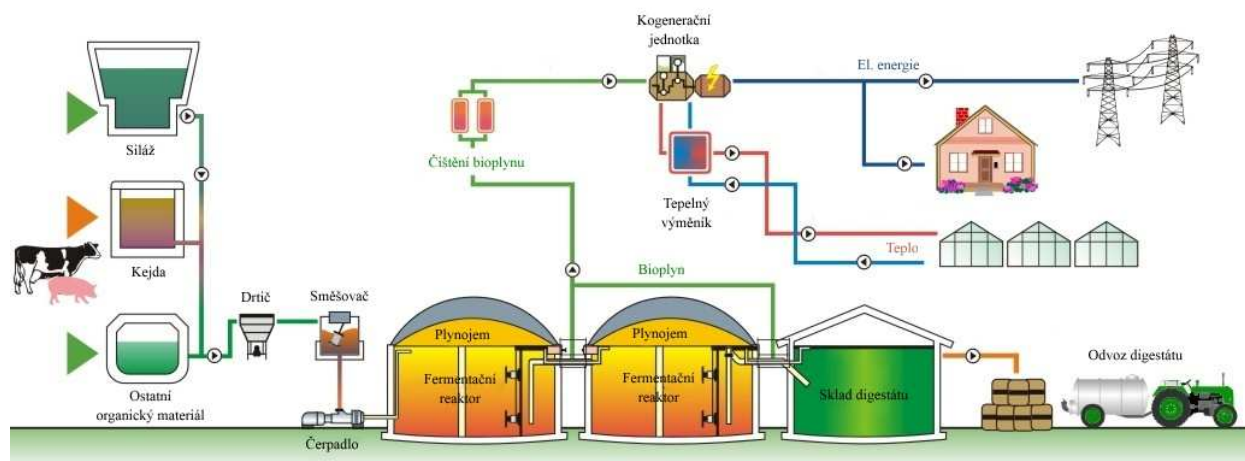
#### Popis technologie

Technologické zařízení zemědělské BPS tvoří nádrže pro sběr a přípravu surového substrátu, anaerobní fermentory s integrovaným plynojemem či vyrovnávací nádrží na bioplyn, skladovacích nádrží na bioplyn, skladovacích nádrží na digestát a technologií spotřebovávajících vyrobený bioplyn – nejčastěji kogenerační jednotky, případně plynové turbíny pro výrobu elektrické energie a kotle pro výrobu tepla. [11][12]

#### Popis činnosti

Na počátku technologie jsou dva vstupy. Prvním vstupem tvoří homogenační jímka pro kejdu a hnůj. Druhým vstupem je příjmový žlab, do kterého se zavážejí vedlejší živočišné produkty (kosti, vnitřnosti, peří, atd.) a veškerá rostlinná biomasa. Z příjmového žlabu materiál putuje

přes šnekové drtiče, kde dochází mechanickému rozrušení, do uskladňovací nádrže, kde dojde k ředění vodou či jinou vhodnou kapalinou (krev). Vytvořená suspenze prochází přes odlučovače nerozpustných látek do expandéru, kde dojde k finální destrukci makromolekulárních látek vlivem kavitace. Pokud BPS zpracovává suroviny s vysokým obsahem proteinů, je vhodné před expandér zařadit hydrolyzátory pro hydrolýzu tuhých buněčných komponent. Suspenze z expandéru se mísí s obsahem homogenizační jímky a následně se čerpá do fermentorů a dofermentorů, kde dochází k vlastní biomethanizaci. Výsledkem fermentace je bioplyn a druhém výstupu digestát. Bioplyn a digestát putují do skladovacích nádrží, odkud je bioplyn odebírán pro energetické využití a digestát odebírán pro hnojení. [6][12]



Obr. 3.2 Schéma zemědělské bioplynové stanice [13]

### 3.2 Čistírenská BPS

Čistírenská BPS je určena pouze pro zpracování kalů z čistíren odpadních vod (ČOV) a obvykle bývá nedílnou součástí ČOV.

Používané technologie anaerobní technologie jsou určeny pouze stabilizaci čistírenského kalu a nelze je použít ke zpracování biomasy. Čistírenskou bioplynovou stanicí tedy nelze chápat jako samostatnou BPS, ale pouze jako součást kalového hospodářství ČOV.

#### Popis technologie BPS

Technologie čistírenské BPS se obvykle sestává pouze z fermentačního reaktoru a skladovacích nádrží pro bioplyn a vyhnílý kal. V případě nutnosti úpravy vstupních kalů je před fermentor řazena suspenzní nádrž, kde se provádí ředění kalů.

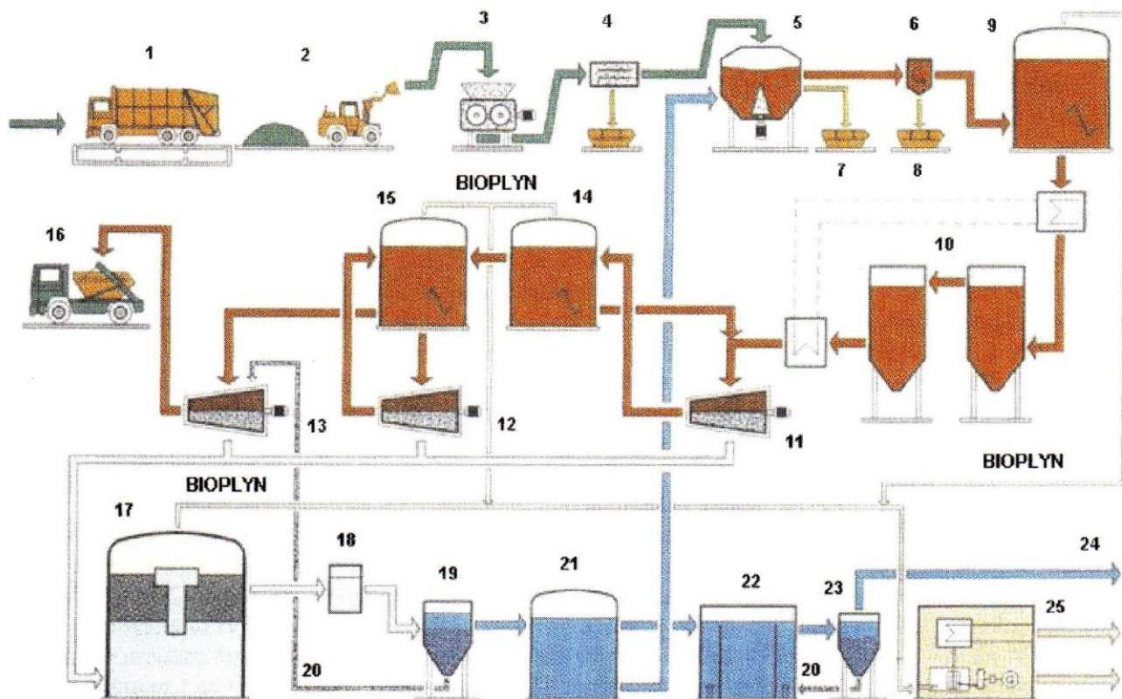
#### Popis činnosti BPS

Vysušený kal se ze skladu sušeného kalu dopravuje buď přímo do fermentoru, nebo do suspenzní nádrže, kde probíhá ředění kalu s cílem zajistit čerpatelnost a míchatelnost suspenze. Dodávky sušeného kalu a kalové suspenze se podle potřeby střídají a případně i kombinují. Získaný bioplyn je jímán do plynojemů a po průchodu procesem čištění plynu se spaluje v kogeneračních jednotkách. Vyhnílý, neboli aerobně stabilizovaný, kal je skladován v digestační nádrži a dále zpracovává v kalovém hospodářství ČOV. [10][11]



### 3.3 Ostatní BPS

Do skupiny ostatních bioplynových stanic se řadí BPS zpracovávající, kromě běžných rostlinných a živočišných vstupů, i bioodpady uvedené v nařízení Evropského parlamentu a Rady (ES) č. 1069/2009 a v metodickém pokynu Ministerstva životního prostředí „K podmínkám schvalování bioplynových stanic před uvedením do provozu“ v tab. 3 v příloze 2. Do těchto bioodpadů patří např. odpady z mlékárenského průmyslu, komunální odpady (včetně složek z odděleného sběru), odpad z textilního průmyslu (mimo syntetických vláken), aj.



Obr. 3.5 Schéma BPS na zpracování BRKO [6]: 1 – svoz bioodpadu, 2 – příjmová skladovací plocha, 3 – dezintegrace bioodpadu, 4 – odlučovač magnetických kovů, 5, 6 – rozpouštěcí tank, 7 – odlučovač nevhodných a rušivých látek, 8 – odlučovač inertních látek, 9 – suspenzní zásobník, 10 – hygienizace, 11, 12, 13 – separátory, 14, 15 – hydrolyzní fermentory, 16 – tuhý podíl na výrobu kompostu, 17 – fermentor s pevným ložem, 18 – flokulační komora, 19 – usazovací komora, 20 – kal, 21 – procesní voda, 22 – nitrace/denitrifikace, 23 – dočištění, 24 – přebytečná voda, 25 – kogenizační jednotka

V kategorii ostatních se obvykle provozují BPS, které jsou zařazeny do systému nakládání s bioodpady.

#### Popis technologie

Technologické zařízení je obdobné jako u zemědělské bioplynové stanice. Pokud se ve stanici zpracovávají vedlejší živočišné produkty nebo biologicky rozložitelné komunální odpady, je nutné na počátek/konec technologického celku zařadit pasterizačně-sanitační pro hygienizaci surovin a odpadů. Obvykle se hygienizace provádí pomocí procesu pasterace, nebo pomocí vysokoteplotní hygienizace. [6][10]

## 4 Využití tepla z bioplynové stanice

Nezanedbatelný výstup z kogenerační jednotky bioplynové stanice tvoří odpadní teplo. Do formy odpadního tepla se běžně přeměňuje okolo poloviny energie paliva. Část tohoto tepla, roční průměr činí okolo 20 %, se využívá pro krytí vlastní spotřeby tepla technologie produkce bioplynu. Zbylé teplo je možné dále využít a vylepšit tak ekonomické a environmentální přínosy stanice.

Hlavní příjem drtivé většiny bioplynových stanic představuje prodej elektrické energie do distribuční soustavy. Využití odpadního tepla je vzhledem k rozptýlenosti vlivem umístění tepla obtížné, ale díky potenciálu BPS se v celkové strategii provozu stanice vyplatí s touto možností počítat. Prodejem tepla či jeho využitím pro další podnikatelské činnosti provozovatele BPS lze výrazně vylepšit ekonomiku provozu stanice. V praxi mohou nastat i situace, kdy pro využití odpadního tepla neexistují žádné přijatelné možnosti a z environmentálních důvodů je lepší plán na realizaci BPS zamítnout. Vzhledem k atraktivitě výkupních cen elektrické energie z obnovitelných zdrojů byly dříve BPS stavěny téměř výhradně za účelem zisku z prodeje el. energie.

V současnosti na využívání odpadního tepla pamatuje legislativa ČR a EU. Na základě úpravy ustanovení bodu 1.6.2 Cenového rozhodnutí ERÚ č.7/2011, kterým se stanovuje podpora pro výrobu elektřiny z obnovitelných zdrojů energie, kombinované výroby elektřiny a tepla a druhotných energetických zdrojů, jenž souvisí s § 6 zákona č. 180/2005 Sb. (zákon o podpoře využívání obnovitelných zdrojů, ve znění pozdějších předpisů), došlo k úpravě podmínek dotačních titulů na výstavbu BPS a využití odpadního tepla. Do této úpravy nebylo podmínkou pro získání dotace u všech nově vznikajících i již realizovaných BPS využití odpadního tepla. Se začátkem platnosti úpravy dne 1. 1. 2012 došlo ke změně v podobě pohyblivé výkupní ceny za 1 kWh dodanou do sítě. Výkupní cena se skládá z prodejní ceny za kWh na základě smlouvy s distributorem a tzv. zeleného bonusu, jehož výše je závislá na množství efektivně využitého množství tepla. Pro nárok na podporu formou výkupní ceny nebo tzv. zeleného bonusu pro elektřinu vyrobenou spalováním bioplynu v bioplynové stanici kategorie AF1 (BPS zpracovávající převážně biomasu) platí pro zdroj uvedený do provozu po 1. lednu 2012 povinnost efektivního využití tepelné energie ve výši 10 % vůči vyrobené elektrické energii v daném roce. S 1. lednem 2013 dochází ke zvýšení limitu na 20 %.

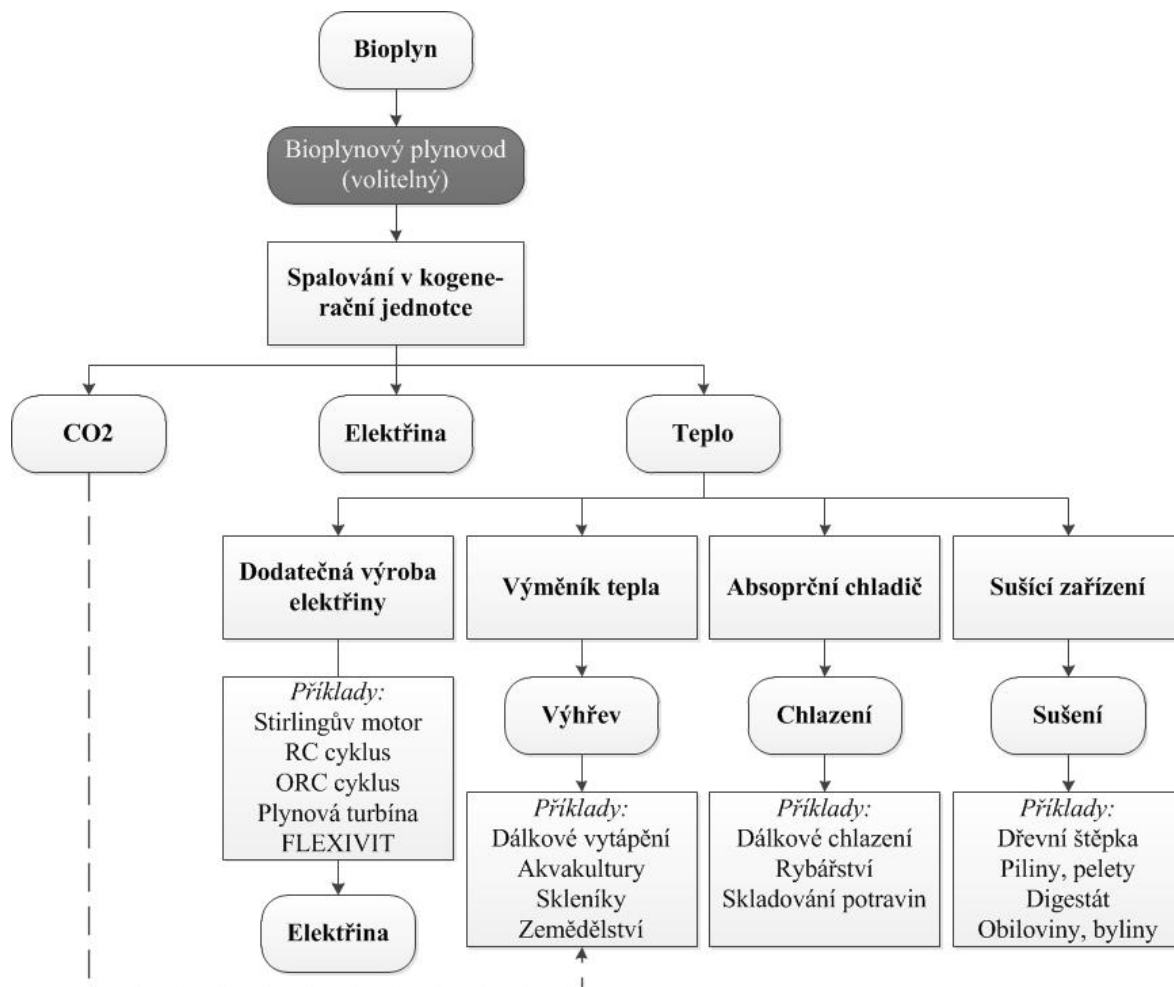
Pojmem „efektivní využití tepelné energie“ se dle platné legislativy rozumí užitečné teplo vyrobené v procesu kombinované výroby elektřiny a tepla k uspokojování ekonomicky odůvodněné poptávky po teple a chladu. Mezi užitečné teplo nepatří teplo využitě pro vlastní spotřebu technologie BPS a ani teplo využitě v ORC cyklu. Na elektřinou vyrobenou ORC cyklem je totiž pohlíženo jako na elektřinu vyrobenou z obnovitelných zdrojů energie ve smyslu ustanovení § 2 odst. 1 zákona č. 180/2005 Sb. a při pouhém odběru tepla pro ORC cyklus nejsou splněny podmínky pro efektivní využívání tepelné energie. Množství efektivně využitě tepelné energie se prokazuje reálným měřením. Na základě měření jsou zpracovávány měsíční a roční výkazy, které podléhají kontrole Státní energetické inspekce (SEI).[14][15][16]

### 4.1 Stávající možnosti využití tepla

V dnešní době existuje mnoho možností pro využívání odpadního tepla z BPS. Jejich využití je často limitováno konkrétními podmínkami bioplynové stanice, kdy může nalezení smysluplného řešení s ekonomickou návratností poněkud obtížné. S ohledem na místní podmínky se tak odpadní teplo nejčastěji maří do ovzduší, nebo se stále častěji využívá pro potřeby vytápě-



ní a chlazení mimo vlastní technologii BPS, různé sušárenské aplikace či pro dodatečnou výrobu elektrické energie. Schematické znázornění využití odpadního tepla je na obrázku 4.1.



Obr. 4.1 Možnosti využití odpadního tepla [14]

#### 4.1.1 Vytápění

Nejjednodušší udržitelnou cestu využití odpadního tepla, hlavně ze zemědělských bioplynových stanic, představuje jeho využití pro aplikace vytápění, konkrétně pro vytápění budov a ohřev vody. Návrh topného systému vyžaduje komplexní úvahu, která vychází ze znalosti detailní spotřeby tepla a chování bioplynové stanice, aby mohly být v návrhu zohledněny výkyvy dodávky tepla. Z detailní charakteristiky spotřeby tepla jsou pro návrh vytápěcího systému důležité následující parametry:

- Celková spotřeba tepla
- Roční spotřeba tepla
- Spotřeba tepla ve špičce
- Sezonní rozdíly ve spotřebě tepla

Do skupiny přímého vytápění se zahrnuje koncepty různých velikostí a principů činnosti. Mezi nejčastěji využívané koncepty se řadí:

- Dálkové vytápění budov
- Vytápění stájí
- Vytápění skleníků
- Vytápění akvakultur
- Vytápění pomocí přenosu tepla v zásobnících

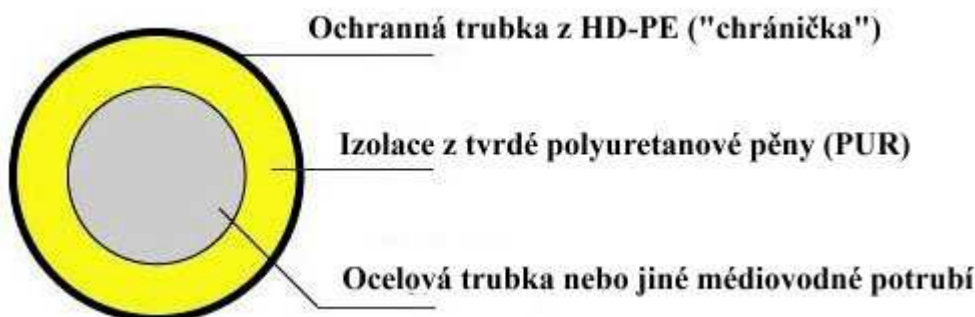
Kromě výše uvedených konceptů se lze v praxi setkat i s velkým množstvím speciálních aplikací, kde mezi nejzajímavější patří:

- Výroba léčiv – teplo pro sušení a extrakční procesy z bylin
- Prádelna – horká voda pro prací proces
- Potravinářský průmysl – horká voda a pára pro čištění, hygienizaci, zpracování a chlazení produktů
- Odpadové hospodářství – hygienizace odpadů

#### 4.1.1.1 Dálkové vytápění

Přímé využití tepla v systémech centrálního zásobování teplem (CZT) často představuje nejjednodušší a nejsnazší způsob využití odpadního tepla. Bioplynovou stanicí lze uplatnit v celém rozsahu komplexnosti systémů CZT, tedy od velmi malých systémů, kde stanice dodává teplo pouze pro několik domácností, až po komplexní městské sítě CZT, kde stanice slouží pouze jako jeden ze vzájemně propojených zdrojů tepla.

Systém CZT tvoří přívodní a vratné větve potrubní sítě, která je přímo nebo nepřímo spojená pomocí tepelných výměníků (výměňkových stanic) na straně zdrojů tepla i na straně uživatelů, měřící zařízení (průtokoměry, kalorimetry, tlakoměry) a volitelně i systémy skladování tepla. Systém dálkového vytápění je tedy uzavřená smyčka, kdy přívodní větve dopravují páru nebo teplou vodu k zákazníkům a vratnými větvemi dopravují ochlazenou vodu zpět do tepelného zdroje. V případě bioplynových stanic se, kvůli nízkým teplotám tepla, téměř výhradně používá teplá voda. Potrubí je obvykle velmi dobře izolováno a může být vedeno nadzemí nebo častěji pod povrchem.

