



**FAKULTA
STROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ**

Diplomová práce

**TECHNOLOGIE A ZAŘÍZENÍ PRO ZPRACOVÁNÍ
GASTROODPADŮ V BIOPLYNOVÝCH
STANICÍCH**

Bc. Lukáš Adam

Vedoucí práce: doc. Ing. Lukáš Krátký, Ph. D.

2022/2023

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Adam** Jméno: **Lukáš** Osobní číslo: **483972**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav procesní a zpracovatelské techniky**
Studijní program: **Energetika a procesní inženýrství**
Specializace: **Procesní inženýrství**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Technologie a zařízení pro zpracování gastroodpadů v bioplynových stanicích.

Název diplomové práce anglicky:

Technology and equipment for food waste treatment in biogas plant.

Pokyny pro vypracování:

Projekčně-konstrukční práce. Zpracujte rešerši, která shrne potenciál využití gastroodpadů. Navrhněte PFD schéma linky pro zpracování gastroodpadů v bioplynové stanici. Vypracujte bilance technologie, stanovte základní charakteristiky instalovaných zařízení a proveďte základní rozvahu CAPEX a OPEX.

Seznam doporučené literatury:

dle doporučení vedoucího práce

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

doc. Ing. Lukáš Krátký, Ph.D. ústav procesní a zpracovatelské techniky FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **17.04.2023**

Termín odevzdání diplomové práce: **04.08.2023**

Platnost zadání diplomové práce: **24.09.2023**

doc. Ing. Lukáš Krátký, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

prof. Ing. Tomáš Jirout, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

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

V Praze dne

.....

Lukáš Adam

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu práce doc. Ing. Lukáši Krátkému, Ph. D. za jeho čas a odborné rady, které mi poskytoval po celou dobu tvorby práce, a to při pravidelných osobních i online konzultacích.

Anotační list

Jméno autora:	Lukáš
Příjmení autora:	Adam
Název práce česky:	Technologie a zařízení pro zpracování gastroodpadů v bioplynových stanicích
Název práce anglicky:	Technology and equipment for food waste treatment in biogas plant
Rozsah práce:	počet stran: 81 počet obrázků: 42 počet tabulek: 24 počet příloh: 5
Akademický rok:	2022/2023
Jazyk práce:	čeština
Ústav:	Ústav procesní a zpracovatelské techniky
Studijní program:	Energetika a procesní inženýrství
Vedoucí práce:	doc. Ing. Lukáš Krátký, Ph.D.
Anotace česky:	Tato práce se zabývá teoretickými, legislativními a technologickými možnostmi zpracování gastroodpadu v bioplynových stanicích. Součástí této práce je návrh linky na zpracování gastroodpadu v bioplynové stanici a jeho ekonomické zhodnocení.
Anotace anglicky:	This thesis focuses on the theoretical, legislative and technological possibilities of food waste treatment in biogas plants. Furthermore, it includes the design of a line for the processing of food waste in a biogas plant and its economic evaluation.
Klíčová slova:	gastroodpad, bioplynová stanice, hygienizace, bioplyn
Klíčová slova anglicky:	food waste, biogas plant, hygienization, biogas

Obsah

Úvod.....	7
1 Využití bioplynu a jeho výroba	8
1.1 Aktuální energetická situace	8
1.1.1 Současné zdroje energie v Evropské unii.....	8
1.1.2 Současné zdroje energie v ČR.....	9
1.2 Bioplyn	11
1.2.1 Proces vzniku bioplynu	12
1.2.2 Podmínky tvorby bioplynu.....	13
1.2.3 Bioplynové stanice	16
1.2.4 Využití bioplynu.....	17
1.2.5 Substráty pro výrobu bioplynu.....	18
1.3 Bioplynová stanice Chotýčany	20
1.3.1 Technologie bioplynové stanice Chotýčany	21
2 Gastroodpad jako surovina pro výrobu bioplynu.....	23
2.1 Gastroodpad z pohledu legislativy ČR.....	23
2.1.1 Způsoby nakládání s biologicky rozložitelnými odpady.....	23
2.1.2 Hygienická pravidla pro vedlejší produkty živočišného původu	24
2.1.3 Kategorie materiálů vedlejších produktů živočišného původu	25
2.2 Vznik potravinového odpadu a gastroodpadu	26
2.2.1 Množství vznikajícího potravinového odpadu a gastroodpadu.....	26
2.2.2 Celková produkce potravinového odpadu v Česku.....	30
2.3 Vlastnosti gastroodpadu	30
2.3.1 C:N poměr gastroodpadu	30
2.3.2 Cena gastroodpadu	31
2.3.3 Výnos bioplynu z gastroodpadu.....	32
2.3.4 Hustota gastroodpadu.....	33
3 Analýza využití gastroodpadu v bioplynové stanici.....	34
3.1 Zařízení obecné bioplynové stanice	34
3.2 Hmotnostní a energetická bilance bioplynové stanice	35
3.3 Vliv zpracování gastroodpadu v BPS Chotýčany	39
4 Návrh linky na hygienizaci gastroodpadu	42
4.1 Návrh hygienizačního zařízení	42
4.1.1 Návrhový a kontrolní výpočet průtokového výměníku.....	44
4.1.2 Návrh vsádkového ohřevu.....	51
4.2 Návrh pomocných zařízení hygienizační linky	56
4.2.1 Návrh zásobníku na hygienizovaný gastroodpad.....	56
4.2.2 Návrh šnekového dopravníku	57
4.2.3 Návrh čerpadel a macerátoru.....	58
4.2.4 Návrh drtiče gastroodpadu	60
4.3 Návrh celkové podoby linky na zpracování gastroodpadu	60
5 Náklady CAPEX a OPEX.....	61
5.1 Náklady CAPEX	61
5.2 Náklady OPEX.....	62
5.3 Zhodnocení rentability návrhu	63
5.4 Citlivostní analýza návrhu.....	66
Závěr.....	70
Seznam použitých symbolů a zkratk	77
Seznam obrázků, tabulek a příloh	79

Úvod

Již poměrně dlouhou dobu se obnovitelné zdroje stávají nedílnou součástí energetického portfolia lidstva. Mezi nejběžnější obnovitelné zdroje energie patří sluneční záření, vítr a vodní toky. Důležitou roli hraje také biomasa, která se tradičně využívá pro výrobu tepla. S nástupem průmyslové revoluce a rostoucí poptávky po energii však lidstvo muselo začít využívat řadu dalších zdrojů energie, především fosilních paliv, na kterých je dodnes závislé.