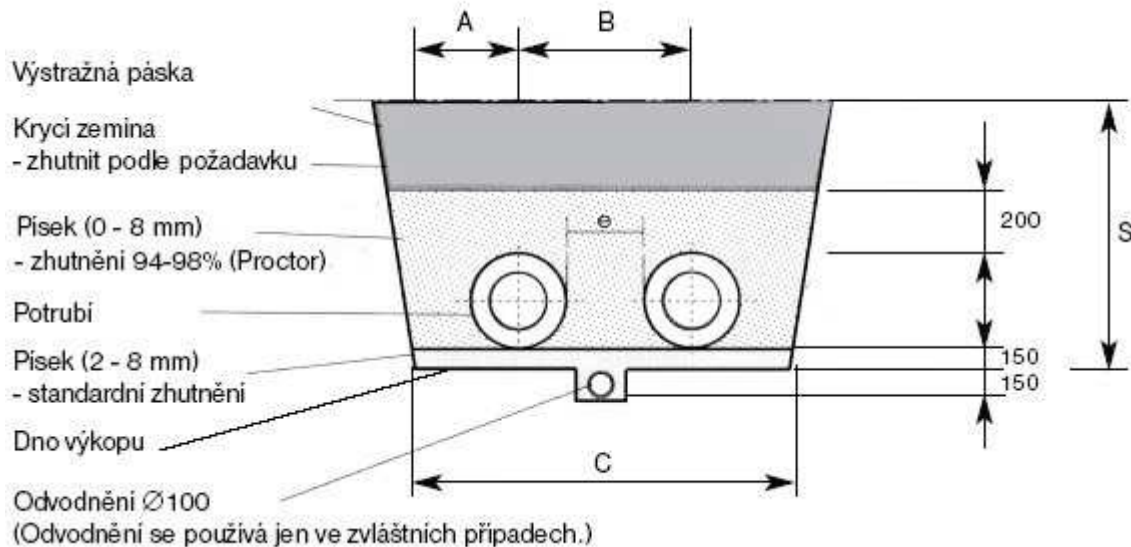


Obr. 4.2 Průřez potrubím systému CZT [15]

Při provozu systému dálkového vytápění se nedá vyhnout tepelným ztrátám, které u starých, hlavně parních, rozvodů mohou dosahovat až 20 % a u moderních systémů do 6 %. Je žádoucí udržovat ztráty na co nejnižší hodnotě, která vyplývá z ekonomického a technického zhodno-

cení ztrát a nákladů na jejich zamezení. Velikost tepelných ztrát ovlivňují hlavně následující parametry:

- Délka potrubního systému – obvyklá vzdálenost spotřebitele do 4 km
- Parametry potrubí – průměr potrubí, tloušťka a kvalita izolace potrubí (obr. 4.2)
- Technologie uložení potrubí (obr. 4.3)
- Parametry oběhové vody – objem vody v systému, teplota a rychlost proudění
- Teplotní rozdíly v koncovém výměníku
- Počet sériově zapojených výměníků – tepelná ztráta 3–7 %/výměník



Obr. 4.3 Schéma podpovrchového uložení potrubí dálkového vytápění: A – vzdálenost středu potrubí od okraje výkopu, B – rozteč mezi středy potrubí, C – šířka dna výkopu, e – nejmenší vzdálenost mezi potrubími, S – hloubka výkopu [15]

Výstavba a zahájení provozu systému dálkového vytápění představuje velké investiční náklady, které skokově rostou se vzdáleností mezi bioplynovou stanicí a odběrateli. Pro zajištění návratnosti investice a následné ziskovosti projektu se obvykle mezi dodavatelem a odběrateli uzavírají dlouhodobé smlouvy. Běžně se používají smlouvy, které obsahují některý z následujících typů smluvních závazků:

- Dodávka tepla pro základní zatížení** – provozovatel bioplynové stanice dodává pouze část dostupného tepla a spotřebitel musí být vybaven dodatečným zdrojem tepla pro dokrývání nedostatků energie. Z hlediska provozovatele BPS plyne z tohoto závazku minimální riziko, jelikož neručí za plnou dodávku tepla, ale prodejní cena GJ tepla je nízká.
- Úplná dodávka tepla** – provozovatel dodává zákazníkovi veškeré potřebné teplo, včetně dodávek ve špičce a během odstávky bioplynové stanice. Nutnost udržování záložních zdrojů tepla je provozovateli kompenzována vyšší cenou za dodávané teplo.
- Prodej tepla distributorům** – Provozovatel BPS prodává teplo provozovateli systému dálkového vytápění, který teplo dodává odběratelům. Provozovatel BPS má smluvní odpovědnost pouze k distributorovi, nikoliv ke koncovým zákazníkům. [14][15] [17]

Důležitým faktorem pro optimální provoz, a případně i rozvoj, systému dálkového vytápění je nastavení vhodné ceny, která je přijatelná jak pro provozovatele BPS, tak i pro zákazníka. Kalkulace ceny vychází z použité technologie a hlavně ze správného odhadu reálné spotřeby tepla. Pokud by při výstavbě byla spotřeba tepla nadhodnocena oproti následně odebíranému skutečnému tepla, docházelo by ke zvyšování cen tepla a možnému rozpadu systému CZT vlivem odpojování zákazníků.

#### 4.1.1.2 Stáje

V současném pojetí zemědělství se využívá stabilní a celoroční živočišné produkce. Hospodářská zvířata, zejména prasata a drůbež, však vyžadují teplé a suché stáje, což se zajišťuje vytápěním stájí. Stáje se obvykle temperují podle stáří zvířat na teplotu 20–32 °C u prasat a 18–36 °C u drůbeže.

Na základě celoroční potřeby tepla o nízké teplotě se propojení stájí s bioplynovou stanicí jeví jako optimální možnost. Odpadní teplo z kogeneračních jednotek se nejčastěji používá pro centrální i zónové vyhřívací systémy velkochovů. V případě příznivých podmínek je možné vytápět odpadním teplem i menší chovy zvířat. [14]

#### 4.1.1.3 Skleníky

Skleníky pro udržení stabilní teplot, okolo 20–25 °C, potřebují velké množství energie. Teplo z bioplynové stanice může pro skleníky představovat celoroční a levný zdroj. Při plánování využití odpadního tepla je nutné dbát na dostupnost tepla z hlediska roční doby. Největší požadavky skleníku na teplo nastávají v zimě a chladných měsících, ve stejné době však vzrůstá vlastní spotřeba tepla bioplynové stanice pro ohřev fermentorů a hygienizační nádrže. Pokud by bioplynová stanice měla sloužit jako hlavní zdroj tepla, musí být zajištěna dostatečná rezerva mezi dostupným teplem a požadovanou spotřebou skleníku nebo musí být skleník doplněn o další zdroj vytápění.[14]

#### 4.1.1.4 Akvakultury

Díky nižším výtěžkům mořského rybolovu, vlivem úbytku mořských ryb a ostatních živočichů, a rostoucí poptávce pro rybách se zvyšuje objem živočichů pěstovaných v akvakulturách. Akvakultury obvykle tvoří systém nádrží z betonu či syntetických materiálů, které jsou často umístěny v hale. Akvakultury se vyznačují velkou spotřebou energie, proto se hledají dostupné a levné zdroje energie. Jeden z evropských konceptů je založen na propojení bioplynové stanice s akvakulturou, kde bioplynová stanice slouží jako zdroj tepla, případně jako zdroj hnojiva ve formě digestátu. Odpad z akvakultury může sloužit jako vstupní surovina pro bioplynovou stanicí a lze tak docílit výborného řešení, kdy se bioplynová stanice a akvakultura vzájemně podporují.

Při přípravě projektu využití odpadního tepla je nutné uvažovat následující faktory:

- Znalost provozovatele akvakultury
- Možnost připojení k několika vedením vody či odpadní vody
- Vzdálenost mezi bioplynovou stanicí a akvakulturou
- Ideální podmínky pro růst ryb – krmění, teplota a kvalita vody, hygienické podmínky
- Dostupnost a znalost trhu s rybami – ceny produktů, objem poptávky
- Právní rámcové podmínky
- Investiční náklady

- Dostupnost a vhodnost technologií

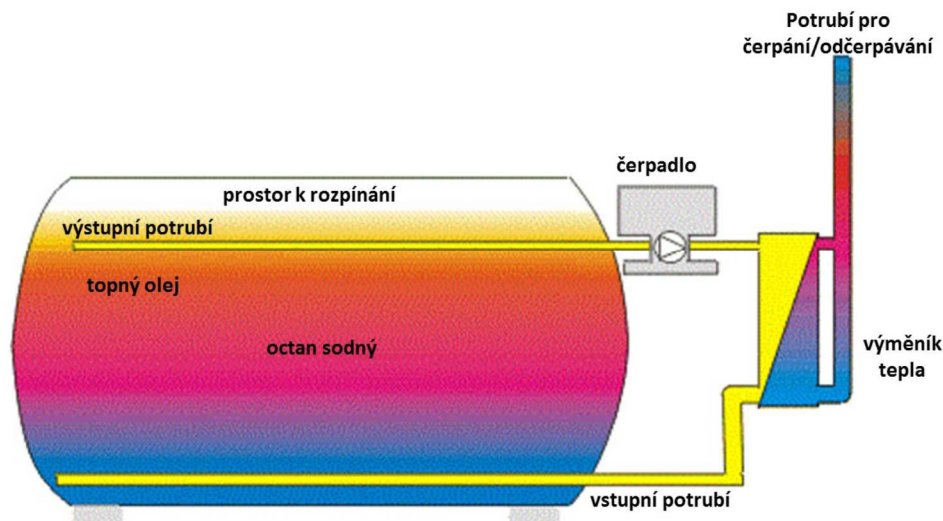
Tento typ projektu má slibné vyhlídky do budoucnosti, kdy se může stát zajímavým zdrojem příjmů z produkce vysoce kvalitních výrobků. Současně je projekt spojen s velkou mírou rizika a pro úspěšný rozvoj je nutným předpokladem velký zájem provozovatelů akvakultur o bioplynové stanice a naopak. [14]

#### 4.1.1.5 Přenos tepla v zásobnících

V praxi mohou nastat případy, kdy není možné použít systémy dálkového vytápění, např. z důvodu velkých vzdáleností či jiných omezení (právních, konstrukčních, provozních, atd.). V těchto případech lze uvažovat o přenosu tepla v mobilních kontejnerech. Kontejnery mají standardizované rozměry 6,10 m × 2,44 m, přibližnou váhu 26 t a obvykle nejsou izolovány. Izolace není nutná z důvodu chemické vazby tepla v pracovní látce.

V současnosti existují dvě zásadní technologie, jež se odlišují podle použité látky pro akumulaci tepla:

- Latentní systémy pro skladování tepla
- Termodynamické systémy pro skladování tepla



Obr. 4.4 Schéma latentního systému pro skladování tepla [14]

Latentní systémy využívají látku s fázovou změnou (phase change material, PCM), obvykle octan sodný, považovaný za bezpečnou sůl, a hydroxid barnatý, jež má zvláštní požadavky na bezpečnost kvůli nebezpečným vlastnostem.

V termodynamických skladovacích systémech se používá mikroporézní, hlinito-silikátový minerál, tzv. zeolit. Porézní struktura zajišťuje velkou plochu povrchu zeolitových částic, jež slouží jako adsorbenty. Při průchodu vodní páry adsorbenty je pak pára adsorbována a teplo uvolněno. Tento způsob umožňuje uložení až čtyřnásobku množství tepla než je možné uložit

ve vodě. Systém se však zatím nachází ve fázi výzkumu a vývoje. V následujících letech je plánována stavba demonstrátoru pro ověření schopnosti komerčních aplikací.

Při plánování nových projektů s využitím přenosu tepla v kontejnerech musí být zváženo mnoho parametrů, mezi nejdůležitější faktory patří [14]:

- Výkonové parametry
  - Minimální nabíjecí výkon zdroje tepla 250 kW
  - Minimální vybíjecí výkon v místě spotřeby 125 kW
- Logistika
  - Dostupnost místa
  - Maximální přepravní vzdálenost 30 km
  - Schopnost zajistit dostatečné přepravní kapacity
  - Problém zvýšení dopravy v regionu
- Riziko z důvodu nedostatku zkušeností s tímto systémem

### 4.1.2 Chlazení

Další možností použití odpadního tepla je využití při výrobě chladu. V současnosti se uplatňují dva hlavní druhy chladících zařízení, kompresorové a absorpční chladící zařízení.

Kompresorové chladiva se stala nejpoužívanější technologií pro klimatizace a chlazení v lednicích pro domácí i průmyslové využití. Hlavním prvkem systému je kompresor, napájený elektrickou energií. Vzhledem k tomu, že jako hlavní zdroj energie neslouží odpadní teplo, nebude tento způsob chlazení dále popisován.

#### 4.1.2.1 Absorpční chlazení

Absorpční chladící zařízení využívají jako hlavní zdroj energie teplo, lze je proto výhodně použít v místech, kde je zdroj elektřiny nedostupný (podmínkami místa či cenou) nebo nespolehlivý, kde lze využít odpadního tepla z bioplynové stanice nebo je nutné dodržovat hlukové limity.

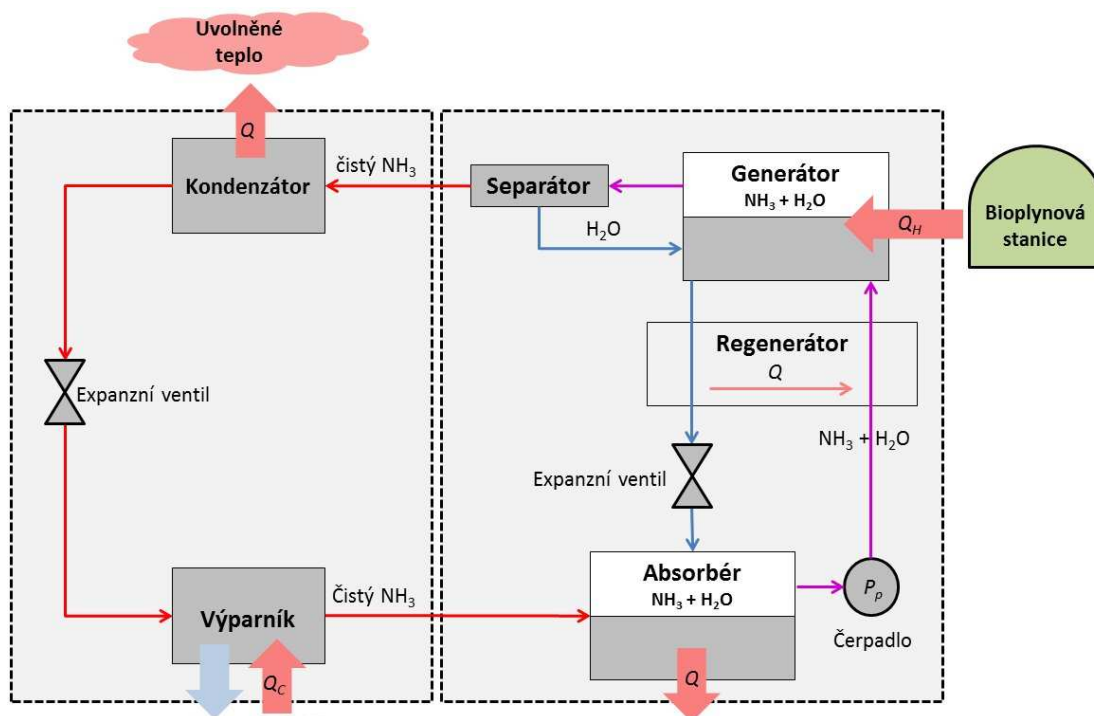
Absorpční chladící zařízení se mohou dělit podle způsobu vytápění na přímo a nepřímo vytápěná a podle počtu teplotních úrovní zdroje tepla (neboli vypuzovačů) na jednostupňová, dvoustupňová a třístupňová zařízení. Každá teplotní úroveň zařízení (stupeň zařízení) vyžaduje vlastní vypuzovač a kondenzátor. Vyšší počet stupňů zvyšuje teplotu tepelného přenosu, proto jsou dvoustupňová zařízení energeticky efektivnější, ale i dražší, než jednostupňová zařízení. Třístupňová absorpční zařízení, jenž mají vyšší efektivitu než dvoustupňová zařízení, jsou stále ve fázi vývoje. Pro teplo z bioplynových stanic se dají využít pouze nepřímo vytápěné, jednostupňové i dvoustupňové, absorpční zařízení. Lze se setkat i s aplikacemi, kde je absorpční chlazení doplněno kompresním chlazením a vzniká tak hybridní nebo kaskádové chlazení.

Výkon absorpčního chlazení závisí na teplotě odpadního tepla, požadované teplotě chlazení a použitém chladivu a absorbátoru. V současnosti používaná chladiva, dle platné legislativy, nesmějí poškozovat ozonovou vrstvu. Jako pracovní látka se nejčastěji používají směsi (absorbent + chladivo) s nízkým bodem varu (obvykle méně než  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), nejčastěji pak pro chlazení nad  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  směs LiBr (absorbent) +  $\text{H}_2\text{O}$  (chladivo) a pro chlazení pod  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  směs  $\text{NH}_3$  (chladivo) +  $\text{H}_2\text{O}$  (absorbent).

Po porovnání chladících zařízení, absorpčních i kompresních, byl zaveden chladicí faktor EER, který reprezentuje poměr mezi výkonem chladícího zařízení a množstvím spotřebované energie. V současnosti se hodnota EEP se u jednostupňových zařízení pohybuje v rozmezí 0,65–0,8 a u dvoustupňových v rozmezí 0,9–1,2.

$$EER = \frac{\text{Chladicí výkon}}{\text{Spotřebovaná energie}} = \frac{\dot{Q}_C}{\dot{Q}_H + P_P} \approx \frac{\dot{Q}_C}{\dot{Q}_H} \quad (4.1)$$

kde EER Chladicí faktor [–]  
 $\dot{Q}_C$  Výkon chladícího zařízení [kW]  
 $\dot{Q}_H$  Výkon tepelného zařízení [kW]  
 $P_P$  Příkon čerpadla [kW]



Obr. 4.5 Schéma absorpčnímu okruhu voda-amoniak [14]

Absorpční systém amoniak-voda, schematicky uvedený na obr. 4.5, využívá amoniak (NH<sub>3</sub>) jako chladivo a vodu (H<sub>2</sub>O) jako absorbent (transportní prostředek). Chladivo v kapalném skupenství absorbuje teplo z prostoru výparníku, čímž dochází k odparu chladiva a současně k ochlazování prostoru výparníku. Páry chladiva jsou následně v absorběru, kde jsou absorbovány slabým roztokem amoniaku a vody. Při absorpci se uvolňuje teplo a se zvyšující se teplotou klesá schopnost vody absorbovat páry amoniaku, proto je nutné absorběr chladit chladící vodu. Absorpce probíhá do okamžiku nasycení vody parami amoniaku. Koncentrovaný roztok amoniaku je čerpán vysokotlakým čerpadlem do vypuzovače (generátoru). Generátor je vytápěn, např. odpadním teplem z BPS, aby došlo k odpaření amoniaku z roztoku. Voda se z generátoru vrací přes chladič a škrtkový ventil zpátky do absorběru. Páry amoniaku mohou obsahovat zbytky vody, proto bývá před kondenzátorem umístěn separátor pro odloučení veškeré vody. Čisté páry amoniaku v kondenzátoru s vysokým tlakem přecházejí zpátky



do kapalné fáze a uvolňují teplo (kondenzační teplo), které je odváděno chladicí vodou. Kapalný amoniak se přes škrtkovací ventil, kde dojde k prudkému snížení tlaku a teploty, dostává do výparníku a je opět schopen odnímat teplo. [14][15]

#### 4.1.2.2 Možnosti využití chlazení z odpadního tepla

Pro rozsáhlejší systémy centrálního chlazení většinou není množství odpadního tepla dostatečné, bioplynová stanice jako zdroj chladu je tedy pouze jedním ze zdrojů integrovaných v systému. V případě příznivých podmínek lze postavit centralizovaný chladicí systém malého měřítka, který bude dimenzovaný, podle výkonu bioplynové stanice, pouze pro obsluhu jednoho nebo i více spotřebitelů. Centrální rozvody chladu z hlediska technologie jsou téměř totožné s centrálními rozvody tepla, viz část Dálkové vytápění v kap. 4.1.1.

Chlazení za pomoci odpadního tepla lze použít například pro:

- Klimatizace veřejných a soukromých budov
- Klimatizace skladů potravinářských produktů (obiloviny, zelenina, ovoce, maso)
- Klimatizace stájí a chovů prasat
- Klimatizace serverových místností a místností s citlivou elektronikou
- Rybí průmysl – chlazení skladovacích hal a výroba ledu
- Mlékárenství – chlazení mléka a mléčných výrobků na farmách a ve zpracovatelských závodech
- Výroba plastů – chlazení nástrojů na zpracování polymerů

Výhodou chlazení z odpadního tepla je jeho celoroční produkce a největší dostupnost v letním období, kdy roste poptávka po chlazení. V současnosti však není tento způsob výroby chladu příliš rozšířený. [14]

#### 4.1.3 Sušení

Častým způsobem využití tepla bývá jeho použití jako sušícího média v zemědělských a průmyslových sušárnách. Z pohledu bioplynové stanice patří mezi nejběžnější sušené materiály:

- Digestát
- Čistírenské kaly
- Tuhá biomasa – dřevní štěpka, piliny, aj.
- Zemědělské produkty – obilí, kukuřice, semena, aj.

Vlastní proces sušení ovlivňuje mnoho faktorů, na kterých závisí výběr vhodné sušičky. V procesu sušení je nutné zohlednit vliv následujících faktorů:

- Vlivy na straně sušícího média
  - Teplota
  - Vlhkost
  - Rychlost proudění
  - Množství předaného tepla
- Vlivy na straně vysoušeného materiálu
  - Typ materiálu
  - Citlivost na překročení sušící teploty
  - Vlhkost a obsah vody
  - Doba zpracování



Tab. 4.1 Přehled typů sušáren a jejich charakteristika [14][18][19]

Typ	Materiály k sušení	Charakteristika
Komorová sušárna	Obilí, kukuřice, semena, ostatní sypké hmoty	Jednoduchá a levná konstrukce. Horký vzduch prostupuje materiálem v horizontálních nebo vertikálních kontejnerech (sila, nákladní auta, aj.), s materiálem není aktivně pohybováno. Sušicí teploty se obvykle pohybují v rozmezí 30–150 °C.
Pásová sušárna	Digestát (separovaný), dřevní štěpka, obilí, kukuřice (zrno, siláž)	Konstrukčně složitější a dražší než komorové sušičky. Horký vzduch prostupuje materiálem, který je zvolna posouván na páse. Pracovní teploty jsou podobné jako u komorové sušárny.
Žlabová sušárna	Olejniny, byliny, trávy, pelety, granuláty, dřevní štěpka	Horký vzduch proudí dvojitým dnem (mřížovitým) skrz materiál, nebo je vháněn střechem sušárny a proudí podél materiálu. Promíchávání materiálu zajišťují hrabla, jenž materiál současně přesouvají.
Bubnová sušárna	Sypké hmoty (zemědělství, údržba krajiny)	Horký vzduch prostupuje materiálem v otáčejícím se horizontálním bubnu. Tento sušárny vyžaduje vysoké pracovní teploty, obvykle okolo 1000 °C.

Z výše uvedeného přehledu se, na základě vyhodnocení pracovních teplot a nákladů (investičních i provozních), jeví pro aplikaci na odpadní teplo z BPS jako nejvhodnější komorové a pásové sušárny. [14][18][19]

#### 4.1.4 Dodatečná výroba elektřiny

Častým jevem, hlavně u zemědělských bioplynových stanic, je omezená nebo nulová možnost využití odpadního tepla, z důvodů ekonomických či technických, způsoby, které jsou popsány v předešlých částech této kapitoly. Jako vhodná možnost využití tepla pak zbývá jeho převedení na jiný typ energie, konkrétně na elektrickou energii. Odpadní teplo má však teplotu v rozmezí 80–550 °C, proto jsou pro dodatečnou výrobu elektrické energie vhodné pouze některé tepelné oběhy.