S ohledem na ochranu životního prostředí se mnoho států v současné době snaží přetransformovat svůj energetický sektor směrem k obnovitelným zdrojům, protože ty buďto fungují s CO₂ neutrálním cyklem nebo ho vůbec neprodukují. Oproti tomu fosilní paliva, jako jsou ropa nebo zemní plyn, při spalování produkují řadu škodlivin v čele s CO₂ a jejich využívání má prokazatelně negativní vliv na životní prostředí. Kromě ekologických důvodů je závislost na fosilních palivech také strategickou hrozbou, jak to ukázal rok 2022 a evropská závislost na ruském zemním plynu a ropě. Obnovitelné zdroje představují alternativu pro státy, které nedisponují zásobami fosilních paliv a nemohou nebo je nechtějí nakupovat.

Mezi obnovitelné zdroje s CO₂ neutrálním cyklem se řadí i bioplyn, který se cíleně nechává vznikat působením bakterií v bioplynových stanicích. Tradiční substráty využívané k výrobě bioplynu jsou především zemědělské plodiny, odpadní kaly nebo odpad na skládkách, ze kterého se jímá skládkový plyn. Využívání zemědělských plodin pěstovaných na orné půdě pro výrobu biopaliv má za následek zvyšování poptávky po nich, čímž dochází i ke zvyšování cen v potravinářském průmyslu. Takto vznikající biopaliva jsou označována jako biopaliva první generace, zatímco biopaliva vznikající z dále již nevyužitelných zemědělských zbytků jsou označována jako biopaliva druhé generace.

Hlavním tématem této práce jsou způsoby a možnosti využití gastroodpadu jako doplňujícího vstupního substrátu do bioplynové stanice. Využívání gastroodpadů představuje jednu z možností, jak mohou bioplynové stanice fungující na principu biopaliv první generace alespoň částečně přejít na biopaliva druhé generace.

Cílem této práce je vytvořit studii shrnující potenciál využití gastroodpadu v bioplynových stanicích a navrhnout linku, která umožní gastroodpad zpracovávat podle příslušných legislativních podmínek. K této lince vypracovat bilance a stanovit základní charakteristiky uvažovaných zařízení. Na konec posoudit rentabilitu takové linky pomocí rozvahy CAPEX a OPEX a příslušné citlivostní analýzy návrhu.

1 Využití bioplynu a jeho výroba

V této kapitole je rozebírána aktuální energetická situace v ČR a EU. Dále výroba bioplynu, který je součástí portfolia způsobů výroby a uchování energie. Jako modelový příklad bioplynové stanice je popsána BPS Chotýčany.

1.1 Aktuální energetická situace

V roce 2022 se evropský energetický sektor ocitl pod velkým tlakem, který přinesl prudký nárůst cen energie. Hlavním důvodem je především fakt, že v plánu přechodu na nízkouhlíkové hospodářství nebyl zahrnut scénář, ve kterém by musela být Evropa energeticky soběstačná [1]. Tento scénář se však stal, kvůli mnoha různým faktorům, skutečností. Definitivní zhoršení vyvolalo napadení Ukrajiny ruskou armádou vedoucí k zastavení dodávek plynu do mnoha států Evropy, které se postavily na stranu Ukrajiny. To vše omezilo rychlost obnovy po krizi spojené s Covid-19, zvýšilo inflační tlaky a miliony Evropanů vrhlo na hranici energetické chudoby.

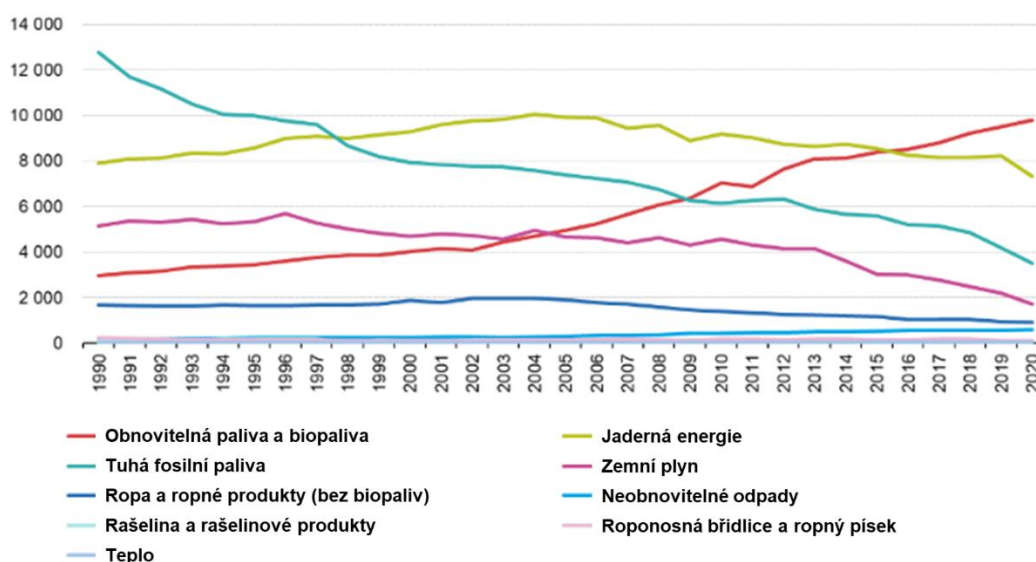
Ještě v březnu 2022 se představitelé zemí evropské 27 dohodli na ukončení závislosti na dovozu ruských fosilních zdrojů [2]. Od té doby se hledají způsoby, jak toho dosáhnout v co nejkratším čase. Kromě hledání nových dodavatelů zkapalněného zemního plynu nebo získávání nových smluv s těmi stávajícími bylo přijato opatření pro zimu 2022/2023 na snížení spotřeby zemního plynu o 15 % [2].

Energetické trilema (bezpečnost, cenová dostupnost, udržitelnost) do této chvíle ovlivňované primárně Evropskou zelenou dohodou (European green deal) se tak dostalo před novou výzvou – jak vykrýt nedostatky energií, aniž by ceny nadále prudce stoupaly a zároveň by byl zachován proces postupné dekarbonizace energetiky.

1.1.1 Současné zdroje energie v Evropské unii

V roce 2020 pocházela většina primárních zdrojů energie v EU z dovozu. Více než 40 % primárních zdrojů získaných na území EU byly původem z obnovitelných zdrojů a přibližně třetina z jaderných elektráren. Ruská federace je pro EU doposud největším dodavatelem fosilních zdrojů energie. V roce 2020 byla více než polovina tuhých paliv (zejména uhlí) dovezena právě z Ruska. Z importovaného zemního plynu tvořil ten ruský 43 %. [3]

Podle statistik Eurostatu [4], které jsou znázorněny na obrázku 1, lze během 30letého období mezi lety 1990 a 2020 pozorovat stoupající trend využívání obnovitelných zdrojů energie a biopaliv jako zdrojů primární energie a zároveň pokles zdrojů neobnovitelných.



Obrázek 1 Primární zdroje energie podle typu paliva v EU (1990-2020) [4], přeloženo

1.1.2 Současné zdroje energie v ČR

Ze statistik Energetického regulačního úřadu [5] vyplývá, že v roce 2021 bylo na území ČR vyrobeno 84,9 TWh elektrické energie brutto. Největší část z toho byla vyrobena v parních elektrárnách 38,6 TWh (45,5 %) následovaných jadernými elektrárnami s výrobou 30,7 TWh (36,2 %). Oproti roku 2020 vzrostla výroba elektřiny brutto z OZE (obnovitelné zdroje energie), a to konkrétně o 255 GWh na 10,5 TWh (+2,5 %). Přitom však meziročně klesly podíly výroby elektřiny z větrných elektráren na 0,6 TWh (-14 %), fotovoltaických elektráren na 2,1 TWh (-3,7 %) a mírně také z bioplynu a skládkových plynů na 2,6 TWh (-0,1 %). Je zřejmé, že ostatní OZE musely svou produkci zvýšit, aby byl celkový přírůstek kladný. Největší nárůst vyrobené elektřiny brutto zaznamenaly vodní elektrárny s výrobou 2,4 TWh (+22,5 %), dále pak výroba z biomasy 2,7 TWh (+6,6 %) a elektrárny fungující na biologicky rozložitelný komunální odpad 0,1 TWh (+6,6 %).

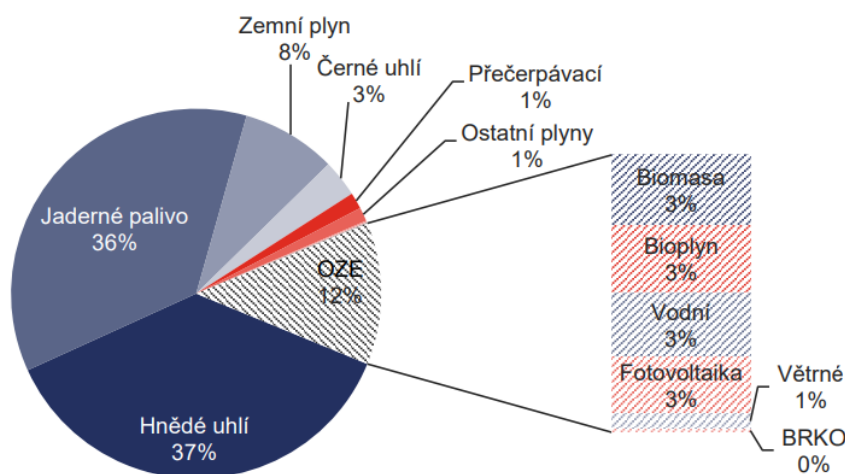
Bioplynové stanice vyrobily v roce 2021 celkem 2 592,1 GWh, tedy přibližně 3,1 % elektrické energie brutto. Největší podíl OZE na výrobě elektrické energie brutto měla Praha, jejíž výrobu elektřiny brutto tvořily ze 74,5 % OZE. Bioplynové elektrárny v Praze vyprodukovaly 22,8 % celkové vyrobené elektrické energie brutto. Nejvíce elektřiny brutto z bioplynu bylo vyrobeno na Vysočině, konkrétně 419,3 GWh. Detailní statistiku lze vidět na obrázku 2.

	PHA	JHC	JHM	KVK	VYS	HKK	LBK	MSK	OLK	PAK	PLK	STC	ULK	ZLK	Celkem
Výroba elektřiny brutto	195,1	17 091,0	1 786,2	4 124,3	16 124,1	1 071,8	450,6	4 532,0	1 526,8	5 700,4	1 428,3	6 763,6	23 471,1	642,1	84 907,3
■ Hnědé uhlí	0,0	186,0	20,1	1 729,9	17,9	243,2	0,9	83,2	159,0	5 134,1	547,9	4 060,3	19 000,1	224,4	31 407,1
■ Jaderné palivo	0,0	15 862,7	0,0	0,0	14 868,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	30 731,2
⊘ Obnovitelné zdroje energie (OZE)	145,4	971,4	1 193,1	186,1	662,6	713,7	324,6	770,5	471,0	467,0	785,3	2 061,8	1 507,8	287,1	10 547,3
■ Zemní plyn	28,1	70,2	532,1	2 207,9	88,2	94,6	114,5	127,9	94,2	64,9	70,5	546,6	2 893,9	85,9	7 019,7
■ Černé uhlí	0,0	0,0	0,5	0,0	0,0	19,0	0,0	2 650,6	64,1	9,7	0,0	0,0	3,7	14,0	2 761,7
■ Přečerpávací	0,0	0,0	0,0	0,0	485,2	0,0	0,0	0,0	716,6	0,0	0,1	9,5	0,0	0,0	1 211,4
■ Ostatní plyny	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	871,3	0,0	0,0	0,0	72,4	64,3	19,0	1 027,0
■ Ostatní pevná paliva (mimo BRKO)	21,5	0,0	37,3	0,4	0,1	0,0	10,5	2,3	0,0	0,0	24,1	0,0	0,0	0,9	97,2
■ Odpadní teplo	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	25,1	20,9	21,6	0,0	1,0	0,0	1,8	70,5
■ Topné oleje	0,0	0,7	1,5	0,0	1,6	1,2	0,0	1,1	0,9	3,1	0,5	8,0	1,3	0,7	20,6
■ Ostatní kapalná paliva	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,9	0,0	8,3	12,2
■ Ostatní	0,0	0,0	1,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,5
■ Koks	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Celkem OZE [MWh]	145,4	971,4	1 193,1	186,1	662,6	713,7	324,6	770,5	471,0	467,0	785,3	2 061,8	1 507,8	287,1	10 547,3
⊘ Biomasa	0,0	216,1	288,9	7,8	46,3	263,2	0,1	429,6	11,5	2,9	241,6	392,8	749,7	14,2	2 664,6
⊘ Bioplyn	44,5	256,5	251,7	31,1	419,3	237,8	27,7	154,1	224,7	284,3	210,4	300,0	83,1	67,0	2 592,1
⊘ Vodní	48,8	241,0	83,4	28,2	84,1	101,0	79,1	59,9	38,6	71,3	79,1	1 113,6	350,2	30,4	2 408,5
⊘ Fotovoltaika	19,9	257,9	513,0	12,0	93,7	93,4	103,4	60,7	117,2	92,2	210,5	249,9	154,2	175,3	2 153,3
⊘ Větrné	0,0	0,0	13,0	107,0	19,3	18,4	98,5	66,1	79,1	16,4	7,7	5,4	170,6	0,1	601,5
⊘ BRKO	32,3	0,0	43,2	0,0	0,0	0,0	15,8	0,0	0,0	0,0	36,0	0,0	0,0	0,0	127,3
Podíl OZE ¹⁾	74,5%	5,7%	66,8%	4,5%	4,1%	66,6%	72,0%	17,0%	30,8%	8,2%	55,0%	30,5%	6,4%	44,7%	12,4%

¹⁾ prostý podíl výroby elektřiny brutto z OZE a celkové výroby elektřiny brutto

Obrázek 2 Podíl paliv a technologií na výrobě elektřiny brutto v krajích ČR v roce 2021 [5]

Obrázek 3 pak nabízí zjednodušenou grafickou podobu statistiky podílů paliv a technologií na výrobě elektřiny brutto v ČR pro rok 2021.