##### 4.1.4.1 CRC systémy

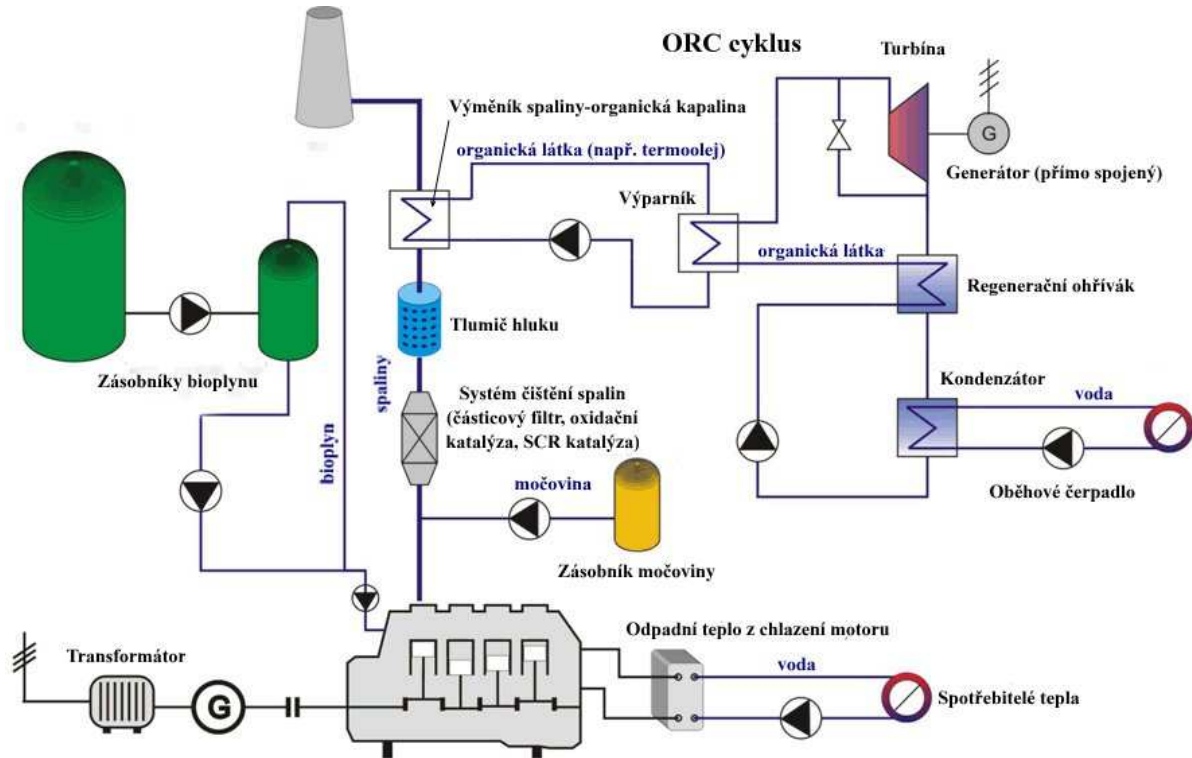
Clausiiův-Rankinův cyklus (CRC) reprezentuje cyklus, který se používá v tradičních i většině moderních aplikací tepelné energetiky, jako jsou elektrárny na biomasu či solárně-termální systémy.

V rámci RC cyklu se tepelná energie převádí na energii mechanickou a následně na elektrickou energii. Pokud se RC cyklus použije jako dodatečný zdroj výroby elektřiny při BPS, tak se obvykle realizuje ve formě uzavřené smyčky. Ve smyčce se obvykle ohřívá voda v parním generátoru (např. spalínovém kotli), kde se přeměňuje na páru, která následně roztáčí turbínu spojenou s generátorem.

Vzhledem k nízkým teplotám odpadního tepla se tento způsob v praxi téměř nepoužívá. Existuje pouze několik případů využití u velkých BPS, kdy kogenerační jednotky produkují dostatečné množství spalin pro výrobu páry ve spalínovém kotli. [14]

#### 4.1.4.2 ORC systémy

Organický Rankinův cyklus (ORC) je speciální forma CRC, kde se místo vody a páry využívá organická kapalina. Organická kapalina má nižší teplotu varu než voda a je tedy možné využít tepelné zdroje s nižší teplotou, například právě odpadní teplo z BPS. Správný výběr pracovní kapaliny je klíčovým faktorem celého cyklu.



Obr. 4.6 Schéma ORC cyklu [20]

Z hlediska termodynamických a provozních vlastností pracovní kapaliny se zohledňují následující parametry:

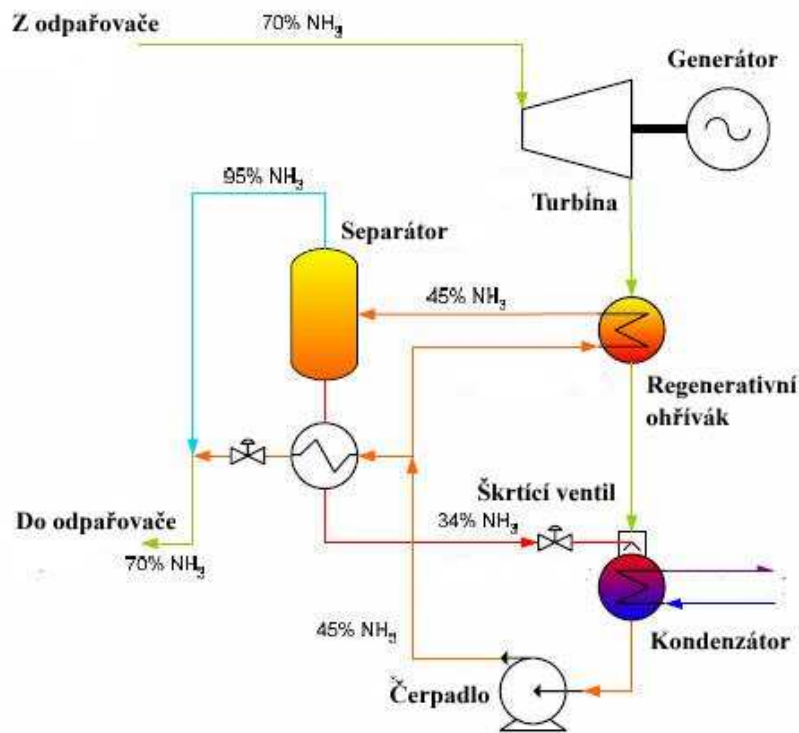
- Izoentropická křivka nasycených par
- Teplota varu a tuhnutí
- Maximální tolerovaná teplota
- Latentní teplo a hustota
- Korozivita, hořlavost a toxicita
- Dostupnost a cena
- Hledisko životního prostředí – potenciál narušení ozonové vrstvy (ODP) a potenciál globálního oteplování (GWP)

Na základě výše zmíněných vlastností se jako pracovní látka nejčastěji používají uhlovodíky (např. n-butan, n-pentan, aj.) a chladiva (např. R12, R113, R123, aj.). Pro některé aplikace nemá žádná kapalina požadované vlastnosti a je tedy nutné použít směs látek, která zaručuje žádané vlastnosti.

Stanovit přesné hodnoty vyrobené elektrické energie je velmi obtížné, odhaduje se však, že z odpadního tepla kogenerační jednotky lze získat 7–10% dodatečné elektrické energie. [14]

#### 4.1.4.3 Kalinův cyklus

Další nadstavbu k RC cyklu a tedy alternativu k ORC cyklu představuje Kalinův cyklus. Oproti ORC procesům se však aplikace Kalinova cyklu v rámci bioplynu, navzdory vhodnému teplotnímu rozmezí 100–200 °C, téměř nevyskytuje. V současnosti však již probíhá několik výzkumů a staveb experimentálních zařízení, jejichž cílem je navrhnutí realizovatelného Kalinova cyklu pro potřeby bioplynových stanic.



Obr. 4.7 Schéma Kalinova cyklu [21]

Jako pracovní látka u tohoto typu okruhu ve většině případů slouží kapalná směs vody s amoniakem. Obě látky mají rozdílné body varu a lze tedy z tepelného zdroje získat více tepla než při použití jedné pracovní kapaliny.

Vlastní cyklus, znázorněný na obrázku 4.7, se skládá z odpařovače, kde dojde k ohřátí a odpaření směsi. Směs je poté vháněna na turbínu. Po expanzi v turbíně se směs ochladí v regenerativním ohříváku a následně putuje do kondenzátoru, kde dochází k jejímu zkapalnění. Ještě před vstupem do kondenzátoru se směs ředí směsí o nižší koncentraci. Zkapalněná směs pokračuje do regenerativního ohříváku, kde se ohřívá. Ohřátá směs se v separátoru dělí na směs chudou na amoniak (34 % NH<sub>3</sub>), která je opět ochlazena a vrácena do oběhu ve formě vstříku před kondenzátorem, a bohatou směs (95 % NH<sub>3</sub>). Bohatá směs se také ochlazuje a následně se ředí směsí odebranou za čerpadlem. Takto upravená směs putuje do odpařovače. [14] [21]

Kalinův cyklus má oproti ORC systémům několik výhod. Mezi nejdůležitější výhody patří:

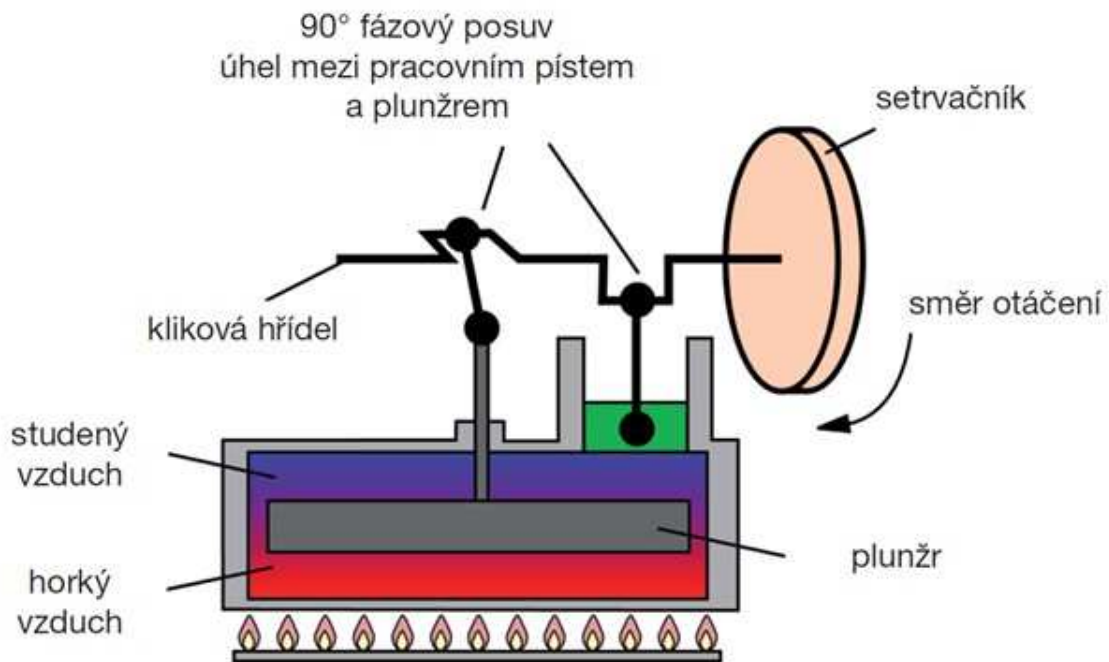
- Cena pracovní látky – amoniak a voda jsou levnější než organické látky v ORC systému
- Možnost přizpůsobení na různé teplotní úrovně zdroje změnou koncentrace amoniaku
- Vyšší energetická účinnost

Mezi nevýhody Kalinova cyklu oproti systému ORC patří:

- Korozivní potenciál a vlhkost směsi – zvýšení opotřebení a spotřeby materiálu
- Fyzikální a chemické vlastnosti amoniaku – toxicita, zápach, hořlavost a výbušnost
- Nedostatečné zkušenosti při aplikaci Kalinova cyklu na odpadní teplo z BPS [14]

#### 4.1.4.4 Stirlingův motor

Stirlingův motor představuje tepelný motor založený na cyklické kompresi a expanzi plynu, nejčastěji vzduchu, v různých teplotních úrovních za pomoci externího zdroje tepla. Existují různá konstrukční řešení Stirlingova motoru, např. nejčastěji používané typy alfa (dva písty), beta a gama (píst doplněný o přeháněč, který přesunuje pracovní plyn mezi teplým a studeným prostorem).



Obr. 4.8 Schéma Stirlingova motoru typu beta [23]

Základním principem konverze tepla na mechanickou práci motoru je cyklus, během kterého se v systému stlačuje studený plyn, následně se ohřívá, rozpíná a opět ochlazuje. Systém je uzavřený, žádný plyn tedy do systému nevstupuje a ani není odebírán, a teplo k ohřevu plynu se dodává přes tepelný výměník. Proto se Stirlingův motor často označuje za spalovací motor s vnějším spalováním. [14]

Mezi přednostmi Stirlingova motoru patří:

- Tichý chod
- Jednoduchost konstrukce
- Možnost využití libovolného zdroje tepla

Stirlingův motor má však i řadu limitujících faktorů a nevýhod [14] [22]:

- Nižší účinnost než u motorů s vnitřním spalováním
- Velké rozměry motoru – nutnost velkých teplosměnných ploch

- Možnost koroze tepelného výměníku – nutnost použití korozivzdorných materiálů
- Optimální provoz při vyšších teplotách (nad 900 °C) – nehodí se pro aplikace BPS
- Komerční dostupnost jednotek – dostupné pouze jednotky o výkonu do 40 kW<sub>el</sub>

#### 4.1.4.5 Plynová turbína na využití spalin

Poslední, v současnosti běžně využívanou, možnost na výrobu dodatečné elektrické energie představuje instalace plynové turbíny do spalinové cesty za kogenerační jednotkou.

Výroba plynové turbíny na spaliny je z technologického a materiálového hlediska, kvůli vysokým pracovním teplotám a možnosti koroze, velmi náročná a kvalitní turbíny nabízí pouze několik firem, např. GE Energy, Saacke, Schnell. [14][24]



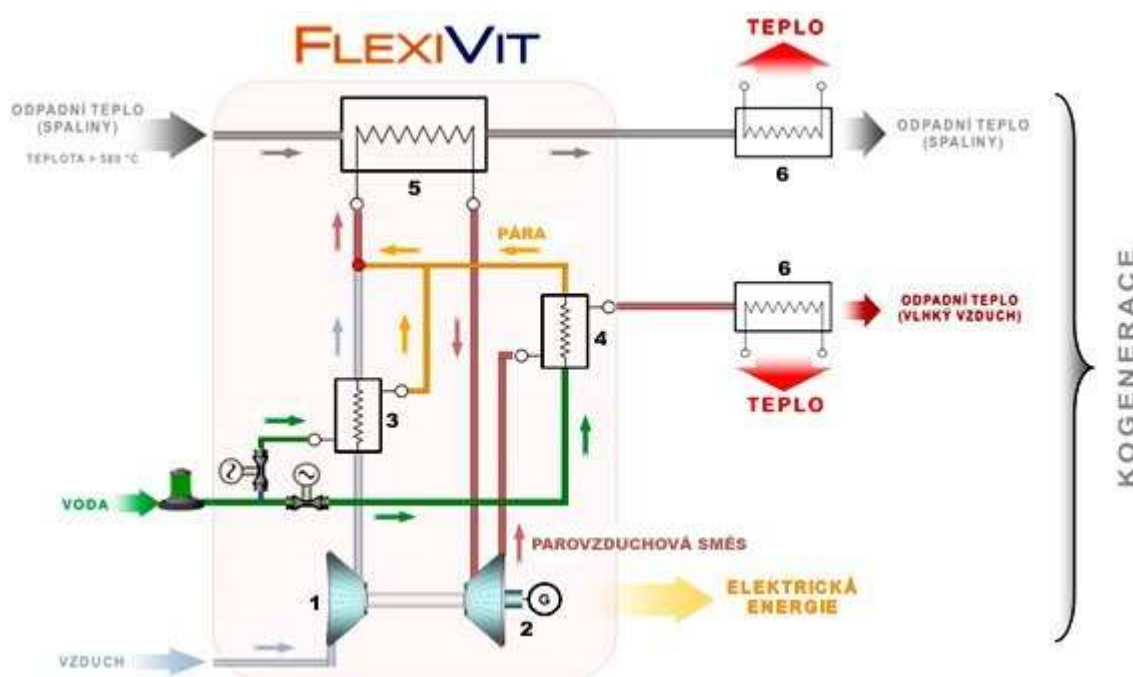
Obr. 4.9 Plynová turbína na spaliny od firmy Schnell [24]

#### 4.1.4.6 FLEXIVIT

V oblasti využívání odpadního tepla probíhá neustálý výzkum a vývoj nových technologií. Jedním z výsledků vývoje je technologie FLEXIVIT od strojírenské skupiny Vítkovice Machinery Group. Technologie FLEXIVIT představuje energetické zařízení, které pro transformaci odpadního tepla spalin na elektrickou energii využívá vlhkého (otevřeného) Braytonova oběhu s nepřímým ohřevem pracovního média – směsi vzduchu a vodní páry. Pro lepší aplikovatelnost v reálném provozu je celá technologie umístěna v samostatném kontejneru, což umožňuje integrovat FLEXIVIT ke stávajícím i k nově budovaným energetickým systémům s požadovanými parametry odpadních spalin.

Základní prvek celého oběhu, viz Obr. 4.10, tvoří turbogenerátor pro výrobu elektrické energie, který je složený z turbodmychadla s připojeným elektrickým generátorem. Turbodmychadlo dodává stlačený vzduch pro přípravu parovzduchové směsi. Pára se získává kombinací dvou výrobních postupů, v první řadě ochlazením stlačeného vzduchu v průtočném parogenerátoru a následně ochlazením a v druhé řadě ochlazením výstupní expandované parovzduchové směsi z výstupu plynové turbíny turbodmychadla v žárotrubnatém generátoru. Parovzduchová směs se na pracovní teplotu ohřívá pomocí spalinového výměníku na odpadní

teplo spalin vystupujících z plynových motorů energetických jednotek. Ohřátá směs následně prochází plynovou turbínou turbodmychadla, kde dochází k transformaci tepelné energie. Expandovaná směs prochází žárotrubnatým generátorem, ochladí se v separačním výměníku, kde dojde ke kondenzaci směsi a oddělení vodní páry. Získaná vodní pára se vrací zpět do oběhu a vzduch je vypouštěn do ovzduší. V případě, že existuje využití pro nízkopotenciální odpadní teplo z technologie FLEXIVIT, lze na výfuk spalin a vlhkého vzduchu umístit dodatečné výměníky tepla a zařízení provozovat v režimu kogenerace.



Obr. 4.10 Schéma technologie FLEXIVIT s dodatečným využitím odpadního tepla spalin a expandované směsi [25]: 1 – kompresor turbodmychadla, 2 – plynová turbína turbodmychadla s připojeným elektrickým generátorem, 3 – průtočný parogenerátor, 4 – žárotrubnatý generátor se separačním výměníkem, 5 – tepelný výměník spaliny-parovzduchová směs, 6 – dodatečné tepelné výměníky

Tato technologie přináší výhody, které se u ostatních technologií nevyskytují. Mezi nejdůležitější výhody patří [25]:

- Kompaktnost technologie – kontejnerové provedení
- Snadná instalace – nutná pouze základová deska z betonu a připravené rozvody pro spaliny a vzduch
- Vysoká provozní spolehlivost
- Nízká vlastní spotřeba a provozní náklady
- Výkon jednotky 50-200 kW<sub>el</sub>

## 4.2 Smart district heating and cooling networks

Smart grids či Smart networks („inteligentní“ sítě) představují budoucnost distribučních sítí pro rozvody komodit, jako jsou elektřina, plyn, teplo a voda a základní prvek konceptu energeticky „inteligentních“ regionů (Smart regions). Z technologického hlediska se jedná o nad-



stavbu Smart meteringu, která, díky čidlům umístěným v síti, umožňuje online řízení distribuční soustavy a decentralizaci výroby.

„Inteligentní“ síť rozvodů tepla a chladu (Smart district heating and cooling networks) je tedy nutné chápat jako integrovaný systém mnoha různých technologií. Nosný prvek systému tvoří inteligentní měřidla, čidla umístěná v síti a obousměrná komunikační a ovládací zařízení, jejichž cílem je optimalizovat řízení sítě na základě poptávky po teple a chladu. Do systému jsou dále integrovány technologie krátkodobé a dlouhodobé akumulace tepla, (pro pokrytí výkyvů v systému), zdroje decentralizované výroby (fototermické panely, bioplynové stanice, mikro kogenerační jednotky, aj.).

Chytré sítě s sebou také přinášejí mnoho nových funkcí a možností [26][27]:

- **Regenerace** – Sofistikovaná architektura sítě s modulovým uspořádáním a propojením všech uzlů umožňuje, aby v případě poruchy byl postižený modul z provozu sítě vyloučen, pomocí automatických diagnostických a servisních postupů opraven (pokud není možno tuto závadu opravit automaticky, opravu zajistí servisní personál) a opětovně zařazen do používání.
- **Účast zákazníka** – Zákazník má možnost zadávat konkrétní požadavky (datum, délka odběru, množství energie) na teplo či chlad, čímž umožňuje plánovat operátorům síť predikovat a optimalizovat spotřebu v síti.
- **Odolnost vůči útoku** – Pokročilé heuristické monitorovací a řídicí programy, fraktálové kódování a komplexní fyzická ochrana jednotlivých prvků systému zajišťují „inteligentním“ sítím nadstandartní ochranu proti vnějším vlivům i proti neautorizovaným zásahům z vlastního systému.
- **Přizpůsobivost** – Velké množství měřených dat a jejich vyhodnocování poskytuje síti možnost přizpůsobit se změně podmínek v téměř v reálném čase.
- **Umožnění obchodu s teplem** – Teplo bude možné nakupovat nejen na základě kontraktů s pevnými cenami za jednotku, ale i pomocí virtuálního trhu, energetické burzy, za aktuální výrobní a distribuční ceny.
- **Distribuce kvalitní energie** – Online monitorování a řízení sítě eliminuje dodávky tepla a chladu, které neodpovídají požadovaným parametrům. Zákazník tedy vždy dostává kvalitní energii požadovaných parametrů.

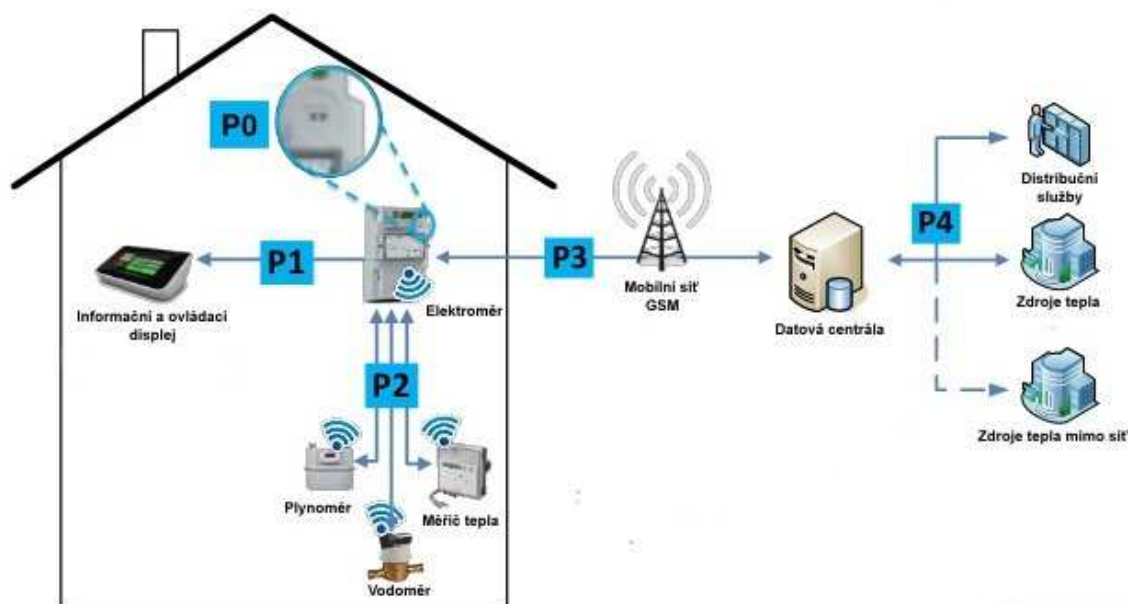
#### 4.2.1 Smart metering

Základním charakteristickým rysem Smart meteringu, nebo-li tzv. „inteligentního“ měření, je obousměrná komunikace mezi měřidlem a centrální sítí. Oproti běžným měřidlům, která umožňují pouze sběr dat, mohou inteligentní měřidla naměřená data automaticky vyhodnocovat a podílet se na řízení sítě formou připojování a odpojování odběrných míst, případně predikovat spotřebu energií. Koncept Smart meteringu se v současnosti uplatňuje hlavně u nových budov, kde se s využitím inteligentního měření a řízení objektu počítá už od projekční fáze.