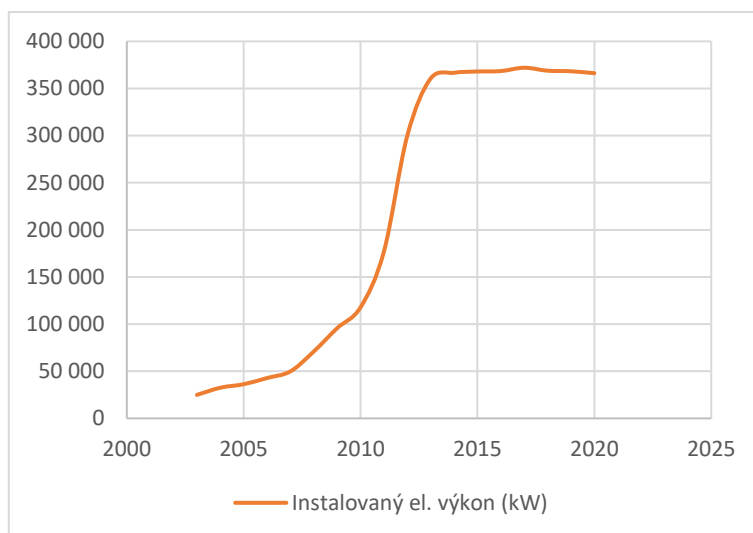


Obrázek 3 Podíl paliv a technologií na výrobě elektřiny brutto v ČR v roce 2021 [5]

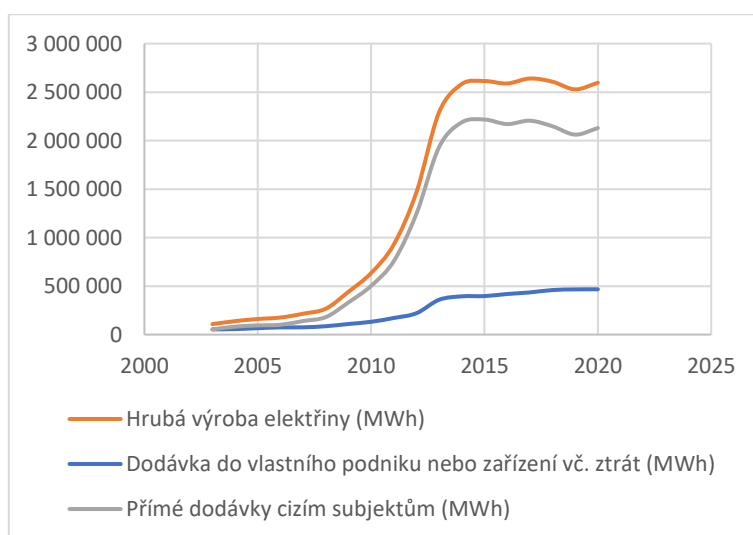
Stejná statistika [5] dále uvádí, že z 2 592 121,7 MWh připadajících na bioplyn vyrobených v ČR v roce 2021 pocházelo 74 477,7 MWh (2,9 %) ze skládkového plynu a 113 255,2 MWh (4,4 %) z kalového plynu z ČOV. Na technologickou vlastní spotřebu elektřiny na výrobu elektřiny bylo spotřebováno 188 854,0 MWh, tedy 7,3 %. Dále na technologickou vlastní spotřebu elektřiny na výrobu tepla bylo potřeba 23 981,4 MWh, tedy 0,9 %. Výroba elektřiny netto (elektřina brutto očištěna o vlastní technologické spotřeby) z bioplynu se tak rovnala číslu 2 403 267,6 MWh.

Ze statistiky Ministerstva průmyslu a obchodu [6] zpracované do grafů na obrázcích 4 a 5 je patrné, že mezi lety 2003 a 2013 probíhal prudký růst instalovaného výkonu bioplynových elektráren (v grafech jsou zahrnuty komunální i průmyslové ČOV, skládkový plyn a bioplynové stanice),

který logicky vedl k větším hodnotám výroby. V posledních letech se však tempo růstu téměř zastavilo a výroba elektřiny brutto z bioplynu v ČR se stabilně pohybuje okolo 2,5 GWh ročně.



Obrázek 4 Vývoj instalovaného výkonu [6]



Obrázek 5 Vývoj výroby elektřiny z bioplynu (celkem) [6]

1.2 Bioplyn

Definice bioplynu využívaná v této práci je převzata od Straky [7]. „Bioplyn“ je slovo vzniklé přidáním předpony „bio-“ ke slovu „plyn“. Název tak evokuje plyn produkovaný blíže nespécifikovaným biologickým druhem. To je však značně široká definice. Tak široká, že se do ní vejdou i biochemické rozklady a syntézy, při kterých vznikají plyny, které za bioplyn jednoznačně považovány nejsou. Jde například o kyslík jako produkt biologických fotosyntetických procesů nebo o oxid uhličitý vznikající při ethanolovém kvašení cukrů. Oba tyto plyny jsou produktem biologických procesů, ale nejsou běžně nazývány bioplynem.

Tento problém nedokáže vyřešit ani podmínka hořlavosti. Biologickou cestou vznikající vodík se typicky nenazývá bioplynem, stejně tak ani sulfan nebo kyanovodík, i když splňují obě předchozí podmínky.

Až od první čtvrtiny 20. století se spolu s anaerobními postupy pro čištění odpadních vod rozšířil termín „bioplyn“ (do 60. až 70. let často označován jako „čistírenský plyn“ nebo „kalový plyn“). Pojem „bioplyn“ tak dnes výhradně slouží pro označení plynného produktu anaerobní metanové fermentace organických látek (v čistírenských aplikacích lze narazit na pojmy „anaerobní stabilizace kalů“ nebo jen „stabilizace“).

Obecně je bioplyn jakožto produkt anaerobní fermentace plynnou směsí metanu a oxidu uhličitého. Ačkoliv může suma objemových podílů těchto dvou plynů v ideálních podmínkách dosáhnout téměř 100 %, v praxi se v bioplynu vyskytuje ještě několik dalších plynů. Může jít například o zbytky vzdušných plynů (dusík, kyslík, argon), nespotřebované produkty z mezifázi přeměny (vodík, přebytečný oxid uhličitý) anebo produkty ze simultánně probíhajících organických reakcí (sirovodík, oxid dusný, kyanovodík či jiné uhlovodíky i jejich deriváty).

1.2.1 Proces vzniku bioplynu

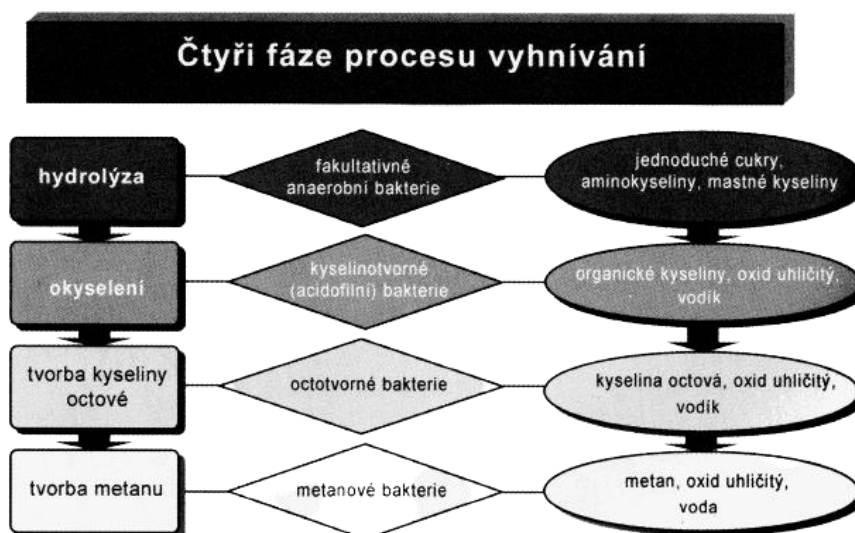
Při rozkladu organických látek v anaerobním prostředí vzniká metan [7]. Díky tomu se tento proces někdy nazývá jako metanizace. Jedná se o soubor dějů, během kterých se postupně vytváří bioplyn a stabilizovaná organická hmota. Každý děj vykonávají různé mikrobiální skupiny. Jmenovitě jde o hydrolyzu, acidogenezi, acetogenezi a methanogenezi. Tyto děje jsou komplexní procesy, při kterých probíhá mnoho složitých reakcí. Zjednodušeně jsou popsány podle Straky [7] a Schulze [8] v následujících odstavcích a znázorněny na obrázku 6.

Hydrolyza je první fází procesu, při které se přítomné organické makromolekulární látky (bílkoviny, uhlovodíky, tuky, celulóza) štěpí pomocí enzymů na nízkomolekulární látky rozpustné ve vodě.

Acidogeneze následuje jako druhá fáze. Jedná se o další rozklad látek vznikajících jako produkt při hydrolyze na jednoduché organické látky jako jsou nižší mastné kyseliny, alkoholy, oxid uhličitý a vodík.

Acetogeneze je třetí fáze, ve které působením acetogenních bakterií vzniká kyselina octová, vodík a oxid uhličitý.

Methanogeneze je čtvrtá fáze, během níž probíhá tvorba metanu přeměnou z kyseliny octové, ale také z oxidu uhličitého a vodíku. V této fázi vzniká navíc oxid uhličitý a voda.



Obrázek 6 Čtyři fáze procesu vyhnívání [8]

1.2.2 Podmínky tvorby bioplynu

Existuje celá řada podmínek, které musejí být splněny, aby tyto procesy mohly probíhat. Jedenáct hlavních jsou podle Schulze [8] následující:

Vlhkost

Anaerobní bakterie, které tvoří bioplyn, nemohou na rozdíl od svých aerobních protějšků žít v pevném substrátu. Aby se mohly množit a „pracovat“, potřebují substrát obsahující dostatečné množství vody.

Absence vzduchu

V procesu nesmí být přítomen kyslík, protože jde o anaerobní proces. Ve vstupním substrátu se však často kyslík nachází, ale ten zpracují aerobní bakterie v první fázi procesu. Rovněž se někdy přidává nepatrné množství kyslíku přímo do fermentoru, což má pozitivní vliv na odsíření, ale anaerobní proces to neohrožuje.

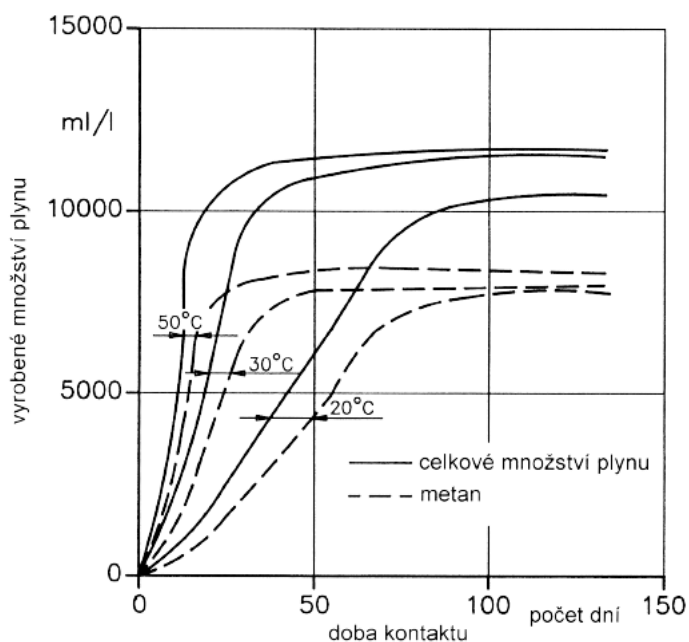
Absence světla

Z hlediska procesu je výhodnější, když probíhá bez přístupu světla. Pokud je v procesu přítomno světlo, probíhá pomaleji.

Optimální teplota a její stálost

Pro udržení stálého výkonu procesu je nutné udržovat i stálou teplotu, a to podle toho, jaký typ bakteriálních kmenů je pro tvorbu bioplynu využíván. Platí, že čím je vyšší teplota, tím je rychlost rozkladu vyšší, což lze vidět na obrázku 7. Mohlo by se zdát, že vyšší teploty jsou vždy výhodnější (pokud nejsou uvažovány zvětšené provozní náklady), ale s rostoucí teplotou také klesá podíl metanu v bioplynu a bakterie se stávají citlivější na teplotní výkyvy. Mezofilní bakteriální kmeny

dokážou snést denní výkyvy v rozmezí 2-3 °C od střední hodnoty, oproti tomu termofilní kmeny by neměly být vystavovány změnám větším než 1 °C od střední hodnoty.