Ukázka praktické aplikace technologie Smart meteringu a Smart networks, inspirovaná nizozemským modelem, je znázorněna na obr. 4.12. Celý systém lze rozdělit na tři základní části: inteligentní měření spotřeby energií v budově, komunikační soustavu s datovým centrem a výrobní část se zdroji energie a distribuční soustavou.

Inteligentní měření spotřeby budovy se realizuje pomocí autonomních měřičů (např. plynoměr, vodoměr, měřič tepla, aj.), jenž posílají data přes komunikační port P2 do elektroměru, který slouží jako datová sběrnice pro systém měření spotřeby energií. Jako komunikační port P2 slouží drátová/bezdrátová sběrnice M-BUS, která umožňuje obousměrné předávání jednoduchých příkazů (diagnostické příkazy, apod.). Informace shromažďované v centrálním inteligentním měřidle – v tomto případě v elektroměru – mohou být přes komunikační port P1 (konektor RJ-11, sériový port) zobrazovány na řídicím panelu. Elektroměr je dále osazen servisním rozhraním (P0), přes které je možné provádět diagnostiku a údržbu měřidel.

Komunikace s datovou centrálou distribuční sítě (P3) probíhá s využitím mobilní technologie GPRS, jako záložní spojení je možné využít přenos po elektrické síti (PLC, Power Line Communication). Datová centrála Smart sítě vyhodnocuje přijatá ze strany spotřebitele i výroby a vydává příkazy pro řízení sítě. Komunikaci s výrobní částí inteligentní sítě obstarává datová centrála přes komunikační protokoly založených na síťové technologii Ethernet. [27][28]



Obr. 4.12 Schéma návrhu inteligentního měření spotřeby obytné budovy [28]

#### 4.2.2 Koncepty Smart district heating and cooling networks

Většina navrhovaných konceptů inteligentních sítí rozvodu tepla a chladu se stále nachází v různých stupních vývoje. Pro podrobnější popis byly vybrány tři koncepty, které se již v praxi realizují, nebo je vývoj téměř ukončen.

##### Nízkoteplotní dálkové vytápění

Systém nízkoteplotního dálkového vytápění (Low-temperature district heating, LTDH) představuje další vývojovou fázi tradičních systémů dálkového vytápění (CZT), které využívají jako teplosměnné médium páru a horkou vodu. Jak již bylo uvedeno výše, současný trend snižování požadavků na dodávané teplo způsobuje nárůst distribučních ztrát a činí tak dálkové vytápění méně konkurenceschopné. Nejlepším řešením pro eliminaci tohoto trendu je snížení teploty teplotnosného media, v tomto případě teplé vody, na teplotu 30–50 °C, což povede



ke snížení distribučních ztrát na přijatelnou hodnotu. Systémy LTDH jsou – díky teplotě dodávaného tepla – primárně určeny pro vytápění obytných i průmyslových budov. Právě nízké parametry tepla umožňují do systému začlenit nízkoteplotní zdroje tepla, jako jsou např. bioplynové stanice a fototermické panely.

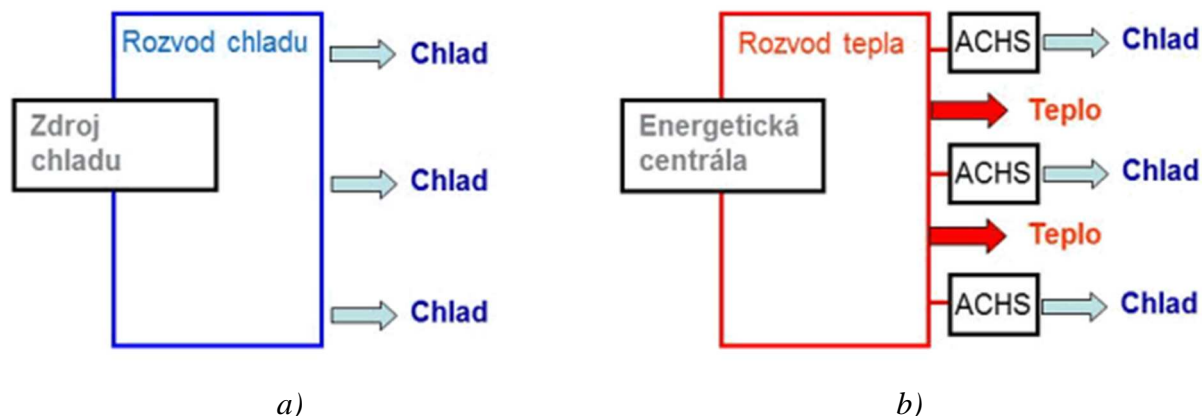
První projekty na úpravu stávajících sítí na LTDH i výstavbu nových sítí byly připraveny ve Švédsku a Dánsku, kde jsou v současnosti sítě LTDH neustále rozšiřovány. Rozšiřování do dalších států v současnosti brání legislativní a technické překážky. Infrastruktura většiny států totiž není uzpůsobena na provoz při parametrech LTDH. Výzkum a vývoj je proto zaměřen možnost modifikace stávajících sítí a možnost přechodů od fosilních zdrojů tepla na obnovitelné zdroje. [26][27]

### Systém dálkového vytápění pro provoz domácích spotřebičů

Na vývoj samotných systémů LTDH navazují různé výzkumy využitelnosti tepla a chladu pro další aplikace. Jednou z možných aplikací je využití tepla a chladu pro provoz domácích spotřebičů, označovaných jako „bílé zboží“ (pračka, myčka, sušička, aj.). Spotřebiče by k ohřevu vody a vzduchu, místo elektřiny, využívaly teplo z dálkových rozvodů, čímž dojde k výrazné úspoře elektřiny nutné pro provoz spotřebiče. Další potenciální výhodou této technologie představuje možnost dálkového řízení doby provozu spotřebičů, což umožňuje provozování spotřebičů v době nízkého vytížení sítě. Výzkumy tohoto technologického řešení ještě stále probíhají, aktuálně ve Skandinávii probíhají zkoušky na několika provozovaných demonstrátorech. Významnější rozvoj lze tedy očekávat až s masivním nástupem LTDH sítí, které jsou pro provoz této technologie nezbytné. [27][29]

### Dálkové chlazení

Pojmem dálkové chlazení se primárně označuje centralizovaná produkce a distribuce chladu. V současnosti je tímto termínem označována i výroba chladu pomocí lokálních absorpčních a adsorpčních chladících stanic.



Obr 4.13 Systém dálkového chlazení [30]:

a) s centralizovanou produkcí chladu, b) decentralizovanou produkcí chladu

Centralizovaná produkce (obr. 4.13a) chladu dosud spočívala ve výrobě chladu ústřední chladící stanicí s vysokou účinností výroby a následné dopravě chlazené vody potrubní sítí k odběratelům. Úprava současných sítí na Smart sítě umožní využití místních přírodních zdrojů chladu, označovaných jako free cooling, kam patří zejména řeky a jezera. Pro zvýšení efektivity této technologie jsou vyvíjeny kombinované systémy, kde je místní zdroj chladu doplněn absorpční jednotkou. Rozšíření tohoto konceptu ve většině případů brání velké investiční

náklady spojené s vybudováním nové sítě a krátká doba ročního využití produkovaného chladu. [27][30]

Z hlediska realizovatelnosti se jako perspektivnější možnost produkce chladu jeví jeho výroba pomocí lokálních chladících stanic (obr. 4.13b), kdy se využije již vybudovaných rozvodů dálkového zásobování teplem. Krátká vzdálenost mezi chladící stanicí a předávacím místem u koncových odběratelů zajišťuje dodržení požadovaných parametrů chladné vody. Závislost absorpčních chladících stanic (ACHS) na dodávkách tepla z rozvodů dálkového zásobování teplem představuje hlavní nevýhodu tohoto způsobu produkce chladu. Pro zajištění provozu absorpčních chladících jednotek je totiž nutné i v období minimálního odběru tepla – během letních měsíců – udržovat teplotu dálkových rozvodů tepla na úrovni pracovních teplot chladících stanic, což vede k nárůstu tepelné ztráty. I přes tuto nevýhodu má absorpční chlazení potenciál nahradit v současnosti hojně využívané venkovní klimatizační jednotky, které jsou založeny na principu kompresorového chlazení.[26][30]

## 5 Dynamika bioplynové stanice

Znalost dynamického chování bioplynové stanice ve vztahu teploty okolí k produkci tepla a využití tepla z kogenerační jednotky je klíčovým faktorem při plánování využití odpadního tepla pro další účely.

Analýza dynamiky byla zpracována na základě provozních dat bioplynové stanice, u které byly nejnáze dostupné požadované údaje. Vzhledem k citlivosti dat není možné sdělit název stanice, z hlediska typu se jedná o zemědělskou bioplynovou stanici.

Analyzovaná stanice zpracovává materiál ze zemědělské výroby, rostlinné hmoty, kukuřičné siláže, prasečí a hovězí kejdu, cukrovarnické řízky a obiloviny. Z procesu anaerobní fermentace je získáván bioplyn, který lze použít pro spalování v kogenerační jednotce. Kogenerační jednotka produkuje elektrickou energii a teplo. Elektrická energie je vyvedena a prodávána do rozvodné sítě. V případě potřeby je možné využít kogenerační jednotku jako záložní zdroj elektrické energie. Teplo je využíváno pouze pro ohřev homogenizační nádrže a dvou fermentorů, zbytek tepelného výkonu není využíván a je mořen do ovzduší.

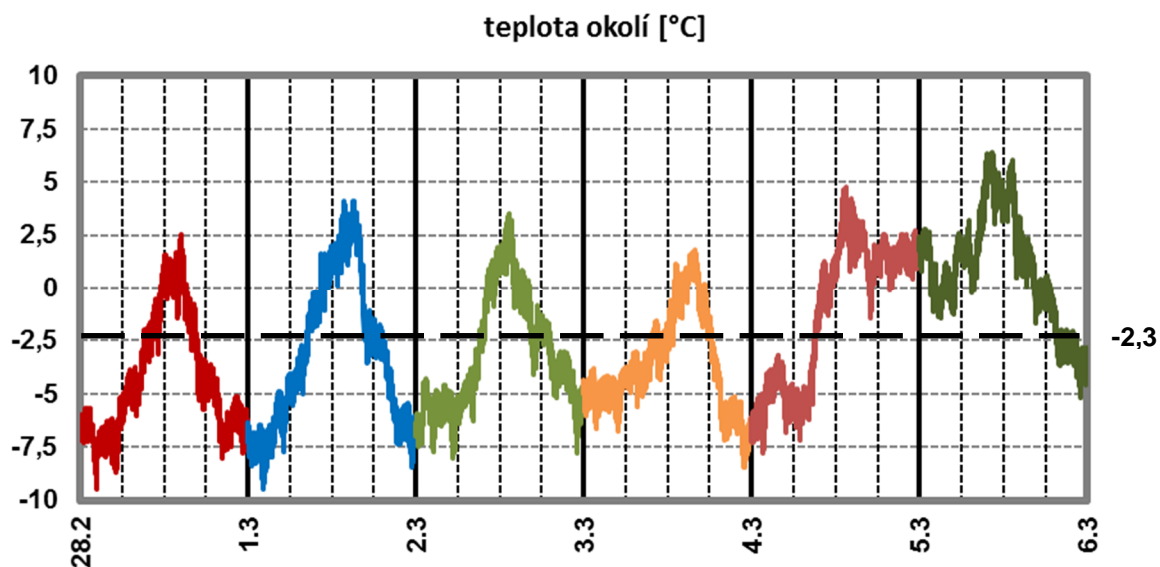
Vzhledem k malému množství získaných dat byly chybějící údaje pro výpočet množství využitého tepla, např. hmotnostní průtok ze známé charakteristiky čerpadla, dopočteny. Využitím tohoto postupu lze postupu lze předpokládat zanesení chyby měření do přesnosti výpočtů. Pro eliminaci chyby výpočtu a chyby měření bylo aplikováno Gaussovo rozdělení s rozptylem  $2\sigma$ .

Pro popis dynamického chování byly vybrány tři základní provozní stavy označené jako zimní provoz, jarní provoz a letní provoz. [31]

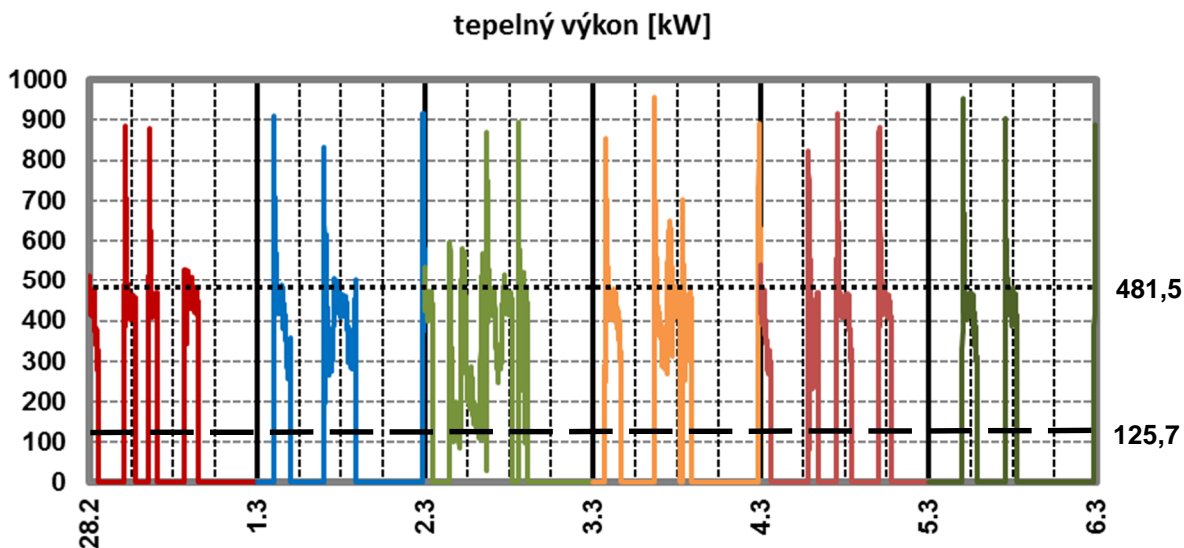
### 5.1 Zimní provoz

Na definici zimního provozu lze pohlížet dvě různými pohledy. Zimní provoz je možné chápat jako provoz v období meteorologického zimy, tzn. v období od 1. prosince do 28. února (v přestupném roce 29. února). Druhým možným kritériem může být stanovení hranice minimální teploty, při jejímž dosáhnutí se daný den zařadí do zimního provozu. Jako kritérium lze použít např. mrazový den, tj. den s minimální teplotou pod  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ . V některých případech může být výhodné oba principy zkombinovat, kdy se celková doba zimního provozu skládá z provozu v zimních měsících a k ní se připočítávají listopadové a březnové dny, které splňují nastavené podmínky pro zařazení do zimního provozu.

Zimní provoz se vyznačuje vysokou spotřebou tepla, viz obr. 5.2, na ohřev fermentorů z důvodu velkého rozdílu teplot mezi fermentorem a okolím. Pro zamezení nedovoleného poklesu teploty ve fermentoru, který by narušoval produkci bioplynu, se vsázka do fermentoru čerpá po malých dávkách. Dávkování se do křivky tepelného výkonu promítá ve formě několika po sobě jdoucích odběrových špiček, kdy celková doba trvání odběru představuje 25 až 60 % délky dne. Jednotlivé odběrové špičky trvají 1–5 hodin při průměrném dostupném maximu výkonu  $481,5\text{ kW}_t$  (tečkovaná čára). Průměrný denní odebíraný tepelný výkon za sledované období činil  $125,7\text{ kW}_t$  (přerušovaná čára), což představuje 26 % z dostupného denního maxima výkonu.

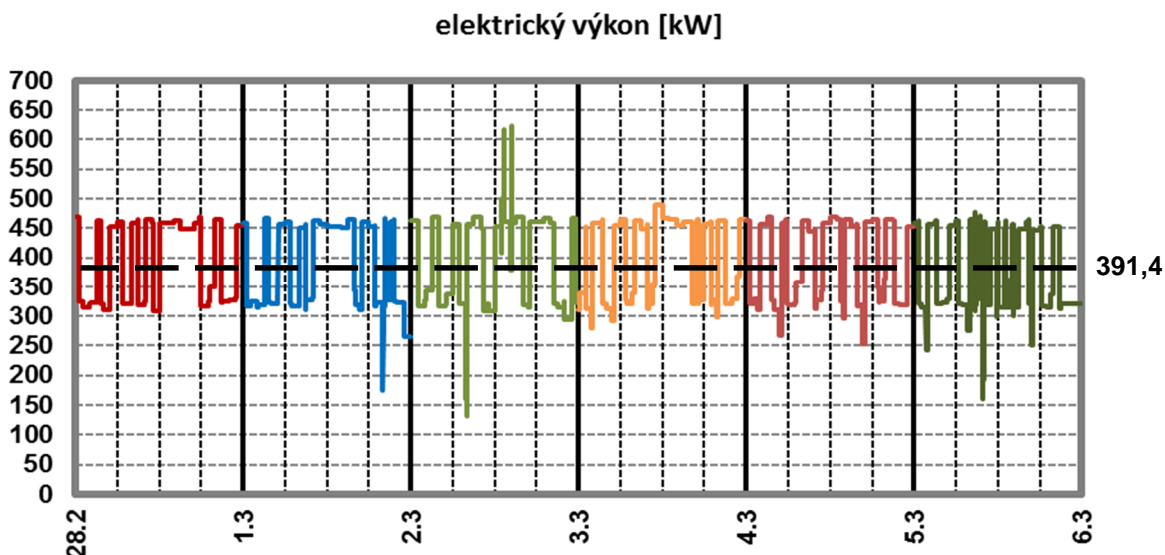


Obr. 5.1 Graf průběhu teploty okolí během zimního provozu [31]



Obr. 5.2 Graf tepelného výkonu kogenerační jednotky během zimního provozu [31]

Křivka aktuálního elektrického výkonu kogenerační jednotky, znázorněná na obrázku 5.3, vlivem nestabilní produkce bioplynu nebo teploty nasávaného vzduchu pod minimální požadovanou teplotou kogenerační jednotky, osciluje v rozmezí 280–470 kW<sub>e</sub>. Stabilizovaný výkon kolem 450 kW<sub>e</sub> nastával v situacích, kdy byla ohřevem dorovnána teplota na provozní hodnotu. Průměrný elektrický výkon za sledované období zimního provozu byl stanoven na hodnotě 391,4 kW<sub>e</sub>.

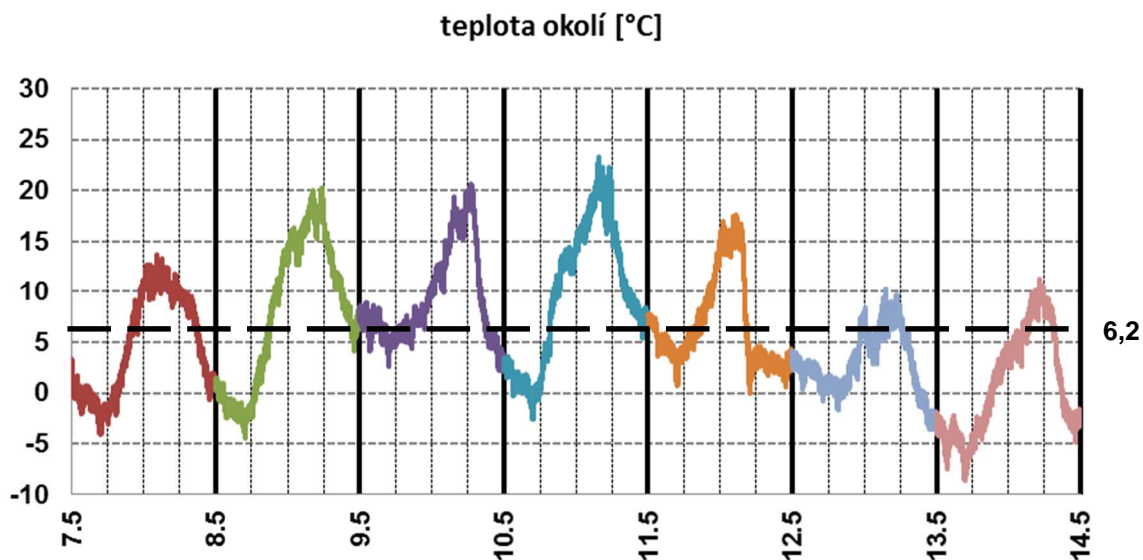


Obr. 5.3 Graf elektrického výkonu kogenerační jednotky během zimního provozu [31]

## 5.2 Jarní provoz

Jako jarní provoz se, poněkud nepřesně, označuje provoz ve dnech, jenž nejsou zahrnuty do zimního a letního provozu. Z pohledu této definice by se mělo jednat o přechodový stav, v klimatických podmínkách střední Evropy však tento provoz může zahrnovat většinu roku.