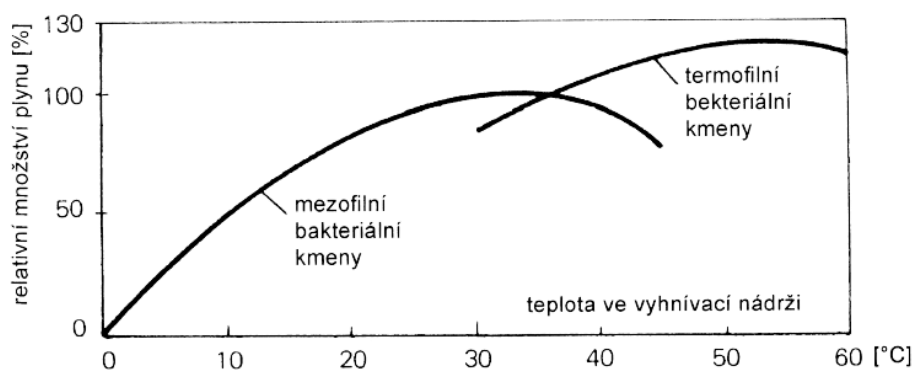


Obrázek 7 Vliv teploty vyhnívacího procesu a doby kontaktu na množství a složení vyrobeného plynu [8]

Z praktických aplikací vycházejí tři typické teplotní oblasti, které daným bakteriálním kmenům vyhovují nejvíce. Jsou to:

- psychofilní kmeny – teploty pod 20 °C,
- mezofilní kmeny – teploty v rozmezí 25 až 35 °C,
- termofilní kmeny – teploty nad 45 °C.

Na obrázku 8 jsou vyneseny dvě křivky pro mezofilní a termofilní bakteriální kmeny. Z polohy vrcholu křivek je možné odečíst optimální teploty ve vyhnívací nádrži pro jednotlivé kmeny. Množství plynu, které vyprodukují mezofilní bakterie při teplotě 32 °C je bráno jako referenční hodnota (100 %).



Obrázek 8 Vliv teploty na dosažitelné množství plynu ve vztahu k hodnotě dosažené při optimálních teplotních poměrech (32 °C mezofily, 55 °C termofily) podle Kalterwassera [8]

Hodnota pH

Ukazatel pH by se měl pohybovat okolo hodnoty 7,5, což je slabě alkalické prostředí. Kejda a hnůj této hodnoty dosahují ve fázi acidogeneze vlivem vzniku amonia. Pokud jsou některé substráty kyselé (lihovarnické výpalky, syrovátka a siláž), je možné hodnotu pH zvýšit pomocí vápna.

Přísun živin

Aby se mohly metanové bakterie množit a růst, potřebují přístup k rozpustným dusíkatým sloučeninám, minerálním látkám a stopovým prvkům. Všechny tyto látky jsou obsaženy v hnoji a kejdě, ale také v trávě, kuchyňských odpadech, zbytcích jídla, pivovarském mlátu, lihovarnických výpalcích nebo například syrovátce. Doporučuje se používat hnůj a kejdu jako základ (kvůli pozitivnímu vlivu na hodnotu pH) a ostatních látek jako přísad.

Kontaktní plocha

Organické látky nerozpustné ve vodě je nutné rozdrobit nebo strukturovat, aby došlo ke zvětšení kontaktní plochy. Slámu, trávy či bioodpady je nutno rozsekat, jinak vyhnívají velmi dlouho a mohou vytvářet plovoucí vrstvu.

Inhibitory

Látky, které zpomalují nebo při vyšších koncentracích dokonce zastavují proces, se nazývají inhibitory. V případě anaerobního vyhnívání mohou být inhibitory například organické kyseliny, antibiotika nebo dezinfekční prostředky. Je proto nutné hlídat jejich obsah v substrátu.

Zatížení vyhnívacího prostoru

Pro správné fungování procesu je nutné stanovit množství substrátu, který se do systému dodává. K tomu slouží hodnota zatížení vyhnívacího prostoru s měrnou jednotkou $1 \text{ kg}_{\text{os}} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$. Ta představuje množství organické sušiny, které je možné dodat do systému na 1 m^3 jeho objemu za den. Jako příklad lze uvést hodnoty provozu na teplotě $35 \text{ }^\circ\text{C}$, které se pohybují mezi $0,5$ a $1,5 \text{ kg}_{\text{os}} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$.

Rovnoměrnost přísunu substrátu

Kromě hodnoty zatížení vyhnívacího prostoru je důležité také zajistit vhodnou frekvenci doplňování substrátu. Doplňování by mělo probíhat i několikrát denně, což chrání plnicí zónu před nadměrným zatížením a před výrazným snížením teploty způsobeným přísunem velkého množství hmoty s nižší teplotou, než je ve fermentoru.

Odplynování substrátu

Pokud by nebyl z fermentační nádrže odváděn plyn, docházelo by ke zvyšování tlaku a potenciálním škodám. Kromě toho odvádění plynu také zvyšuje výkon samotného procesu

vyhívání. Aby docházelo k uvolňování bioplynu i přímo ze substrátu, je vhodné substrát pravidelně promíchávat.

Podle Dubleina a Steinhauserové [9] je také poměr atomů uhlíku a dusíku důležitou vlastností prostředí, ve kterém má probíhat tvorba bioplynu, a proto je uveden jako dvanáctá vlastnost:

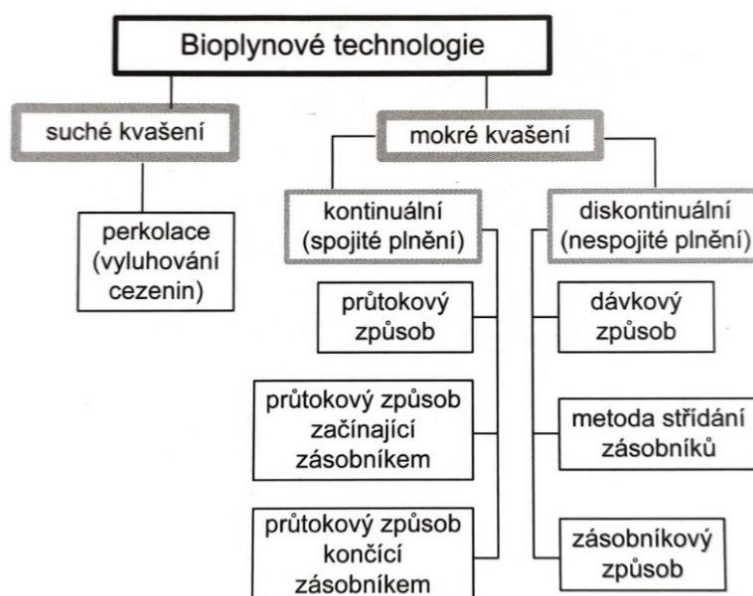
C:N poměr

Buňky obsahují deset hlavních složek – oxid uhlíčitý, kyslík, vodík, dusík, fosfát, sulfid, draslík, vápník a železo. Dále stopové prvky mangan, molybden, zinek, měď, kobalt, nikl, vanad, bór, chlór, sodík, selen, křemík a wolfram. Optimální poměr mezi všemi nutrienty a stopovými prvky vychází ze stavby základních buněk. C:N poměr, tedy poměr mezi uhlíkem a dusíkem, který se používá jako jednoduchý ukazatel vlastností substrátu, by měl odpovídat rozmezí 16:1–25:1.

V substrátech s příliš nízkým C:N poměrem může docházet k nadměrné produkci amoniaku a zpomalení produkce metanu. Naopak příliš vysoký C:N poměr znamená nedostatek dusíku, a tedy negativní důsledky na tvorbu bílkovin, které jsou důležitým stavebním a energetickým materiálem pro metabolismus mikroorganismů.

1.2.3 Bioplynové stanice

Bioplynové stanice jsou zařízení, ve kterých probíhá kontrolovaná výroba bioplynu. U některých je jejich cílem odbourat a stabilizovat vstupní substrát (typicky čistírenské bioplynové stanice), u jiných jde primárně o výrobu bioplynu ze zemědělských komodit (běžné zemědělské bioplynové stanice). Podle toho, jakým způsobem výroba probíhá, je možné bioplynové stanice rozdělovat do různých kategorií. Jedno z možných dělení je na obrázku 9.



Obrázek 9 Schematický přehled bioplynových technologií [8]

Základní rozdělení spočívá v dělení na suché a mokré kvašení (fermentaci). Zatímco při mokré fermentaci je ve fermentoru většinou méně do 12 % sušiny, při suché fermentaci je obsah sušiny mezi 25 a 45 %, ve vysokosušivém procesu je dokonce větší než 40 % sušiny [10].

Další dělení vychází ze způsobu plnění, a to je buď spojitě (kontinuální) nebo nespojitě (diskontinuální). Většina bioplynových stanic funguje na principu spojitěho plnění pomocí průtokového způsobu [8]. Do vyhnívací nádrže je v tomto případě pravidelně dodáváno malé množství čerstvého substrátu, zatímco je odebíráno odpovídající množství již vyhnílého substrátu. Produkce bioplynu je spojitá a nemění se v čase tak, jako při diskontinuálním plnění.

1.2.4 Využití bioplynu

Bioplyn je podle Schulze [8] díky svému obsahu metanu považován za výhodného nositele energie. Nachází uplatnění jako zdroj energie pro výrobu elektrického proudu, vaření, vytápění a přípravu teplé vody, sušení, chlazení a napájení infračervených zářičů. Výhřevnost bioplynu se pohybuje v rozmezí 5 až 7,5 kWh·Nm⁻³ především v závislosti na koncentraci metanu, jehož výhřevnost odpovídá 9,95 kWh·Nm⁻³ (802,6 kJ·mol⁻¹) [7]. Hlavní metody využití bioplynu jsou podle Schulze [8] následující:

Spalování

Jednoduché spalování pro získání tepla nebo světla se v západním světě již nepoužívá, avšak v rozvojových oblastech některých zemí (Indie, Čína, Nepál) se bioplyn používá k vaření.

Vytápění

Pro vytápění bioplynem lze použít kotle s atmosférickými hořáky s malými výkony od 10 do 30 kW nebo kotle s dmychadlovými hořáky pro větší výkony. Kromě toho je také možné bioplyn spalovat v průtokovém ohříváči, který se používá především pro ohřev vody.

Kogenerace tepla a elektrické energie

Kogenerace je souběžná výroba elektřiny a tepla. Bioplyn je v tomto případě spalován v plynovém motoru, ten pak pohání generátor elektřiny. Teplo se získává z chlazení motoru a ze spalínového výměníku. Dnes se jedná o velmi rozšířený způsob využití bioplynu. Výroba elektrického proudu může být orientována podle spotřeby nebo běží spojitě.

Výroba biometanu

V případě, že se bioplyn vyčistí od oxidu uhličitého a dalších stopových látek jako jsou oxidy síry nebo sirovodík, vzniká biometan, který musí obsahovat alespoň 95 obj. % metanu a zároveň méně než 5 % mol. oxidu uhličitého [11]. To a další požadavky na biometan platné v ČR a dalších státech

jsou uvedeny v tabulce 1. Biometan je následně možné vtlačovat do distribuční sítě pro zemní plyn anebo ho využívat jako biopalivo typu CNG nebo LNG.

Tabulka 1 Srovnání vybraných parametrů biometanu v ČR a jiných evropských zemích [11]

Parametr	Jednotka	Česká republika	Německo		Rakousko	Švýcarsko
Wobbeho index $W_{s,n}$ celkový rozsah	kWh/m ³	12,7 až 14,5	Plyn L 10,5 až 13,0	Plyn H 12,8 až 15,7	13,3 až 15,7	13,3 až 15,7
Spalné teplo $H_{s,n}$	kWh/m ³	9,4 až 11,8	8,4 až 13,1		10,7 až 12,8	10,7 až 13,1
Relativní hustota d	–	0,56 až 0,70	0,55 až 0,75		0,50 až 0,65	0,55 až 0,70
Metan CH ₄	Obj. %	≥ 95	–		≥ 96	≥ 96
Kyslík (suchý) O ₂	Obj. %	< 0,5 % mol.	≤ 3		≤ 0,5	≤ 0,5
Dusík N ₂	Obj. %	< 2 % mol.	–		≤ 5	–
Oxid uhličitý CO ₂	Obj. %	< 5 % mol.	≤ 6		≤ 2	≤ 6
Sirovodík H ₂ S	mg/m ³	< 7	≤ 5		≤ 5	≤ 5
Síra S –	mg/m ³		≤ 30		≤ 30	≤ 30

1.2.5 Substráty pro výrobu bioplynu

Jako substrát pro výrobu bioplynu mohou být podle Dubleina a Steinhauserové [9] použity všechny typy biomasy, které obsahují sacharidy, bílkoviny, tuky, celulózu a hemicelulózu. Kromě toho by podle nich měly substráty splňovat také následující podmínky:

- množství organické složky odpovídá zvolenému procesu,
- mají vysokou výživovou hodnotu s maximálním možnou produkcí bioplynu (porovnání výnosu vybraných substrátů je na obrázku 10),
- neobsahují patogeny a jiné mikroorganismy škodlivé pro proces vyhnívání,
- mají co nejnižší podíl škodlivých látek a nerozložitelných odpadů,
- složení vznikajícího bioplynu by mělo být vhodné k dalšímu využití,
- fermentační zbytek by měl být využitelný (např. jako hnojivo).