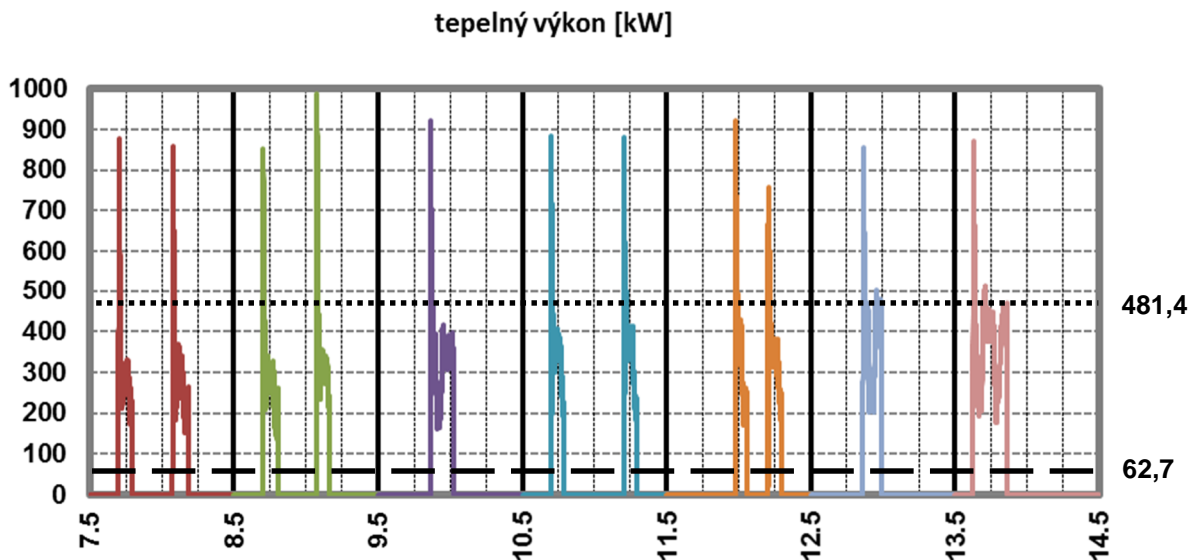
Pro charakteristiku jarního provozu byl vybrán týdenní úsek, v němž jsou zastoupeny dny s minimálními teplotami pod bodem mrazu a maximální teplotou, která se blíží hodnotě letního dne. I přes velký rozptyl teplot, kdy minimální teplota úseku činí  $-8,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  a maximální teplota  $22,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ , má sledovaný úsek průměrnou teplotu  $6,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ , která je obvyklá pro jarní podzimní měsíce.



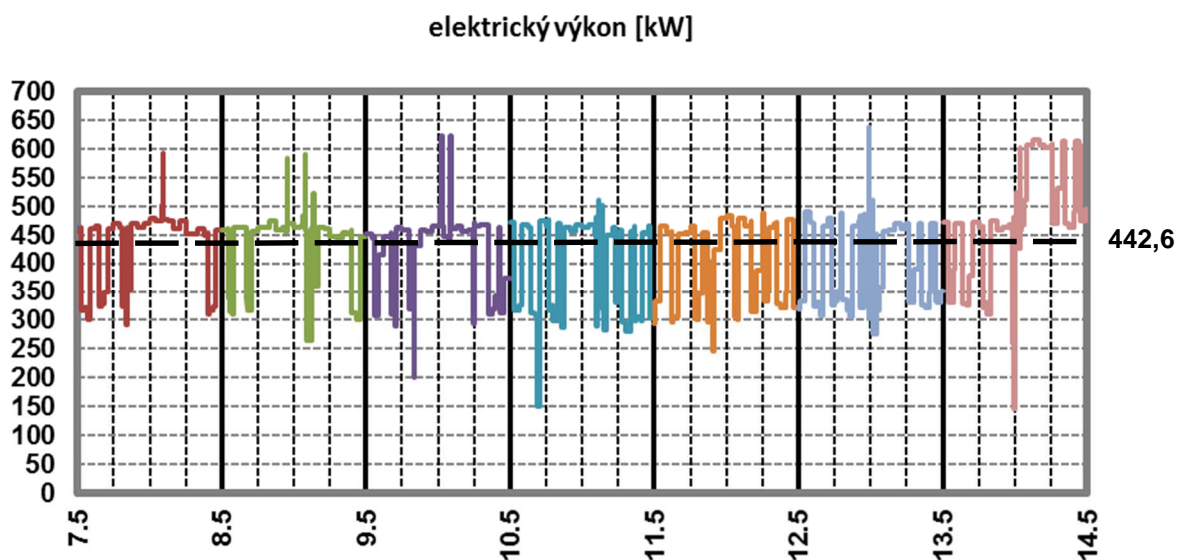
Obr. 5.4 Graf průběhu teploty okolí během jarního provozu [31]

Tvar křivky využitého tepelného výkonu kogenerační jednotky je možné popsat jako soubor křivek letního a zimního provozu, jenž jsou řazeny podle charakteristiky dní ve sledovaném

období. Na průběhu křivky ze 12. a 13. 5. lze sledovat teplotní setrvačnost fermentorů, kdy se při ochlazení v těchto dnech spotřeba tepla zvyšovala méně než u srovnatelného dne zimního provozu. Při hodnocení celého období bylo průměrné denní využití tepelného výkonu  $62,7 \text{ kW}_t$ , což při průměrném dostupném denním maximu  $481,4 \text{ kW}_t$  představuje využití 13 % denního tepelného výkonu.



Obr. 5.5 Graf tepelného výkonu kogenerační jednotky během jarního provozu [31]

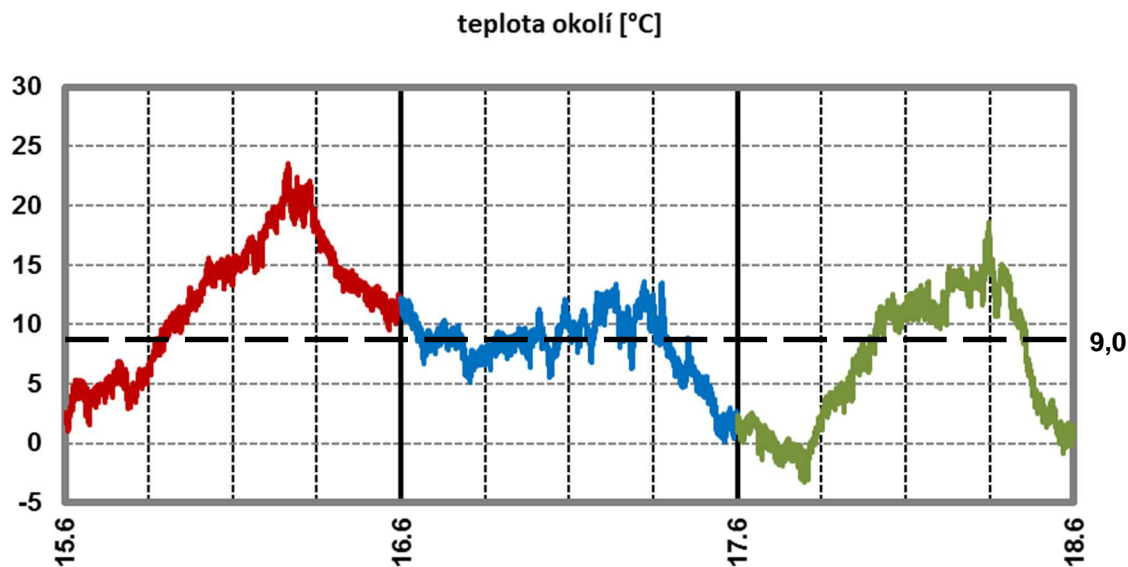


Obr. 5.6 Graf elektrického výkonu kogenerační jednotky během jarního provozu [31]

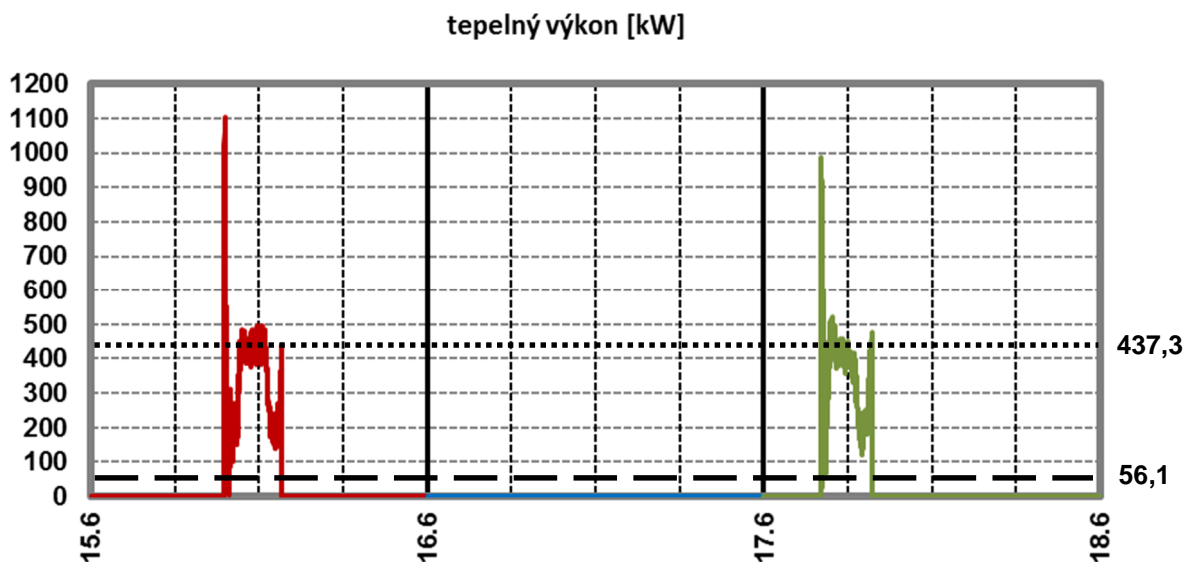
Křivka elektrického výkonu (obr. 5.6) během jarního provozu vykazuje oscilativní trend podobný zimnímu provozu. Díky průměrným denním teplotám nad bodem mrazu se zvedá teplota nasávaného vzduchu a snižují se nároky na vytápění fermentoru, což se v grafu projevuje úseky se stabilním výkonem. Díky stabilizaci výkonu kogenerační jednotky vzrostlo průměrné dostupné denní maximum na  $442,6 \text{ kW}_{el}$ . Razantní nárůst výkonu 13. 5. od 12:00 je způsoben poruchou elektroměru či záznamového zařízení, proto nebyla tato data zahrnuta do analýzy.

### 5.3 Letní provoz

Letní provoz je možné, obdobně jako zimní provoz, definovat dvěma způsoby. K definici můžeme použít období meteorologického léta, tj. období od 1. června do 31. srpna, nebo stanovení podmínky dosažení určité teploty během dne. Jako kritérium teploty nám může posloužit letní den, tj. den s dosaženou či překročenou maximální teplotou 25°C. Při kombinaci obou přístupů se k letním měsícům připočítávají květnové a zářijové dny, které splňují nastavenou podmínku pro zařazení do letního provozu.



Obr. 5.7 Graf průběhu teploty okolí během letního provozu [31]



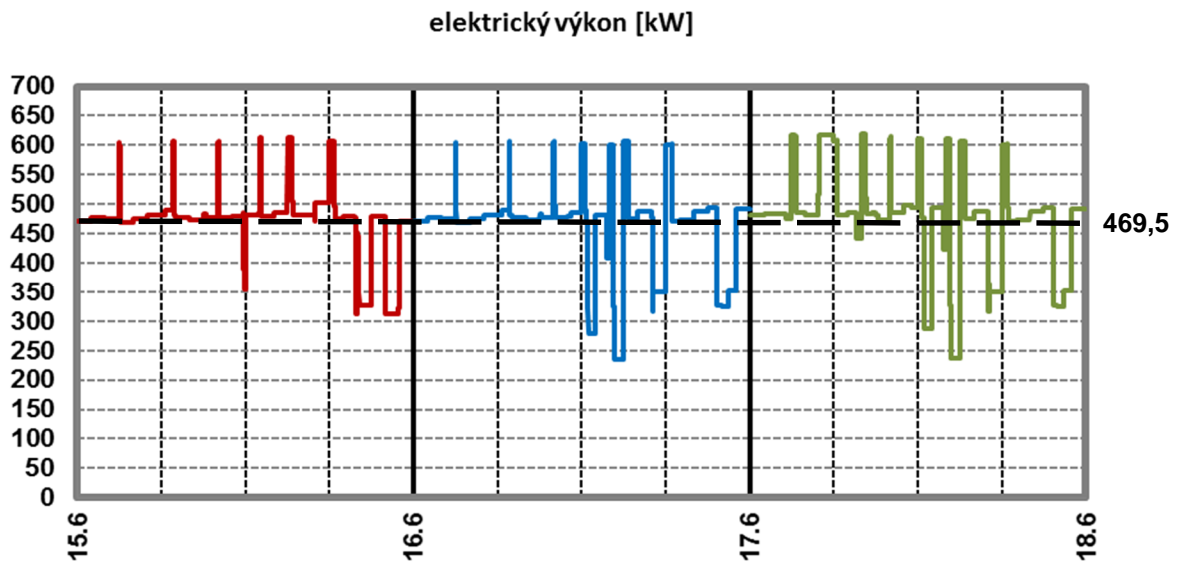
Obr. 5.8 Graf tepelného výkonu kogenerační jednotky během letního provozu [31]

Ve sledovaném třídenním období, graficky zobrazeném na obr. 5.7, byla zaznamenána průměrná teplota 9,0°C, minimální teplota -3,1 °C a maximální teplota 23 °C. Z hlediska průměrné teploty lze konstatovat, že se ve výběru nachází den teplotně nadprůměrný, den přibližně průměrný i den teplotně podprůměrný.



V tomto období vysoká průměrná denní teplota snižuje spotřebu tepla na vytápění fermentorů a hygienizační nádrže. Teplo je z kogeneračních jednotek odebíráno pouze v době příjmu nové vsázky, kdy je nutno vsázku dohřívát, aby nedošlo k poklesu teploty uvnitř fermentoru. Typický odběr tepla ve sledovaném období, viz obr. 5.8, probíhal jedenkrát denně, trval přibližně 230 minut a využíval veškerý dostupný tepelný výkon, průměrně 437,3 kW<sub>t</sub>. Nízká četnost a krátká doba trvání odběrů tepla snižuje denní průměr spotřeby tepla na 56,1 kW<sub>t</sub>, což představuje 12,8 % maximálního denního dostupného tepelného výkonu. Údaje ze dne 16. 6. nejsou zaznamenány z důvodu chyby při záznamu dat.

V daném období je proces vývinu bioplynu stabilní, což lze dokázat na výrobě elektrického proudu, zobrazeném na obrázku 5.9. Aktuální hodnoty elektrického výkonu se v 68 % přibližně pohybují kolem průměrného elektrického výkonu za dané období, který činí 469,5 kW<sub>el</sub>. Výkyvy výkonu jsou způsobeny chybou při odečtu či extrapolaci dat (krátkodobé špice s ostrým vrcholem), nebo dočasnou nerovnoměrnou produkcí bioplynu (špice s plochým vrcholem), např. při čerpání nové vsázky.



Obr. 5.9 Graf elektrického výkonu kogenerační jednotky během letního provozu [31]

## 5.4 Vyhodnocení dynamiky bioplynové stanice

Analýzou variant provozu bioplynové stanice, jehož shrnutí je uvedeno v tabulce 5.1, byl zjištěn stálost maximálního dosažitelného denního výkonu, avšak rozdílné využití tepelného výkonu v závislosti na okolní teplotě. Při krátkodobém výrazném ochlazení se také projevoval pozitivní trend tepelné setrvačnosti fermentorů, kdy vlivem akumulovaného tepla ve fermentorech (hygienizační nádrži) a nižšímu poklesu teploty stěn fermentorů (hygienizační nádrže) byl využívaný denní tepelný výkon menší než využívaný denní tepelný výkon za stejných teplotních podmínek během dlouhodobého ochlazení.

Z pohledu celkového využití tepelného výkonu bylo průměrně ve sledovaných obdobích průměrně využíváno pouze 12,8–26 % dostupného denního maxima výkonu, takže většina tepelného výkonu zůstává nevyužitá. Při největší spotřebě tepla, konkrétně v zimním období, bylo pro další aplikace možno využít minimální dostupný tepelný výkon 321,1 kW<sub>t</sub>. V případě použití vhodného využití systému akumulace tepla pro kompenzaci kolísání hodnot dostupných



denních výkonů, by bylo možné zvýšit dostupný tepelný výkon až k hodnotám průměru za celé sledované období, což v případě zimního provozu znamená nárůst až na 355,9 kW<sub>t</sub>.

Z pohledu elektrického výkonu lze považovat stav v jednotlivých obdobích provozu považovat za ustálený a drobné denní odchylky od průměru období jsou způsobeny dynamickým chováním anaerobního procesu produkce bioplynu.

Tab. 5.1 Shrnutí parametrů z měření BPS

Den	Průměrný denní elektrický výkon	Průměrný denní tepelný výkon	Maximálně dosažitelný průměrný denní tepelný výkon	Procento využití tepelného výkonu	Průměrný dostupný tepelný výkon	Průměrná denní teplota	
	[kW]	[kW]	[kW]	[%]	[kW]	[°C]	
Zimní provoz	28.2.	393,6	116,9	484,2	24,14%	367,3	-4,2
	1.3.	387,7	128,1	477	26,86%	348,9	-3,1
	2.3.	397,7	168,2	489,3	34,38%	321,1	-3,1
	3.3.	400,4	140,7	492,6	28,56%	351,9	-3,5
	4.3.	398,4	119,7	490,2	24,42%	370,5	-1,0
	5.3.	370,4	80,3	455,7	17,62%	375,4	1,0
	<b>období</b>	<b>391,4</b>	<b>125,7</b>	<b>481,5</b>	<b>26,00%</b>	<b>355,9</b>	<b>-2,3</b>
Jarní provoz	7.5.	432,7	61,4	480,3	12,78%	418,9	5,0
	8.5.	431,8	60,3	476,6	12,65%	416,3	8,0
	9.5.	426,8	52,3	480,2	10,89%	427,9	9,5
	10.5.	389,7	65,0	479,4	13,56%	414,4	9,9
	11.5.	404,8	60,5	498	12,15%	437,5	7,0
	12.5.	395,4	50,8	486,4	10,44%	435,6	3,0
	13.5.	477,3	88,3	468,9	18,83%	380,6	0,9
<b>období</b>	<b>422,6</b>	<b>62,7</b>	<b>481,4</b>	<b>13,04%</b>	<b>418,7</b>	<b>6,2</b>	
Letní provoz	15.6.	470,6	58,4	448,6	13,02%	390,2	12,0
	16.6.	462,1	0	0	0	0	8,3
	17.6.	475,9	53,7	426,8	12,58%	373,1	6,7
	<b>období</b>	<b>469,5</b>	<b>56,1</b>	<b>437,7</b>	<b>12,80%</b>	<b>381,7</b>	<b>9,0</b>

Pokud by provozovatel BPS plánoval získat podporu pro výkup elektrické energie ve formě tzv. zeleného bonusu, musel pro by pro splnění podmínky poskytnutí dotace zajistit využití pro 90 kW<sub>t</sub>, optimálně však pro 95 kW<sub>t</sub> odpadního tepla z dostupného tepelného výkonu.

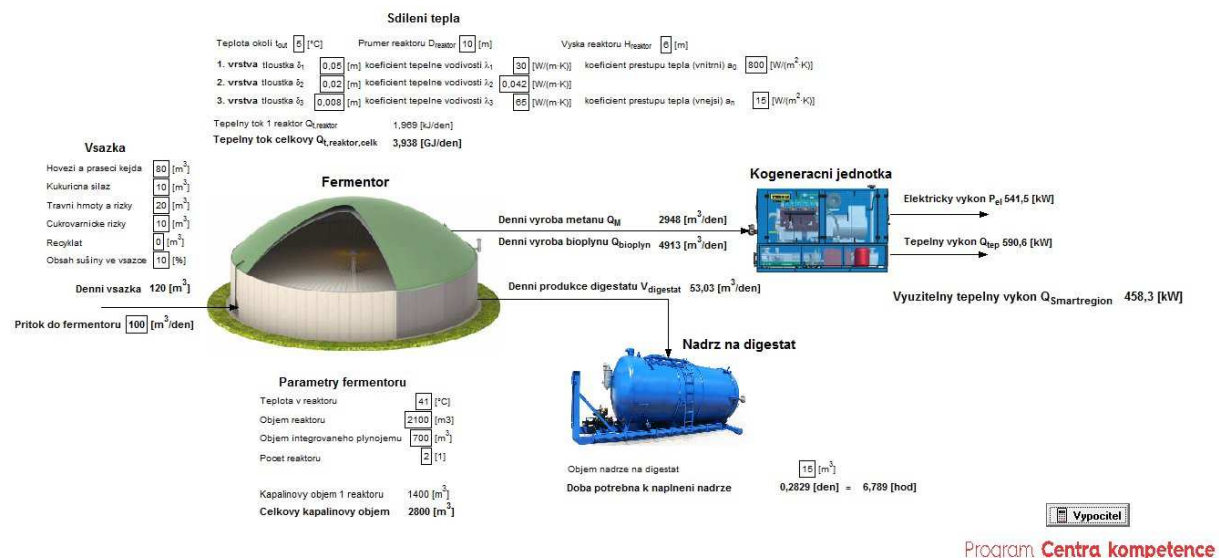
## 6 Návrh bioplynové stanice

Jedním z cílů této diplomové práce je vytvoření matematického modelu referenční bioplynové stanice s důrazem na využití odpadního tepla a návrh způsobu připojení ke Smart networks v rámci Smart regionu.

Za referenční stanici je zvolena BPS zemědělského typu s mokřým procesem fermentace. Fermentace bude probíhat ve vertikálních fermentorech v mezofilním pásmu a získaný bioplyn bude spalován v kogenerační jednotce. Veškerá vyrobená el. energie bude prodávána do sítě. Vyrobené teplo bude použito na pokrytí vlastní spotřeby bioplynové stanice a zbylé teplo bude dodáváno do sítě dálkového rozvodu tepla a chladu.

### 6.1 Návrh výpočtového modelu

Pro vytvoření matematického modelu byl použit program Engineering Equation Solver (EES). Koncept modelu je uzpůsoben tak, aby bylo možné výpočet ovládat z grafického prostředí (viz obr. 6.1). Matematický model je možno nalézt jako Přílohu 1 (zdrojový kód) a Přílohu 2 (samostatně spustitelný soubor) na CD přiloženém k této diplomové práci.



Obr. 6.1 Grafické prostředí matematického modelu BPS

V současnosti se používají rozmanitá technologická řešení příjmu a zpracování surovin, způsobu míchání a čerpání reagující suspenze a nakládání s digestátem. Pro zajištění univerzálnosti použití při projekci zemědělské bioplynové stanice uvažuje model pouze základní prvky bioplynové stanice: fermentory, kogenerační jednotku a nádrž na digestát.

Pro zjednodušení výpočtového modelu byly zavedeny následující předpoklady:

- Vsázka na vstupu do fermentoru je ve formě homogenizované suspenze s obsahem sušiny do 12 %
- V modelu nejsou uvažována čerpadla pro čerpání suspenze a digestátu
- V modelu je zanedbán příkon motorů míchadel suspenze ve fermentoru
- Veškerá vyrobená el. energie je dodávána do sítě

- Digestát je z procesu fermentace vyskladňován přímo do automobilových cisteren na digestát a použit jako organické hnojivo

Model je rozdělen do tří hlavních částí: charakteristiky vstupních surovin, výpočtu výroby bioplynu v procesu fermentace a výpočtu kogenerační jednotky.

### 6.1.1 Vsázka

Vsázka pro proces fermentace, jak již bylo výše zmíněno, je ve formě homogenizované suspenze. Suspenzi na vstupu do procesu fermentace charakterizuje:

- denní přítok do fermentoru  $Q_{\text{suspenze}}$  [ $\text{m}^3/\text{den}$ ]
- teplota  $t_{\text{suspenze}}$  [ $^{\circ}\text{C}$ ]
- objem jednotlivých vstupních surovin vsázky  $V_x$  [ $\text{m}^3$ ] a celkový denní objem vstupních surovin  $V_{\text{vsázka}}$  [ $\text{m}^3$ ]
- hustota suspence  $\rho_{\text{suspenze}}$  [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]
- tepelná kapacita suspence  $c_{\text{suspenze}}$  [ $\text{kJ}/(\text{K}\cdot\text{kg})$ ]
- teoretická výtěžnost metanu za nekonečnou dobu zdržení  $B_0$  [ $\text{m}^3 \text{CH}_4/\text{kg}$  substrátu]
- výtěžnost metanu za danou dobu zdržení  $B$  [ $\text{m}^3 \text{CH}_4/\text{kg}$  substrátu]
- koncentrace biologicky rozložitelného substrátu  $S_0$  [ $\text{kg}/\text{m}^3$  suspenze]; pro snadnější obsluhu výpočtu je  $S_0$  zadáváno v [%]

#### Vstupní suroviny vsázky

Pro vsázku uvažované stanice jsou využívány typické odpady ze zemědělské produkce:

- Hovězí a prasečí kejda (hpk)
- Kukuřičná siláž (ksz)
- Travní hmoty a řízky (thr)
- Cukrovarnické řízky (cur)
- Recyklát (rec)

Celkový objem surovin pro denní vsázku se určí jako suma jednotlivých složek:

$$V_{\text{vsázka}} = V_{\text{hpk}} + V_{\text{ksz}} + V_{\text{thr}} + V_{\text{cur}} + V_{\text{rec}} \quad (6.1)$$

#### Teoretická výtěžnost metanu

Teoretický výtěžek metanu jednotlivých vstupních surovin (výtěžnost metanu za nekonečnou dobu zdržení ve fermentoru) lze přesně stanovit pomocí laboratorního rozboru. Spolu s teoretickým výtěžkem metanu se z rozboru získá i obsah rozložitelného substrátu v surovině. Na základě laboratorních rozborů byly různými autory sestaveny tabelované přehledy. Teoretická výtěžnost metanu pro jednotlivé použité suroviny je uvedena v tab. 6.1, hodnoty použité v modelu lze podle potřeby měnit.

Teoretická výtěžnost metanu ze vsázky se určí jako:

$$B_0 = \frac{V_{\text{hpk}} \cdot B_{0\text{hpk}} + V_{\text{ksz}} \cdot B_{0\text{ksz}} + V_{\text{thr}} \cdot B_{0\text{thr}} + V_{\text{cur}} \cdot B_{0\text{cur}} + V_{\text{rec}} \cdot B_{0\text{rec}}}{V_{\text{vsázka}}} \quad (6.2)$$

kde  $B_0$  ... teoretická výtěžnost metanu ze vstupní vsázky [ $\text{m}^3 \text{CH}_4/\text{kg}$  substrát]  
 $B_{0,x}$  ... teoretická výtěžnost metanu z jednotlivých surovin [ $\text{m}^3 \text{CH}_4/\text{kg}$  substrát]  
 $V_{\text{vsázka}}$  ... celkový denní objem vstupních surovin [ $\text{m}^3$ ]

Tab. 6.1 Teoretická výtěžnost metanu z jednotlivých vstupních materiálů [6.7] [6.8]

Materiál	Tabelovaná výtěžnost [ $\text{m}^3 \text{CH}_4/\text{kg}$ substrát]	Výtěžnost použitá v modelu [ $\text{m}^3 \text{CH}_4/\text{kg}$ substrát]
Hovězí kejda	0,17 – 0,40	0,456
Prasečí kejda	0,32 – 0,50	
Kukuřičná siláž	0,37	0,370
Travní hmoty a řízky	0,18 – 0,31	0,245
Cukrovarnické řízky	0,24 – 0,366	0,322
Recyklát	–	0,238

### Výtěžnost metanu za danou dobu zdržení

V praxi proces fermentace probíhá pouze po danou dobu zdržení, teoretické výtěžnosti metanu nelze tedy dosáhnout. Praktickou výtěžnost lze odečíst z grafických závislostí na hydraulické době zdržení, nebo určit pomocí vztahu [6.2]:

$$B = 0,216 + 0,00934 \cdot t_r \quad (6.3)$$

kde  $B$  ... výtěžnost metanu ze vsázky za danou dobu zdržení [ $\text{m}^3 \text{CH}_4/\text{kg}$  substrát]  
 $t_r$  ... teplota fermentačního procesu [ $^{\circ}\text{C}$ ]

### Teplu pro homogenizační proces

Pro zajištění stability procesu fermentace je nutné omezit výkyvy teplot uvnitř fermentoru, proto se vstupní suspenze během procesu homogenizace ohřívá na teplotu blízkou teplotě uvnitř fermentoru. Zvýšení teploty během homogenizace také umožňuje snadnější homogenizaci viskózních materiálů. Výpočet potřebného tepla je znázorněn pomocí rovnice (6.4).

$$Q_{\text{vsázka}} = Q_{\text{suspenze}} \cdot \rho_{\text{vsázka}} \cdot c_{\text{vsázka}} \cdot (t_{\text{suspenze}} - t_{\text{out}}) \quad (6.4)$$

kde  $Q_{\text{vsázka}}$  ... teplo potřebné pro ohřev vsázky [kJ/den]  
 $Q_{\text{suspenze}}$  ... denní přítok suspenze do fermentoru [ $\text{m}^3/\text{den}$ ]  
 $\rho_{\text{vsázka}}$  ... hustota suspenze [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]  
 $t_{\text{suspenze}}$  ... teplota suspenze na vstupu do reaktoru [ $^{\circ}\text{C}$ ]  
 $t_{\text{out}}$  ... teplota okolí [ $^{\circ}\text{C}$ ]

### 6.1.2 Proces anaerobní fermentace

Proces fermentace probíhá v identických vertikálních válcových nádržích (reaktorech) ze šroubovaných smaltovaných plechů s integrovaným plynojemem místo střechy. Technická

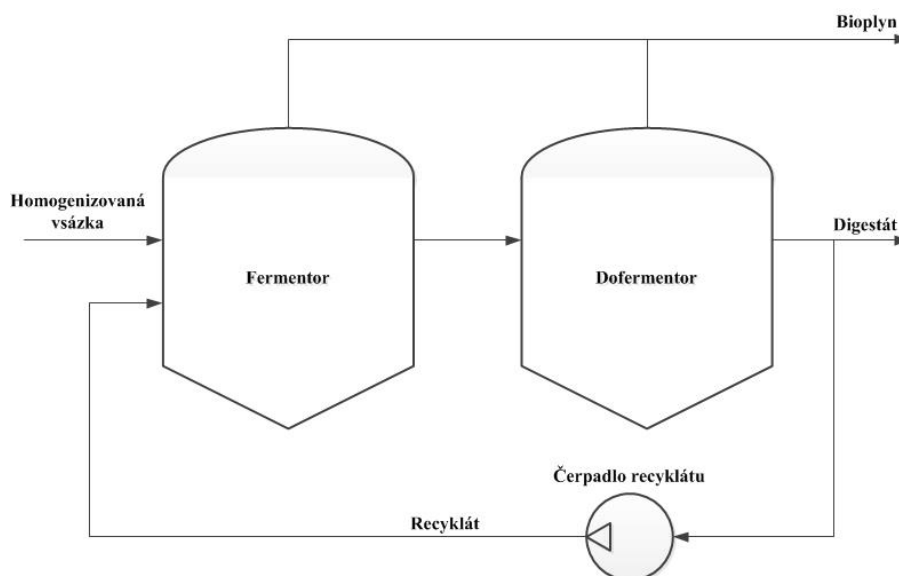
specifikace použité nádrže od společnosti Vítkovice Power Engineering je podrobně uvedena v tab. 6.2. Reaktory jsou řazeny sériově s možností recyklu. Model umožňuje nastavení libovolného počtu fermentorů v sérii. Primárně je však koncipován pro standardně používaný počet dvou fermentorů (obr. 6.2), kdy 1. reaktor slouží jako fermentor a 2. reaktor jako dofermentor. Přečerpávání reagující suspenze do dofermentorů a recyklátu do fermentoru probíhá kontinuálně. Jako recyklát slouží gravitačně separovaný digestát odcházející z dofermentorů.

Tab. 6.2 Technická specifikace fermentační nádrže [35]

Položka	Hodnota
Typ	Vertikální válcový reaktor s integrovaným plynojemem
Průměr	16,29 m
Výška	13 m
Objem fermentační nádrže	2100 m <sup>3</sup>
Objem integrovaného plynojemu	700 m <sup>3</sup>
Požadovaná teplota ve fermentoru	41°C
Topný systém	Vestavěný topný had s proudící teplou vodou
Teplota topné vody na vstupu	Dle konstrukce topného systému a izolace fermentoru
Teplota topné vody na výstupu	Dle konstrukce topného systému a izolace fermentoru
Míchací systém	Mechanický – vrtulové míchadlo

Fermentační proces probíhá za následujících parametrů:

- Jednostupňová fermentace
- Mezofilní proces o teplotě 41 °C
- Průměrná denní dávka suspenze 100 m<sup>3</sup> o hmotnostním obsahu sušiny max. 12 %
- Celková doba zdržení ve fermentorech 42 dní



Obr. 6.2 Schéma zapojení reaktorů

### 6.1.2.1 Kinetika tvorby metanu

Pro sledování kinetiky procesu anaerobních rozkladů ve fermentorech je využita závislost mikrobiálního růstu na koncentraci suspenze a mikrobiální hmoty. Matematický popis specifické růstové rychlosti bakterií využívá vztahu [2]:

$$\mu = \frac{\mu_m \cdot \frac{S}{S_0}}{K + \frac{(1-K) \cdot S}{S_0}} \quad (6.5)$$

- kde  $\mu$  ... měrná rychlost růstu mikroorganismů [čas<sup>-1</sup>]  
 $\mu_m$  ... maximální měrná rychlost růstu mikroorganismů [čas<sup>-1</sup>]  
 $K$  ... kinetický parametr [-]  
 $S$  ... koncentrace biologicky rozložitelného substrátu na výstupu z reaktoru [%]  
 $S_0$  ... koncentrace biologicky rozložitelného substrátu na vstupu do reaktoru [%]

Kinetický parametr  $K$  může být stanoven z grafické závislosti hydraulické doby zdržení, maximální měrné rychlosti růstu mikroorganismů a poměrné výtěžnosti metanu, nebo pomocí závislosti na koncentraci substrátu na vstupu do reaktoru. Pro potřeby tohoto modelu je využita druhá možnost, která je reprezentována vztahem [32]:

$$K = 0,6 + 0,0206 \cdot \exp(0,051 \cdot S_0 \cdot 10) \quad (6.6)$$

Maximální měrnou rychlost růstu mikroorganismů  $\mu_m$  lze získat, podobně jako kinetický parametr  $K$ , z grafické závislosti hydraulické doby zdržení a poměrné výtěžnosti metanu, nebo na základě teplotních závislostí. Odhad hodnoty  $\mu_m$  se u různých autorů rozchází, pro výpočet byl proto zvolen nejčastěji používaný vztah dle Chena, Hasimota a Varla [2]:

$$\mu_m = 0,013 \cdot t_r - 0,129 \quad (6.7)$$

- kde  $\mu_m$  ... maximální měrná rychlost růstu mikroorganismů [čas<sup>-1</sup>]  
 $t_r$  ... teplota fermentačního procesu [°C]

V matematickém modelu je teplota fermentačního procesu  $t$  nahrazena teplotou reaktoru  $t_r$ .

Za předpokladu ustáleného toku suspenze reaktorem je možné stanovit poměrnou spotřebu substrátu jako [2]:

$$\frac{S}{S_0} = \frac{K}{\mu_m \cdot \Theta - 1 + K} \quad (6.8)$$

- kde  $\frac{S}{S_0}$  ... poměrná spotřeba substrátu [%]  
 $K$  ... kinetický parametr [-]  
 $\Theta$  ... hydraulická doba zdržení [den]

Výpočet kinetiky tvorby metanu nevyužívá celkovou dobu pobytu suspenze v reaktorech, ale zavádí náhradní parametr, hydraulickou dobu zdržení  $\Theta$ . Hydraulická doba zdržení se určí z následujícího poměru [2]:

$$\Theta = \frac{V}{Q_{\text{suspenze}}} \quad (6.9)$$

kde  $V$  ... objem reaktoru [ $\text{m}^3$ ]  
 $Q_{\text{suspenze}}$  ... průtok suspenze [ $\text{m}^3/\text{den}$ ]

Při využití dvou reaktorů s integrovaným plynojemem je za objem reaktoru  $V$  dosazen celkový kapalinový objem fermentačních zařízení  $V_{Lc}$  [ $\text{m}^3$ ].

### 6.1.2.2 Denní výroba metanu

Pro stanovení denní výroby bioplynu je nutné vypočítat denní produkci jeho většinové složky, metanu. Denní výroba metanu se stanoví jako součin měrné objemové rychlosti vývinu metanu  $\gamma_M$  a celkového kapalinového objemu zařízení pro fermentaci  $V_{Lc}$  [2]:

$$Q_M = \gamma_M \cdot V_{Lc} \quad (6.10)$$

kde  $Q_M$  ... denní výroba metanu [ $\text{m}^3 \text{CH}_4/\text{den}$ ]  
 $\gamma_M$  ... měrná objemová rychlost vývinu metanu [ $\text{m}^3 \text{CH}_4/(\text{m}^3 \cdot \text{den})$ ]  
 $V_{Lc}$  ... celkový kapalinový objem reaktorů [ $\text{m}^3$ ]

Celkový kapalinový objem reaktoru bez integrovaného plynojemu se rovná objemu celého reaktoru. Pro potřeby tohoto modelu jsou použity reaktory s integrovaným plynojemem, proto je nutné určit kapalinový objem reaktoru [2]:

$$V_{L;1r} = V_r - V_p \quad (6.11)$$

kde  $V_{L;1r}$  ... kapalinový objem 1 reaktoru [ $\text{m}^3$ ]  
 $V_r$  ... objem reaktoru [ $\text{m}^3$ ]  
 $V_p$  ... objem integrovaného plynojemu [ $\text{m}^3$ ]

Celkový kapalinový objem  $V_{Lc}$  je pak dán součinem počtu reaktorů a kapalinového objemu reaktoru:

$$V_{Lc} = n_r \cdot V_{L;1r} \quad (6.12)$$

kde  $n_r$  ... počet reaktorů [-]

Měrná objemová rychlost vývinu metanu závisí na kinetických parametrech vstupních surovin a růstu mikroorganismů a na hydraulické době zdržení. Pro odhad měrné objemové rychlosti vývinu metanu je použit vztah dle Chena a Hasimota [32]:

$$\gamma_M = \frac{B_0 \cdot S_0 \cdot 10}{\Theta} \cdot \left( 1 - \frac{K}{\Theta \cdot \mu_m - 1 + K} \right) \quad (6.13)$$

- kde  $\gamma_M$  ... měrná objemová rychlost vývinu metanu [ $\text{m}^3 \text{CH}_4/(\text{m}^3 \cdot \text{den})$ ]  
 $S_0$  ... koncentrace biologicky rozložitelného substrátu na vstupu do reaktoru  
 [kg substrátu/ $\text{m}^3$  suspenze]  
 $\Theta$  ... hydraulická doba zdržení [den]  
 $\mu_m$  ... maximální měrná rychlost růstu mikroorganismů [ $\text{den}^{-1}$ ]  
 $K$  ... kinetický parametr [-]

Jak plyne z rovnice (6.9), denní produkce metanu, respektive bioplynu, vůbec nezávisí na zatížení reaktoru. Lze proto předpokládat, že při zpracovávání stejného množství vstupních surovin a dodržení konstantních hodnot hydraulické doby zdržení, stálé teploty v reaktoru a nestresového stavu reaktoru, bude výroba metanu stejná. Za stresový stav se považuje stav, kdy dochází k selhání methanogenních bakterií a okyselení prostředí vlivem vysoké koncentrace biologicky rozložitelných látek na vstupu do procesu fermentace.

### 6.1.2.3 Denní výroba bioplynu

Na základě znalosti denní výroby metanu a předpokládané koncentrace jednotlivých plynných složek v získávaném bioplynu je možné provést výpočet denního množství bioplynu. Při procesu fermentace se spolu s bioplynem uvolňuje vodní pára. Malé množství vodní páry (do 5 % obj.) je možné v bioplynu ponechat. Vyšší koncentrace vodní páry se na výstupu z fermentoru odstraňuje kondenzací v odvodňovacích zařízeních. Odvodňovací zařízení obvykle dokáže odstranit 90–100 % vodní páry. Výpočet vzniklého množství bioplynu byl pro porovnání objemů vzniklého bioplynu rozdělen na dva kroky, kdy se nejprve výpočte teoretické množství bioplynu bez přimíšené vodní páry, tzv. suchý bioplyn, a poté se vypočítá objem bioplynu s uvažováním vodní páry v bioplynu.

Za předpokladu, že v získávaném suchém (bezvodém) bioplynu nebudou přítomny žádné vyšší uhlovodíky a suchý bioplyn bude tvořit pouze metan, oxid uhličitý, dusík a kyslík, se množství suchého bioplynu určí ze vztahu [33]:

$$Q_{\text{bioplyn, suchý}} = Q_M + \frac{Q_M}{CH_4} \cdot (CO_2 + N_2 + O_2) \quad (6.14)$$

- kde  $Q_{\text{bioplyn, suchý}}$  ... denní množství vyrobeného suchého bioplynu [ $\text{m}^3/\text{den}$ ]  
 $Q_M$  ... denní množství vyrobeného metanu [ $\text{m}^3/\text{den}$ ]  
 $CH_4$  ... koncentrace metanu v bioplynu [% obj.]  
 $CO_2$  ... koncentrace oxidu uhličitého v bioplynu [% obj.]  
 $N_2$  ... koncentrace dusíku v bioplynu [% obj.]  
 $O_2$  ... koncentrace kyslíku v bioplynu [% obj.]

Celkové množství vyrobeného bioplynu se získá připočtením objemu vodní páry k suchému bioplynu:



$$Q_{bioplyn} = \left(1 + \frac{H_2O}{100}\right) \cdot Q_{bioplyn:suchý} \quad (6.15)$$

kde  $Q_{bioplyn}$  ... množství vyrobeného bioplynu za den [ $m^3/\text{den}$ ]

$H_2O$  ... koncentrace vodní páry v bioplynu [% obj.]

Bioplyn produkovaný fermentory referenční stanice má následující složení:

- Metan  $CH_4$  60 [% obj.]
- Oxid uhličitý  $CO_2$  38,17 [% obj.]
- Dusík  $N_2$  1,48 [% obj.]
- Kyslík  $O_2$  0,35 [% obj.]
- Vodní pára  $H_2O$  0 [% obj.]

#### 6.1.2.4 Denní produkce digestátu

Denní produkce digestátu se stanoví dle vztahu [34]:

$$V_{digestat} = \frac{Q_{suspence}}{\rho_{digestat}} \cdot C_T \cdot 100 - V_{rec} \quad (6.16)$$

kde  $V_{digestat}$  ... množství vzniklého digestátu [ $m^3/\text{den}$ ]

$\rho_{digestat}$  ... hustota digestátu [ $kg/m^3$ ]

$C_T$  ... množství nerozložitelného substrátu v suspenzi [ $kg$  substrát/ $m^3$  suspenze]

$V_{rec}$  ... množství digestátu použitého jako recyklát [ $m^3/\text{den}$ ]

Hustotu digestátu lze přesně na základě laboratorního rozboru digestátu z experimentálního fermentoru nebo odhadem podle hustot digestátu z fermentorů o podobných parametrech.

Pro vsázku se vstupní koncentrací sušiny do 12 % se množství nerozložitelného substrátu stanoví jako [32]:

$$C_T = \frac{S_0 \cdot K \cdot \exp\left[\frac{-1}{K}\right]}{\mu_m^2 \cdot V_{Lc} \cdot \Theta} \cdot \left[ (V_L \cdot \mu_m - 2 \cdot Q_{suspence} \cdot K) \cdot \left(1 - \exp\left[-\mu_m \cdot \frac{\Theta}{K}\right]\right) + \Theta \cdot Q_{suspence} \cdot \mu_m \cdot \left(1 + \exp\left[-\mu_m \cdot \frac{\Theta}{K}\right]\right) \right] \quad (6.17)$$

kde  $S_0$  ... koncentrace biologicky rozložitelného substrátu na vstupu do reaktoru [%]

$K$  ... kinetický parametr [-]

$\mu_m$  ... maximální měrná rychlost růstu mikroorganismů [ $\text{den}^{-1}$ ]

$V_{Lc}$  ... celkový kapalinový objem reaktorů [ $m^3$ ]

Odběr digestátu z procesu fermentace způsobuje tepelnou ztrátu fermentoru vlivem odvodu naakumulovaného tepla. Množství tepla odcházejícího s digestátem je stanoveno následovně:

$$Q_{digestat} = V_{digestat} \cdot \rho_{digestat} \cdot C_{digestat} \cdot t_r \quad (6.18)$$

kde  $Q_{digestát}$  ... množství tepla akumulovaného v digestátu [kJ/den]  
 $c_{digestát}$  ... měrná tepelná kapacita digestátu [kJ/(kg·K)]  
 $t_r$  ... teplota ve fermentoru [°C]

### 6.1.2.5 Teplo potřebné pro vytápění fermentorů

Zvolený mezofilní fermentační proces probíhá při teplotě 41 °C, což vzhledem průměrným teplotám podnebí ve střední Evropě vyžaduje celoroční vytápění fermentorů. Potřebné teplo pro ohřev jednoho fermentoru se vypočte jako [2]:

$$Q_{t;1r} = A \cdot K_s \cdot (t_r - t_{out}) \cdot \frac{3600 \cdot 24}{1 \cdot 10^9} \quad (6.19)$$

kde  $Q_{t;1r}$  ... teplo potřebné k ohřevu 1 reaktoru [GJ/den]  
 $A$  ... plocha stěn reaktoru [m<sup>2</sup>]  
 $K_s$  ... tepelná propustnost vícevrstvé stěny [W/(m<sup>2</sup>·K)]  
 $t_r$  ... požadovaná teplota v reaktoru [°C]  
 $t_{out}$  ... teplota okolí [°C]

Pro zjednodušení výpočtu plochy stěn reaktoru je reaktor považován za válec s přestupem tepla přes celý povrch tělesa. Plocha stěn uvažovaného válce se určí podle vztahu:

$$A = 2 \cdot \pi \cdot \frac{D_r^2}{4} + \pi \cdot D_r \cdot H_r \quad (6.20)$$

kde  $A$  ... plocha stěn reaktoru [m<sup>2</sup>]  
 $D_r$  ... průměr reaktoru [m]  
 $H_r$  ... výška reaktoru [m]

Složenou stěnu reaktoru tvoří vlastní stěna reaktoru ze smaltovaných plechů a dvě vrstvy izolace o různých vlastnostech. K určení tepelné propustnosti složené stěny se využívá tepelného odporu složené stěny, respektive součtu tepelných odporů jednotlivých vrstev stěny [2]:

$$R = \frac{1}{\alpha_0} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha_n} \quad (6.21)$$

kde  $R$  ... tepelný odpor složené stěny [(m<sup>2</sup>·K)/W]  
 $\alpha_0$  ... koeficient přestupu tepla na vnitřní straně složené stěny [W/(m<sup>2</sup>·K)]  
 $\alpha_n$  ... koeficient přestupu tepla na vnější straně složené stěny [W/(m<sup>2</sup>·K)]  
 $\delta_i$  ... tloušťka jednotlivých vrstev složené stěny [m]  
 $\lambda_i$  ... koeficient tepelné vodivosti jednotlivých vrstev složené stěny [W/(m·K)]  
 $i$  ... pořadí vrstvy (1 – stěna reaktoru, 2 – izolace I, 3 – izolace II)

Tepelná prostupnost složené stěny se poté získá jako převrácená hodnota tepelného odporu stěny [2]:

$$K_s = \frac{1}{R} \quad (6.22)$$

Celkové množství tepla potřebného pro vytápění fermentorů se určí ze součinu počtu reaktorů a potřebného tepla pro vytápění jednoho reaktoru:

$$Q_{t,r;celk} = n_r \cdot Q_{t,r} \quad (6.23)$$

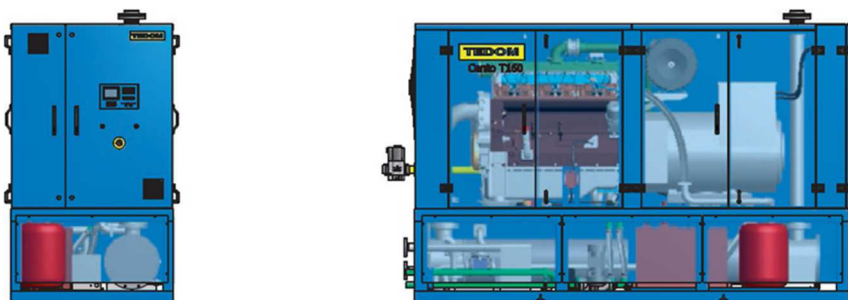
kde  $Q_{t,r;celk}$  ... celkové teplo potřebné k ohřevu reaktorů [GJ/den]

$Q_{t,r}$  ... teplo potřebné k ohřevu 1 reaktoru [GJ/den]

$n_r$  ... počet reaktorů [-]

### 6.1.3 Kogenerační jednotka

Vyrobený bioplyn je spalován v kogenerační jednotce Cento T160 SP od společnosti TEDOM, která je přímo určena pro spalování bioplynu. Jednotka má kontejnerové provedení (obr. 6.2), které obsahuje soustrojí motor-generátor, kompletní tepelné zařízení jednotky včetně příslušenství (např. tlumič výfuku) a elektrického rozvaděče (řídícího i síťového).



Obr. 6.2 Kogenerační jednotka TEDOM [35]

Použitá kogenerační jednotka (základní parametry v tab. 6.3) je vybavena 4 přeplňovanými pístovými plynovými motory. Přeplňování zajišťuje dvoustupňové turbodmychadlo s chladičem komprimované směsi.

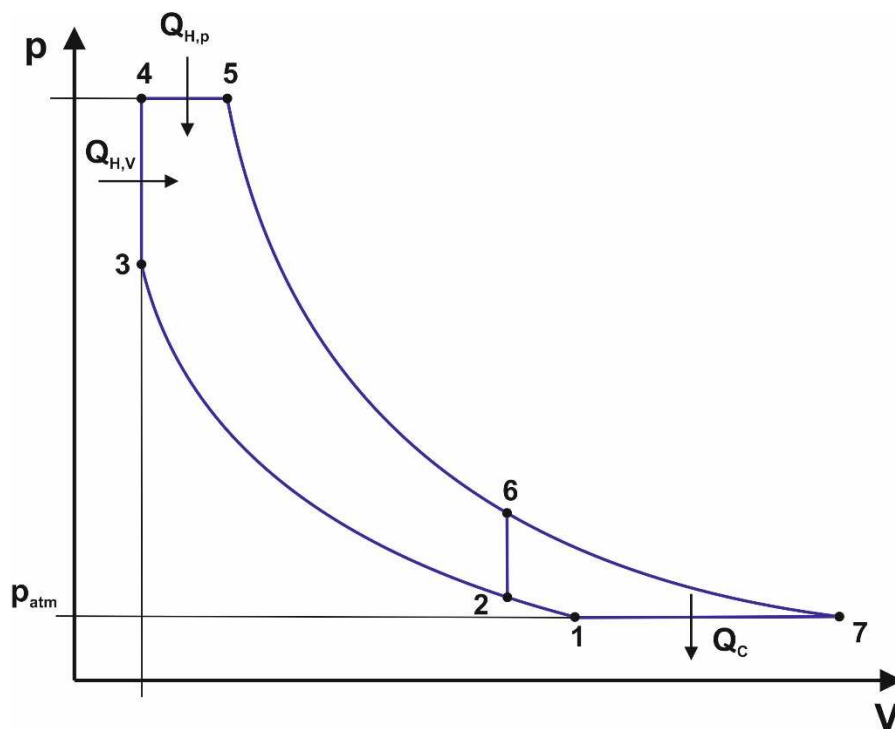
Tab. 6.3 Základní parametry kogenerační jednotky [36][37]

Parametr	Hodnota	Jednotka
Jmenovitý elektrický výkon	4 x 166	kW <sub>el</sub>
Jmenovitý tepelný výkon	4 x 217	kW <sub>t</sub>
Elektrická účinnost	37,8	%
Tepelná účinnost	49,5	%
Celková účinnost	87,3	%
Spotřeba plynu při 100% výkonu (plyn s obsahem 65% metanu)	4 x 71,8	Nm <sup>3</sup> /h
Spotřeba plynu při 75% výkonu	4 x 58,6	Nm <sup>3</sup> /h
Spotřeba plynu při 50% výkonu	4 x 46,0	Nm <sup>3</sup> /h

Pro potřeby výpočtu se předpokládá, že motor pracuje v Sabatově cyklu s pulzním přepřínáváním (obr. 6.3) a cyklus se skládá z těchto dějů [38]:

- 1 → 2 komprese směsi vzduch + bioplyn v turbodmychadle
- 2 → 3 komprese ve válci motoru
- 3 → 4 izochorický přívod tepla do prostoru válce motoru
- 4 → 5 izobarický přívod tepla do prostoru válce motoru
- 5 → 6 expanze spalin v prostoru válce motoru
- 6 → 7 expanze spalin v turbíně turbodmychadla
- 7 → 1 izobarický odvod tepla (chlazení motoru)

Na výfukovém potrubí je umístěn výměník spaliny-voda, kde dochází k ochlazení spalin a jejich následnému výfuku do ovzduší. V modelu je stav ochlazených spalin označen indexem 8.



Obr. 6.3 Ideální Sabatův oběh s pulzním přepřínáváním [38]

Výpočet kogenerační jednotky obsahuje přibližně 500 řádků kódu a pro podrobný popis v této kapitole je příliš rozsáhlý. Pro výpočet byly využity podklady ze společnosti Vítkovice. [39] V následujících odstavcích bude proveden pouze popis výpočtu elektrického a tepelného výkonu.

### 6.1.3.1 Výpočet elektrického výkonu

Elektrický výkon kogenerační jednotky je stanoven na základě mechanického výkonu na hřídelích plynových motorů:

$$P_{el;celk} = P_{mech} \cdot \eta_{el} \quad (6.24)$$

kde  $P_{el;celk}$  ... elektrický výkon kogenerační jednotky [kW]  
 $P_{mech}$  ... mechanický výkon kogenerační jednotky [kW]  
 $\eta_{el}$  ... elektrická účinnost kogenerační jednotky [-]

Mechanický výkon se určí jako vnitřní výkon spalovacích motorů, která je snížena o mechanické ztráty (např. ztráty v ložiscích):

$$P_{mech} = P_{spalmotor;td} \cdot \eta_{mech} \quad (6.25)$$

kde  $P_{spalmotor;td}$  ... vnitřní výkon spalovacích motorů [kW]  
 $\eta_{mech}$  ... mechanická účinnost [-]

Vnitřní výkon motorů je definován pomocí entalpií:

$$P_{spalmotor;td} = (H[2] - H[3]) + (H[5] - H[4]) + (H_{sp} - H[6]) + P_{turbodmychadlo} \quad (6.26)$$

kde  $H[2]$  ... entalpie komprimované směsi na výstupy z turbodmychadla [kJ/s]  
 $H[3]$  ... entalpie komprimované směsi na válci motoru [kJ/s]  
 $H[4]$  ... entalpie izochoricky přivedeného tepla do prostoru válce [kJ/s]  
 $H[5]$  ... entalpie izobaricky přivedeného tepla do prostoru válce [kJ/s]  
 $H[6]$  ... entalpie spalin po expanzi v prostoru válce [kJ/s]  
 $H_{sp}$  ... entalpie spalin po spálení směsi vzduch + bioplyn [kJ/s]  
 $P_{turbodmychadlo}$  ... výkon turbodmychadla [kW]

Turbodmychadlo se skládá z plynové turbíny a kompresoru na společné hřídeli. Pro výpočet příspěvku výkonu turbodmychadla k výkonu spalovacího motoru je nutné odečíst výkon kompresoru od výkonu turbíny:

$$P_{turbodmychadlo} = P_{turbína} - P_{kompresor} = (H[6] - H[7]) - (H[2] - H[1]) \quad (6.27)$$

kde  $H[1]$  ... entalpie směsi vzduch + bioplyn na sání do turbodmychadla [kJ/s]  
 $H[7]$  ... entalpie expandovaných spalin na výstupu z turbíny [kJ/s]

### 6.1.3.2 Výpočet tepelného výkonu

Využitelné teplo lze získávat ze dvou tepelných okruhů, primárního a sekundárního. Pro dosažení maximálního tepelného výkonu dle rovnice (6.28) je nutné plně využít oba okruhy.

$$Q_{tep} = Q_{chlazeni;motor} + Q_{spaliny} \quad (6.28)$$

kde  $Q_{tep}$  ... tepelný výkon kogenerační jednotky [kW]  
 $Q_{chlazeni;motor}$  ... tepelný výkon z chlazení motoru [kW]  
 $Q_{spaliny}$  ... tepelný výkon z chlazení spalin [kW]

**Výpočet primárního okruhu**

Jako primární se označuje okruh chlazení válců motoru. Navíc je do tohoto okruhu zahrnováno teplo z chlazení olejového hospodářství. Celkový tepelný výkon primárního okruhu popisuje rovnice (6.29)

$$Q_{\text{chlazení;motor}} = (1 - K_{\text{odvod;teplo}}) \cdot H_{\text{sp}} \quad (6.29)$$

kde  $K_{\text{odvod;teplo}}$  ... koeficient odvedeného tepla [-]  
 $H_{\text{sp}}$  ... entalpie spalin po spálení směsi vzduch + bioplyn [kJ/s]

**Výpočet sekundárního tepelného okruhu**

Sekundární okruh představuje hlavní zdroj tepelného výkonu kogenerační jednotky. Jedná se o okruh chlazení spalin a zajišťuje vyvedení tepelného výkonu pro další použití. Okruh je také spojen s primárním okruhem, od kterého odnímá odpadní teplo. Tepelný výkon okruhu se určí z parametrů spalin proudících výměnkem:

$$Q_{\text{spaliny}} = (i[7] - i[8]) \cdot \dot{m}_{\text{sp;kg}} \quad (6.30)$$

kde  $Q_{\text{spaliny}}$  ... tepelný výkon kogenerační jednotky [kW]  
 $i[7]$  ... entalpie spalin po výstupu z turbíny [kJ/kg]  
 $i[8]$  ... entalpie ochlazených spalin [kJ/kg]  
 $\dot{m}_{\text{sp;kg}}$  ... množství spalin ze spalování bioplynu [kg/s]

**6.1.4 Výstupy z provozu bioplynové stanice**

Bioplynová stanice poskytuje z technického a ekonomického hlediska tři využitelné výstupy: elektrickou energii, tepelnou energii a digestát. Posledním využitelným výstupem představuje digestát, který lze použít jako organické hnojivo nebo ho lze po dalších úpravách, jako je sušení, použít pro kompostování.

**Elektrický výkon**

Pro ekonomiku provozu je nejdůležitější prodej elektrické energie, který zajišťuje pokrytí nákladů na provoz a generuje zisk provozovateli BPS.

Jak již bylo zmíněno v předpokladech modelu, veškerý vyrobený elektrický výkon je vyváděn pomocí síťových rozvaděčů do distribuční soustavy. Vyváděný elektrický výkon se tedy rovná výkonu kogenerační jednotky dle rovnice (6.24).

**Teplo dodávané do rozvodů tepla**

Druhým nejdůležitějším výstupem je teplo, jehož využíváním pro vlastní potřebu provozovatele nebo jeho prodejem lze výrazně vylepšit ekonomiku provozu BPS. Množství spotřebovaného/dodávaného užitečného tepla ovlivňuje výši podpory pro zdroje kombinované výroby elektřiny a tepla (KVET), což vede nárůstu ziskovosti bioplynové stanice.

Vyrobené teplo je zčásti využito pro krytí vlastní spotřeby BPS. Zbylé teplo může být ve formě teplé vody dále využito. Využitelné teplo má parametry dle tabulky 6.3 a určí se z rovnice:

$$Q_{\text{Smartregion}} = Q_t - \frac{1}{24 \cdot 3600} (Q_{t;r;celk} \cdot 10^6 - Q_{\text{digestat}} - Q_{\text{vsazka}}) \quad (6.31)$$

kde  $Q_{Smartregion}$  ... tepelný výkon dodávaný do Smart Regionu [kW<sub>t</sub>]  
 $Q_{r,r;celk}$  ... teplo pro ohřev fermentorů [GJ/den]  
 $Q_{digestat}$  ... ztráta tepla odchodem v digestátu [kJ/den]  
 $Q_{vsazka}$  ... tepelný výkon pro ohřev vsázky [kJ/den]

Tab. 6.4 Parametry dodávaného tepla [36]

Parametr	Hodnota	Jednotka
Jmenovitá teplota vody vstup/výstup	70/90	°C
Teplota vratné vody min/max	65/70	°C
Jmenovitý průtok vody	4 x 1,6	kg/s
Max. pracovní přetlak	600	kPa
Jmenovitý teplotní spád	20	°C

### Digestát

Posledním využitelným výstupem představuje digestát, který lze použít jako organické hnojivo nebo ho lze po dalších úpravách, jako je sušení, použít pro kompostování. Množství produkované digestátu je možné určit z rovnice (6.16)

## 6.2 Napojení BPS na síť rozvodu tepla a chladu

Napojení BPS na síť rozvodů tepla bude realizováno pomocí teplovodních dvoutrubkových rozvodů (rychlost proudění vody 1,3 m/s, 2 × DN 80, D= 280 mm, Wehotherm® Twins) přes nejbližší předávací stanici. Pokud nebude v dosahu 4 km od BPS žádná vhodná výměňková stanice, přikročí se k jejímu zřízení.



Obr. 6.4 Dvojité ocelové potrubí s PUR izolací [40]

K dopravě tepla do výměňkové stanice bude použito dvojité ocelové potrubí s PUR izolací (obr. 6.4) uložené pod povrchem dle schématu na obr. 4.3. Systém dvojitě trubky byl zvolen pro menší požadavky na místo a investiční úsporu v množství použitého potrubí.

## Řízení a komunikace

Kromě fyzického napojení potrubí je nutné připojit bioplynovou stanici také na datovou síť rozvodů tepla, aby bylo možné průběžně sledovat stav systému rozvodů tepla a v případě potřeby se podílet na regulaci sítě.

Pro komunikaci a řízení sítě rozvodů tepla na kratší vzdálenosti lze výhodně použít technologii PLC (Power Line Communication), neboli přenos dat po elektrické síti. Výhodou tohoto řešení je využití stávající infrastruktury. Nevýhodou pak možnost přenášení pouze jednoduchých povelů. Z tohoto důvodu bude PLC použito jako záložní komunikační prostředek.

Jako hlavní komunikační prostředek budou využity technologie založené na přenosu dat na rádiové frekvenci, hlavně technologie GPRS (General Packet Radio Service), která tvoří základ dnešní telekomunikace.

Pro komunikaci s řídicí jednotkou bude využito přímé spojení některé z následujících technologií: RS 232, RS 485, USB. Z důvodu celosvětové rozšířenosti se použije technologie USB. Regulace výkonu kogenerační jednotky se bude provádět datovou cestou, např. prostřednictvím protokolu MODBUS-RTU. [36]

## 6.3 Hodnocení modelu referenční bioplynové stanice

Pro možnost posouzení funkčnosti modelu byla provedena roční simulace provozu stanice provozní dobou 8000 hodin/rok. Při výpočtu bylo pracováno s předpokladem konstantního složení vsázky, stálé teploty okolí ve výši průměrné roční teploty v ČR, konstantní hodnoty koeficientů přestupu tepla na vnitřní stěně  $\alpha_o=800 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  a vnější stěně  $\alpha_n=15 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ . Další použité parametry jsou uvedeny v tab. 6.5.

Tab 6.5 Provozní parametry bioplynové stanice

	Parametr	Hodnota	Jednotka	Parametr	Hodnota	Jednotka
Složení a denní množství vsázky	Hovězí a prasečí kejda	80	[m <sup>3</sup> /den]	Počet reaktorů	2	[–]
	Kukuřičná siláž	10	[m <sup>3</sup> /den]	Objem reaktoru	2100	[m <sup>3</sup> ]
	Travní hmoty a senáž	20	[m <sup>3</sup> /den]	Objem integrovaného plynojemu	700	[m <sup>3</sup> ]
	Cukrovarnické řízky	10	[m <sup>3</sup> /den]	Teplota v reaktoru	41	[°C]
	Recyklát	0	[m <sup>3</sup> /den]	Průměr reaktoru	16,29	[m]
	Přítok suspenze do fermentoru	100	[m <sup>3</sup> /den]	Výška reaktoru	13	[m]
	Koncentrace sušiny	10	[%]	Teplota okolí	9	[°C]
Sl. stěna	<b>Vrstva</b>	<b>Materiál</b>	<b>Tloušťka</b>		<b>Tepelná vodivost</b>	
	Stěna reaktoru	Smaltovaný plech	0,05	[m]	30	[W/(m·K)]
	Izolace I	Skelná vlna	0,02	[m]	0,042	[W/(m·K)]
	Izolace II	Trapézový plech	0,008	[m]	65	[W/(m·K)]



### 6.3.1 Technické vyhodnocení

Již při pohledu na hodinovou produkci bioplynu je zřejmé, že kogenerační jednotka nemohla pracovat na plný výkon z důvodu nedostatku plynu. Proces fermentace dodával pouze 71,27 % požadovaného množství bioplynu. Nejpravděpodobnějším vysvětlením této chyby je nepřesné určení parametrů vstupních surovin, hlavně hodnot teoretické výtěžnosti metanu, které byly získány odhadem z tabelovaných hodnot. Pro získání přesných hodnot je nutné provést laboratorní rozbor jednotlivých materiálů vsázky.

I přes snížený výkon dosahovala kogenerační jednotka přijatelných výsledků, kdy průměrné využití instalovaného elektrického výkonu činilo 81,54 % a využití tepelného výkonu 68,01 %. Celkově kogenerační jednotka vyrobila 9,05 GWh energie, což představuje využití 92,1 % energie produkované v bioplynu.

Tab. 6.6 Energetické vyhodnocení bioplynové stanice

Parametr	Hodnota	Jednotka
Hodinová produkce bioplynu	204,70	[Nm <sup>3</sup> /hod]
Roční produkce bioplynu	1637 568	[Nm <sup>3</sup> /rok]
Brutto produkce energie v bioplynu	9,83	[GWh/rok]
Roční produkce digestátu	17676,67	[m <sup>3</sup> /rok]
Instalovaný elektrický výkon	664	[kW <sub>el</sub> ]
Elektrická účinnost KJ	37,8	[%]
Produkce elektřiny za rok	4,33	[GWh/rok]
Vlastní spotřeba elektřiny	0	[%]
Průměrné roční využití instalovaného elektrického výkonu KJ	81,54	[%]
Instalovaný tepelný výkon	868	[kW]
Tepelná účinnost KJ	49,5	[%]
Produkce tepla za rok	4,72	[GWh/rok]
Vlastní spotřeba tepla	20	[%]
Průměrné roční využití instalovaného tepelného výkonu KJ	68,01	[%]
Využitelné teplo pro Smart region	3,78	[GWh/rok]
Brutto energie celkem	9,05	[GWh/rok]
Netto energie celkem	8,11	[GWh/rok]

### 6.3.2 Ekonomické vyhodnocení

Ekonomické hodnocení, je díky zjednodušením ve výpočtovém modelu prováděno pouze na základě porovnání ročních výnosů stanice prodávající pouze elektrickou energii (tab. 6.6) se stanicí, která pracuje v kombinovaném režimu výroby energie (KVET) a prodává veškerý dostupný elektrický a tepelný výkon (tab. 6.7). Do ekonomické rozvahy není zahrnut prodej digestátu a to z důvodu, že v modelu nebylo uvažováno zařízení pro úpravu digestátu.

Tab. 6.7 Roční výnos bioplynové stanice bez využití tepla

Položka	Jednotková cena	Jednotek	Částka
Prodej elektřiny	4 120 [Kč/MWh]	4 330 [MWh]	17 839 600 [Kč]
Prodej tepla	250 [Kč/GJ]	0 [GJ]	0 [Kč]
Roční výnos			17 839 600 [Kč]

Pro stanovení výkupní ceny za elektrickou energii a podpory za KVET bylo použito Cenové rozhodnutí Energetického regulačního úřadu. Na jeho základě byla stanovena výkupní cena za elektrickou energii ve výši 4 120 Kč/MWh a podpora za KVET ve výši 856 Kč/MWh. Ce-

na za prodej tepla byla, na základě průzkumu teplotárenského trhu, stanovena ve výši 250 Kč/GJ. [41]

V případě stanice s využitím tepla představuje podpora KVET nárůst výkupní ceny za jednotku o 20,8%, což zvyšuje roční výnos o 3 706 480 Kč. Prodejem tepla dochází k dalšímu nárůstu ročního výnosu o 3 400 600 Kč. Rozhodnutím prodávat veškeré dostupné teplo se roční výnos celkově zvýšil o 7 107 080 Kč, což představuje 39,8 % původního výnosu za prodej elektrické energie. Vzhledem k velkému výnosu se vyplatí uvažovat i o nákladnějších způsobech využití tepla, než je přímý prodej, protože výnosy zaručují rychlou návratnost.

*Tab. 6.8 Roční výnos bioplynové stanice s dodávkou tepla do rozvodů tepla*

<b>Položka</b>	<b>Jednotková cena</b>	<b>Jednotek</b>	<b>Částka</b>
Prodej elektřiny	4 976 [Kč/MWh]	4 330 [MWh]	21 546 080 [Kč]
Prodej tepla	250 [Kč/GJ]	13602,24 [GJ]	3 400 600 [Kč]
Roční výnos			24 946 680 [Kč]

## 7 Závěr

Moderní bioplynová stanice vybavená kogenerační jednotkou poskytuje mnoho možností využití odpadního tepla z kogenerační jednotky, které je dosud ve většině případů mařeno. Z technologického hlediska lze za nejperspektivnější způsob využití považovat dodatečnou výrobu elektřiny a využití tepla pro vytápění. Dodatečnou výrobu elektřiny není možné ve většině případů realizovat pomocí Rankine-Clausiova cyklu a je tedy nutné využít zařízení s jiným typem tepelného oběhu. Zařízení s těmito cykly (ORC cyklus, Kalinův cyklus, aj.) mají obvykle vysoké pořizovací náklady a jejich používání je limitováno nebezpečností pracovní látky, proto se odpadního tepla k dodatečné výrobě elektrické energie téměř nevyužívá.

Analýza dynamiky vybrané bioplynové stanice ukázala stabilní hodnoty tepelného výkonu ve sledovaných obdobích a malé procento využití výkonu pro krytí vlastní spotřeby (12,8–16 %), což z bioplynové stanice dělá ideální zdroj tepla pro potřeby celoročního vytápění. Většina aplikací tepla pro vytápění byla do nedávné doby omezena, z důvodu nízkých parametrů, na vytápění objektů v areálu BPS a přilehlém okolí. Nástup teplovodních a nízkoteplotních sítí dálkového vytápění umožňuje začlenění bioplynových stanic do stávajících rozvodů tepla, nebo vybudování mikro sítí, kde bude bioplynová stanice plnit úlohu hlavního zdroje tepla.

Pro možnost výpočtu produkce bioplynu a vyrobené energie byl navrhnout výpočtový model zemědělské bioplynové stanice. Model pracuje pouze se základními technologickými prvky bioplynové stanice – fermentory se vsázkou ve formě homogenizované suspenze, kogenerační jednotka a odvod digestátu (nádrž na digestát) – a ostatní části technologie jsou zanedbány. Tento koncept proto umožňuje univerzální použití modelu na výpočty stanic se stejným typem fermentorů a kogenerační jednotky, a také snadnou implementaci modelu BPS do nadřazeného modelu sítě rozvodů tepla a chladu.

Přesnost výpočetního modelu závisí zejména na použitých parametrech vsázky. V modelu jsou použity průměrné tabelované hodnoty teoretické výtěžnosti metanu vsázky, obsah sušiny ve vsázce, hustota vsázky a hustota digestátu. Výpočty s využitím celého rozsahu tabelovaných hodnot bylo zjištěno, že tyto hodnoty ovlivňují produkci metanu až o 45 %, proto je nutné stanovit hodnoty výše uvedených parametrů z laboratorního rozboru vstupních surovin a digestátu pro každou bioplynovou stanici zvlášť.

## Seznam zdrojů

- [1] Mapa bioplynových stanic. *Česká bioplynová asociace* [online]. 2013 [cit. 2015-05-04]. Dostupné z: <http://www.czba.cz/mapa-bioplynovych-stanic/>
- [2] STRAKA, František a Karel CIAHOTNÝ. *Bioplyn: [příručka pro výuku, projekci a provoz bioplynových systémů]*. 3., zkrác. vyd. Praha: GAS, 2010, 305 s. ISBN 978-80-7328-235-6.
- [3] USŤÁK, Sergej a Jaroslav VÁŇA. *Bioplynová fermentace biomasy a biologicky rozložitelných odpadů*. Vyd. 2. Praha: CZ Biom, 2006, 180 s. ISBN 808655578x.
- [4] MUŽÍK, Oldřich, KÁRA, Jaroslav: Možnosti výroby a využití bioplynu v ČR. *Biom.cz* [online]. 2009 [cit. 2015-03-01]. Dostupné z: <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/moznost-vyroby-a-vyuziti-bioplynu-v-cr>. ISSN: 1801-2655.
- [5] WELLINGER, Arthur, Jerry MURPHY a David BAXTER. *The biogas handbook: science, production and application*. 1st pub. Oxford: Woodhead Publishing, 2013, xxx, 476 s. ISBN 9780857094988.
- [6] KOUŘA, Jaroslav. *Bioplynové stanice s mokrým procesem*. 1. vyd. Praha: Pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě (ČKAIT) vydalo Informační centrum ČKAIT, 2008, 119 s. ISBN 978-80-87093-33-7.
- [7] Celulosa. *Lecyklopedia* [online]. 2008 [cit. 2015-03-12]. Dostupné z: <http://leccos.com/index.php/clanky/celulosa>
- [8] Chemická podstata zemiakov. *ŠIS - Školský Informačný Servis* [online]. 1999 [cit. 2015-03-06]. Dostupné z: [http://kekule.science.upjs.sk/chemia/vllab/HTML/zemiaky\\_podstata.htm](http://kekule.science.upjs.sk/chemia/vllab/HTML/zemiaky_podstata.htm)
- [9] Výťažnost bioplynu z jednotlivých materiálů. *Biom.cz* [online]. 2014 [cit. 2015-03-06]. Dostupné z: [http://biom.cz/cz/odborne-clanky/vyteznost-bioplynu-z-jednotlivych-materialu?sel\\_ids=1&ids\[xf0a6b8c4451bda4d71b62d57bcd895be\]=1](http://biom.cz/cz/odborne-clanky/vyteznost-bioplynu-z-jednotlivych-materialu?sel_ids=1&ids[xf0a6b8c4451bda4d71b62d57bcd895be]=1). ISSN: 1801-2655.
- [10] *Výstavba komunálních bioplynových stanic s využitím BRKO* [online]. Praha: Státní fond životního prostředí ČR, 2009 [cit. 2015-03-16]. Dostupné z: [czbiom.cz/wp-content/uploads/bioplynky.pdf](http://czbiom.cz/wp-content/uploads/bioplynky.pdf)
- [11] *Metodický pokyn k podmínkám schvalování bioplynových stanic před uvedením do provozu* [online]. Praha: Ministerstvo životního prostředí, 2008 [cit. 2015-04-02]. Dostupné také z: [http://www.mzp.cz/cz/schvalovani\\_bioplynovych\\_stanic](http://www.mzp.cz/cz/schvalovani_bioplynovych_stanic)
- [12] MARADA, Petr, KOTOVICOVÁ, Jana: Bioplynové stanice jako zařízení na zpracování vedlejších živočišných produktů. *Biom.cz* [online]. 2010-09-15 [cit. 2015-05-28]. Dostupné z WWW: <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/bioplynove-stanice-jako-zarizeni-na-zpracovani-vedlejsich-zivocisnych-produktu>. ISSN: 1801-2655.
- [13] Uganda Has Great Biogas Potencial. *Energy Newz* [online]. 2013 [cit. 2015-04-12]. Dostupné z: <http://energynewz.net/uganda-has-great-biogas-potential-3/>
- [14] *Udržitelné využívání tepla z bioplynových stanic: Příručka* [online]. Mnichov, Německo: WIP Renewable Energies, 2012 [cit. 2015-04-18]. Dostupné z: <http://www.biogasheat.org/wp-content/uploads/2013/03/BiogasHeat-Handbook-CZ.pdf>

- [15] PLZEŇSKÁ TEPLÁRENSKÁ. *Kniha o Systému Centralizovaného Zásobování Teplem* [online]. Plzeň, 2009 [cit. 2015-04-24]. Dostupné z: [www.pltep.cz/upload/File/kniha\\_o\\_sczt.pdf](http://www.pltep.cz/upload/File/kniha_o_sczt.pdf)
- [16] ENERGETICKÝ REGULAČNÍ ÚŘAD. *Výkladové stanovisko Energetického regulačního úřadu: k předmětu úpravy ustanovení bodu 1.6.2 Cenového rozhodnutí Energetického regulačního úřadu č. 7/2011, kterým se stanovuje podpora pro výrobu elektřiny z obnovitelných zdrojů energie, kombinované výroby elektřiny a tepla a druhotných energetických zdrojů* [online]. 2012 [cit. 2015-04-28]. Dostupné z: <http://www.eru.cz/-/vykladove-stanovisko-k-predmetu-upravy-ustanoveni-bodu-1>
- [17] Základní pojmy v zásobování teplem. *Pražská teplárenská* [online]. 2015 [cit. 2015-05-04]. Dostupné z: <http://www.ptas.cz/cs/dodavky-tepla/prakticke-informace-pro-zakazniky/zakladni-pojmy-v-zasobovani-teplem/>
- [18] Průmyslové sušičky. *Pawlica s. r. o.: Posklizňové linky na klíč* [online]. 2014 [cit. 2015-05-08]. Dostupné z: <http://www.pawlica.cz/produkty/prumyslove-susicky/>
- [19] Reference - energetika a teplo. *Farmtec* [online]. 2012 [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: <http://www.farmtec.cz/reference-energetika-a-teplo.html>
- [20] CHP plant based on vegetable oil-fired engines (combined heat and power units) and downstream ORC cycle / vegetable oil CHP New Energy (Germany). *BIOS BIOENERGIESYSTEME: Electricity from biomass* [online]. 2012 [cit. 2015-05-08]. Dostupné z: <http://www.bios-bioenergy.at/en/references/all-projects/vegetable-oil.html>
- [21] MICAK, Henry A. An Introduction to the Kalina Cycle. In: *Proceedings of the 1996 International Joint Power Generation Conference: presented at the 1996 International Joint Power Generation Conference, October 13-17, 1996, Houston, Texas*. New York: American Society of Mechanical Engineers, s. 1-11. EC (Series), vol. 4. ISBN 0-7918-1796-2.
- [22] Geothermal Project Kalina. *Mannvit* [online]. 2014 [cit. 2015-01-12]. Dostupné z: <http://www.mannvit.com/GeothermalEnergy/GeothermalPowerPlants/GeothermalProjectKalina>
- [23] SIER, Robert. *Hot air caloric and stirling engines*. [Rev. and enl. ed.]. Chelmsford: L.A. Mair, 1999. ISBN 978-095-2641-711.
- [24] COMPONENTS. *SCHNELL Motoren AG* [online]. 2015 [cit. 2015-05-16]. Dostupné z: <http://www.schnellmotor.de/en/services/components.php>
- [25] MILČÁK, Pavel, Jaroslav KONVIČKA a Radim JÍLEK. FLEXIVIT – TECHNOLOGIE ZHODNOCUJÍCÍ CITELNÉ TEPLLO SPALIN Z MALÝCH ZAŘÍZENÍ. *PLYNÁR • VODÁR • KÚRENÁR + KLIMATIZÁCIA*. 2014, (3): s. 6-8. Dostupné z: <http://www.plynar-vodar-kurenar.eu/>
- [26] ENERGY RESEARCH KNOWLEDGE CENTRE. *Smart district heating and cooling: THEMATIC RESEARCH SUMMARY* [online]. 2014 [cit. 2015-03-15]. Dostupné z: [https://setis.ec.europa.eu/energy-research/sites/default/files/library/ERKC\\_%20TRS\\_Smart\\_District\\_HC.pdf](https://setis.ec.europa.eu/energy-research/sites/default/files/library/ERKC_%20TRS_Smart_District_HC.pdf)

- [27] DHC+ TECHNOLOGY PLATFORM. *District Heating & Cooling: STRATEGIC RESEARCH AGENDA* [online]. 2012 [cit. 2015-04-22]. Dostupné z: [http://www.dhcplus.eu/wp-content/uploads/2012/05/120529\\_DHC+SRA\\_final.pdf](http://www.dhcplus.eu/wp-content/uploads/2012/05/120529_DHC+SRA_final.pdf)
- [28] RENTIER, Gerrit a Machiel JOOSSE. Dutch multi utility smart metering with direct in home feedback. *SlideShare* [online]. 2013 [cit. 2015-05-31]. Dostupné z: <http://www.slideshare.net/MachielJoosse/20131007-dutch-multi-utility-smart-metering-with-direct-in-home-feedback-v10>
- [29] District heating to white goods. *Celsius: Smart cities* [online]. 2015 [cit. 2015-05-16]. Dostupné z: <http://celsiuscity.eu/Demonstrator/district-heating-to-white-goods%E2%80%8B/>
- [30] Chladicí oběhy, trigenerace, dálkové chlazení. In: POSPÍŠIL, Jiří. *TZB-info* [online]. 2011 [cit. 2015-04-26]. ISSN 1801-4399. Dostupné z: <http://vetrani.tzb-info.cz/klimatizace-a-chlazení/7910-chladici-obehy-trigenerace-dalkove-chlazení>
- [31] Firemní materiály: Analýza chování bioplynové stanice, *Vítkovice UAM*
- [32] KIFLE G. GEBREMEDHIN, a S. INGLIS. Biogas Production Model for Plug-Flow Anaerobic Digesters. In: *2006 Portland, Oregon, July 9-12, 2006* [online]. St. Joseph, MI: American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2006, [cit. 2015-03-19]. DOI: 10.13031/2013.21157. Dostupné z: <http://elibrary.asabe.org>
- [33] JOHN H MARTIN, a JR. A Protocol for Quantifying and Reporting the Performance of Anaerobic Digestion Systems for Livestock Manures. In: *International Symposium on Air Quality and Waste Management for Agriculture, 16-19 September 2007, Bromfield, Colorado* [online]. St. Joseph, MI: American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2007, - [cit. 2015-04-10]. DOI: 10.13031/2013.23901. Dostupné z: <http://elibrary.asabe.org>
- [34] E. GHAFOORI, a P. C. FLYNN. Optimizing the Size of Anaerobic Digesters. In: *Transactions of the ASABE* [online]. 2007, s. 1029-1036 [cit. 2015-05-31]. DOI: 10.13031/2013.23143. ISSN 2151-0040. Dostupné z: <http://elibrary.asabe.org>
- [35] Firemní materiály: Kogenerační jednotka, *Vítkovice*
- [36] Firemní materiály: Technická specifikace TEDOM CENTO, *TEDOM*
- [37] TEDOM. *Přehled kogeneračních jednotek TEDOM* [online]. 2014 [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: <http://kogenerace.tedom.com/kogeneracni-jednotky-download.html>
- [38] KLIMENT, Vladimír. *Naftový motor přepřínovaný turbodmyčadlem*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1989, 309 s.
- [39] Firemní materiály: Kogenerační jednotka – výpočet v programu EES, *Vítkovice*
- [40] UNOPOR. *Produktový katalog předizolovaného potrubí a příslušenství* [online]. 2015 [cit. 2015-05-20]. Dostupné z: <http://www.fintherm.cz/reseni/predizolovane-potrubi-pro-dalkove-vytapeni/wehotherm-twins.aspx>
- [41] ENERGETICKÝ REGULAČNÍ ÚŘAD. *Cenové rozhodnutí Energetického regulačního úřadu č. 1/2014 ze dne 12. listopadu 2014, kterým se stanovuje podpora pro podporované zdroje energie* [online]. 2014 [cit. 2015-05-26]. Dostupné z: [http://www.eru.cz/documents/10540/613886/ERV\\_4\\_2014/4f60ee4b-5bfa-4636-846f-5c7dee3d8683](http://www.eru.cz/documents/10540/613886/ERV_4_2014/4f60ee4b-5bfa-4636-846f-5c7dee3d8683)

## Seznam symbolů a zkratek

Symbol	Jednotka	Veličina
A	[m <sup>2</sup> ]	plocha stěn reaktoru
B	[m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /kg]	výtěžnost metanu za danou dobu zdržení
B <sub>0</sub>	[m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /kg]	teoretická výtěžnost metanu ze vsázky za nekonečnou dobu zdržení
B <sub>0cur</sub>	[m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /kg]	teoretická výtěžnost metanu z cukrovarnických řízků za nekonečnou dobu zdržení
B <sub>0hpk</sub>	[m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /kg]	teoretická výtěžnost metanu z hovězí a prasečí kejdy za nekonečnou dobu zdržení
B <sub>0ksz</sub>	[m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /kg]	teoretická výtěžnost metanu z kukuřičné za nekonečnou dobu zdržení
B <sub>0rec</sub>	[m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /kg]	teoretická výtěžnost metanu z recyklátu za nekonečnou dobu zdržení
B <sub>0thr</sub>	[m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /kg]	teoretická výtěžnost metanu z travní hmoty a řízků za nekonečnou dobu zdržení
B <sub>0x</sub>	[m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /kg]	teoretická výtěžnost metanu z jednotlivých surovin za nekonečnou dobu zdržení
c <sub>digestát</sub>	[kJ/(kg·K)]	měrná tepelná kapacita digestátu
CO <sub>2</sub>	[% obj.]	koncentrace oxidu uhličitého v bioplynu
c <sub>suspenze</sub>	[kJ/(kg·K)]	měrná tepelná kapacita suspenze
C <sub>T</sub>	[kg substrát/m <sup>3</sup> ]	množství nerozložitelného substrátu v suspenzi
D <sub>r</sub>	[m]	výška reaktoru
EER	[-]	chladič faktor
H[1]	[kJ/s]	entalpie směsi vzduch + bioplyn na sání do turbodmychadla
H[2]	[kJ/s]	entalpie komprimované směsi na výstupy z turbodmychadla
H[3]	[kJ/s]	entalpie komprimované směsi na válci motoru
H[4]	[kJ/s]	entalpie izochoricky přivedeného tepla do prostoru válce
H[5]	[kJ/s]	entalpie izobaricky přivedeného tepla do prostoru válce
H[6]	[kJ/s]	entalpie spalín po expanzi v prostoru válce
H[7]	[kJ/s]	entalpie expandovaných spalín na výstupu z turbíny
H <sub>2</sub> O	[% obj.]	koncentrace kyslíku v bioplynu
H <sub>r</sub>	[m]	průměr reaktoru
H <sub>sp</sub>	[kJ/s]	entalpie spalín po spálení směsi vzduch + bioplyn
i[7]	[kJ/kg]	entalpie spalín po výstupu z turbíny
i[8]	[kJ/kg]	entalpie ochlazených spalín
K	[-]	kinetický parametr
K <sub>odvod;teplo</sub>	[-]	koeficient odvedeného tepla
K <sub>s</sub>	[W/(m <sup>2</sup> ·K)]	tepelná propustnost vícevrstvé stěny
m <sub>sp;xkg</sub>	[kg/s]	množství spalín ze spalování bioplynu

Symbol	Jednotka	Veličina
$N_2$	[% obj.]	koncentrace dusíku v bioplynu
$n_r$	[-]	počet reaktorů
$O_2$	[% obj.]	koncentrace vodní páry v bioplynu
$P_{el;celk}$	[kW <sub>el</sub> ]	elektrický výkon kogenerační jednotky
$P_{kompresor}$	[kW]	výkon kompresoru
$P_{mech}$	[kW]	mechanický výkon
$P_P$	[kW]	příkon čerpadla
$P_{spalmotor;td}$	[kW]	vnitřní výkon spalovacích motorů
$P_{turbina}$	[kW]	výkon turbíny
$P_{turbodmychadlo}$	[kW]	výkon turbodmychadla
$Q_{bioplyn}$	[m <sup>3</sup> /den]	denní množství vyrobeného bioplynu
$Q_{bioplyn;suchy}$	[m <sup>3</sup> /den]	denní množství vyrobeného suchého bioplynu
$Q_C$	[kW]	výkon chladicího zařízení
$Q_{digestát}$	[kJ/den]	množství tepla akumulovaného v digestátu
$Q_H$	[kW]	výkon tepelného zařízení
$Q_{chlazeni;motor}$	[kW <sub>t</sub> ]	tepelný výkon z chlazení motoru
$Q_M$	[m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /den]	denní výroba metanu
$Q_{Smartregion}$	[kW <sub>t</sub> ]	tepelný výkon dodávaný do Smart Regionu
$Q_{spaliny}$	[kW <sub>t</sub> ]	tepelný výkon z chlazení spalin
$Q_{suspenze}$	[m <sup>3</sup> /den]	přítok suspenze do fermentoru
$Q_{tep}$	[kW <sub>t</sub> ]	tepelný výkon kogenerační jednotky
$Q_{digestát}$	[kJ/den]	množství tepla akumulovaného v digestátu
$Q_{vsazka}$	[kJ/den]	teplo potřebné pro ohřev vsázky
$r_{digestat}$	[kg/m <sup>3</sup> ]	hustota digestátu
$r_{suspenze}$	[kg/m <sup>3</sup> ]	hustota suspenze
$S$	[kg substrát/m <sup>3</sup> ]; [%]	koncentrace biologicky rozložitelného substrátu na výstupu do fermentoru
$S/S_0$	[%]	poměrná spotřeba substrátu
$S_0$	[kg substrát/m <sup>3</sup> ]; [%]	koncentrace biologicky rozložitelného substrátu na vstupu do fermentoru
$t_{out}$	[°C]	teplota okolí
$t_r$	[°C]	teplota reaktoru
$t_{suspenze}$	[°C]	teplota suspenze na vstupu do fermentoru
$V$	[m <sup>3</sup> ]	objem reaktoru
$V_{cur}$	[m <sup>3</sup> ]	objem cukrovarnických řízků
$V_{digestat}$	[m <sup>3</sup> ]	denní objem digestátu
$V_{hpk}$	[m <sup>3</sup> ]	objem hovězí a prasečí kejdy
$V_{ksz}$	[m <sup>3</sup> ]	objem kukuřičné siláže
$V_{L;1r}$	[m <sup>3</sup> ]	kapalinový objem 1 reaktoru
$V_{Lc}$	[m <sup>3</sup> ]	celkový kapalinový objem reaktorů
$V_p$	[m <sup>3</sup> ]	objem integrovaného plynojemu
$V_r$	[m <sup>3</sup> ]	objem 1 reaktoru



Symbol	Jednotka	Veličina
$V_{rec}$	$[m^3]$	objem recyklátu
$V_{Sazka}$	$[m^3]$	celkový denní objem vstupních surovin
$V_{thr}$	$[m^3]$	objem travní hmoty a řízků
$V_x$	$[m^3]$	objem jednotlivých vstupních surovin vsázky
$\alpha_0$	$[W/(m^2 \cdot K)]$	koeficient přestupu tepla na vnitřní straně složené stěny
$\alpha_n$	$[W/(m^2 \cdot K)]$	koeficient přestupu tepla na vnější straně složené stěny
$\gamma_M$	$[m^3 CH_4/(m^3 \cdot den)]$	měrná objemová rychlost vývinu metanu
$\delta_1$	$[m]$	tloušťka stěny reaktoru
$\delta_2$	$[m]$	tloušťka vrstvy izolace I
$\delta_3$	$[m]$	tloušťka vrstvy izolace II
$\eta_{el}$	$[-]$	účinnost elektrického generátoru
$\eta_{mech}$	$[-]$	mechanická účinnost
$\Theta$	$[den]$	hydraulická doba zdržení
$\lambda_1$	$[W/(m \cdot K)]$	koeficient tepelné vodivosti stěny reaktoru
$\lambda_2$	$[W/(m \cdot K)]$	koeficient tepelné vodivosti izolace I
$\lambda_3$	$[W/(m \cdot K)]$	koeficient tepelné vodivosti izolace II
$\lambda_i$	$[W/(m \cdot K)]$	koeficient tepelné vodivosti jednotlivých vrstev složené stěny
$\mu$	$[den^{-1}]$	měrná rychlost růstu mikroorganismů
$\mu_m$	$[den^{-1}]$	maximální měrná rychlost růstu mikroorganismů
$\rho_{digestát}$	$[kg/m^3]$	hustota digestátu
$\rho_{suspenze}$	$[kg/m^3]$	hustota suspenze

## Seznam příloh

### Přílohy na CD

Příloha 1 – Výpočetní model bioplynové stanice – zdrojový kód

Příloha 2 – Výpočetní model bioplynové stanice – samostatně spustitelný soubor