Jednotlivé příklady biomasy, které lze použít v BPS jako substrát jsou podle Dubleina a Steinhauserové [9] následující:

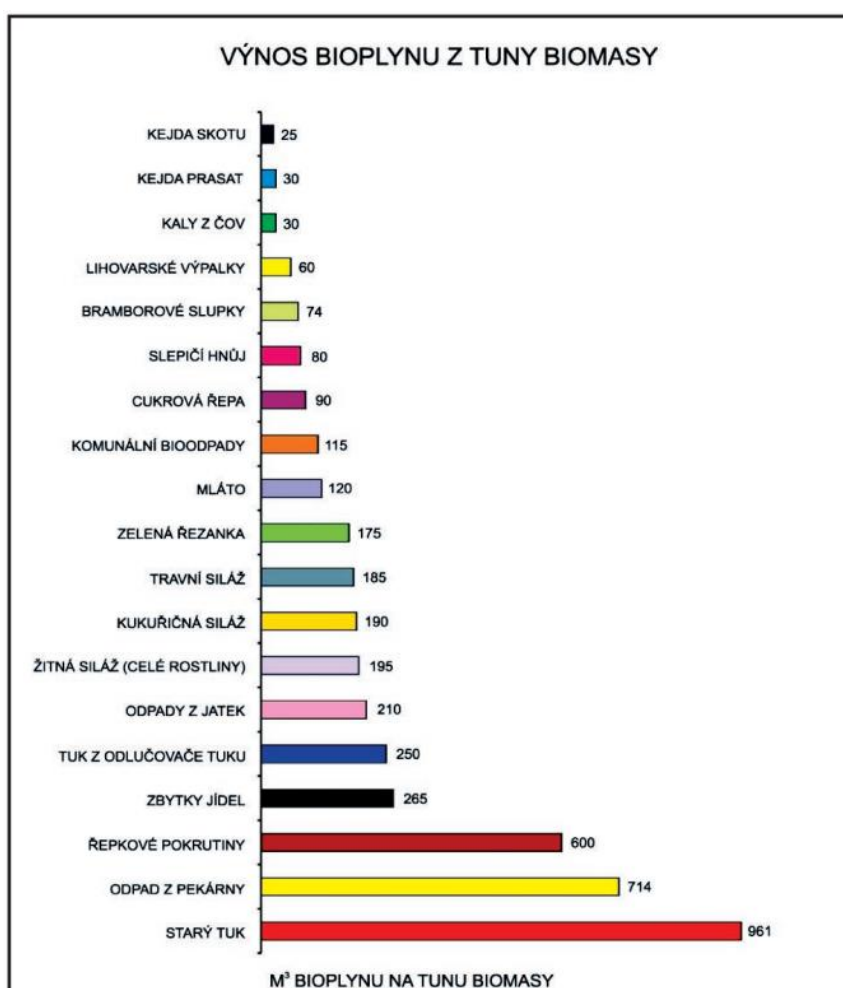
Zemědělské produkty

Výroba bioplynu ze zemědělských rostlin je velmi závislá na způsobu a místě pěstování biomasy, dále také na sezóně, období sklizně nebo použitých hnojivech. Kromě toho má velký vliv i následující úprava biomasy, jako je sušení nebo silážování. Vhodný typ rostlin závisí primárně

na lokálních podmínkách. Může jít o travu, siláž z celých rostlin, pšenici, tuřiny nebo typicky kukuřičnou siláž.

Hnůj a kejda

Většina bioplynových stanic používá jako hlavní substrát tekutý hnůj (kejdu), který je často kombinován s biomasou rostlinného původu. Kejdy obsahují mnoho látek. Většinu z nich je možné zpracovat v bioplynové stanici, ale některé příměsi (písek, kameny, peří či různé plasty nebo dráty) mohou působit komplikace v procesu, a je proto nutné přizpůsobit technologii i těmto nežádoucím složkám, a předejít tak potenciálním škodám.



Obrázek 10 Teoretická výtěžnost surovin [10]

Bioodpad

Potenciálně výhodný zdroj vstupních surovin pro bioplynové stanice mohou být biologicky rozložitelné odpady produkované domácnostmi, restauracemi, obchody nebo výrobci potravin. Tyto odpady jsou většinou díky svému složení vhodnými substráty pro bioplynové stanice. Velkou výhodou bioodpadu je jeho poměrně stálá celoroční produkce, která sice kolísá v závislosti na ročním období a druhu bioodpadu, nicméně často probíhá celoročně. Jedním z mnoha příkladů bioodpadu je i gastroodpad.

Čistírenské kaly

Jak bylo již zmíněno v přechozí kapitole, pokud je vstupní surovinou pro anaerobní fermentaci čistírenský kal, bývá takovýto proces označován jako stabilizace. V čistírnách odpadních vod jsou z vody odstraněny nejprve velké kusy nečistot pomocí hrubých sít, poté malé kusy nečistot pomocí jemných sít. Následují lapáky písku a usazovány, kde sedimentují těžké částice ke dnu, zatímco organický kal rozpuštěný ve vodě pokračuje dál. Následuje biologické čištění, které probíhá pomocí aerobních mikroorganismů, jehož produktem je čistírenský kal. Ten se následně stabilizuje vyhníváním ve vyhnívacích nádržích za tvorby bioplynu.

Odpadní tuky

Odpadní tuky mohou být vhodným substrátem, protože mají velký výnos bioplynu. Problémem jsou ale jejich vlastnosti. Pro použití v bioplynových stanicích musejí být bioplynové stanice přizpůsobeny. Navíc je nutné zpracovávat tuk v určité kvalitě, tuky nižší kvality je doporučeno zpracovávat v samostatných stanicích.

Řasy

Kultury mikrořas mohou být použity jako substrát pro bioplynové stanice. Protože řasy potřebují k životu oxid uhličitý, který je zároveň produktem spalování metanu v bioplynu, existuje možnost využívat zplodiny z kogeneračních jednotek pro sycení vody oxidem uhličitým, který by následně využívaly řasy pro svůj růst. To by umožnilo vytvořit malý a samostatný CO₂ neutrální cyklus.

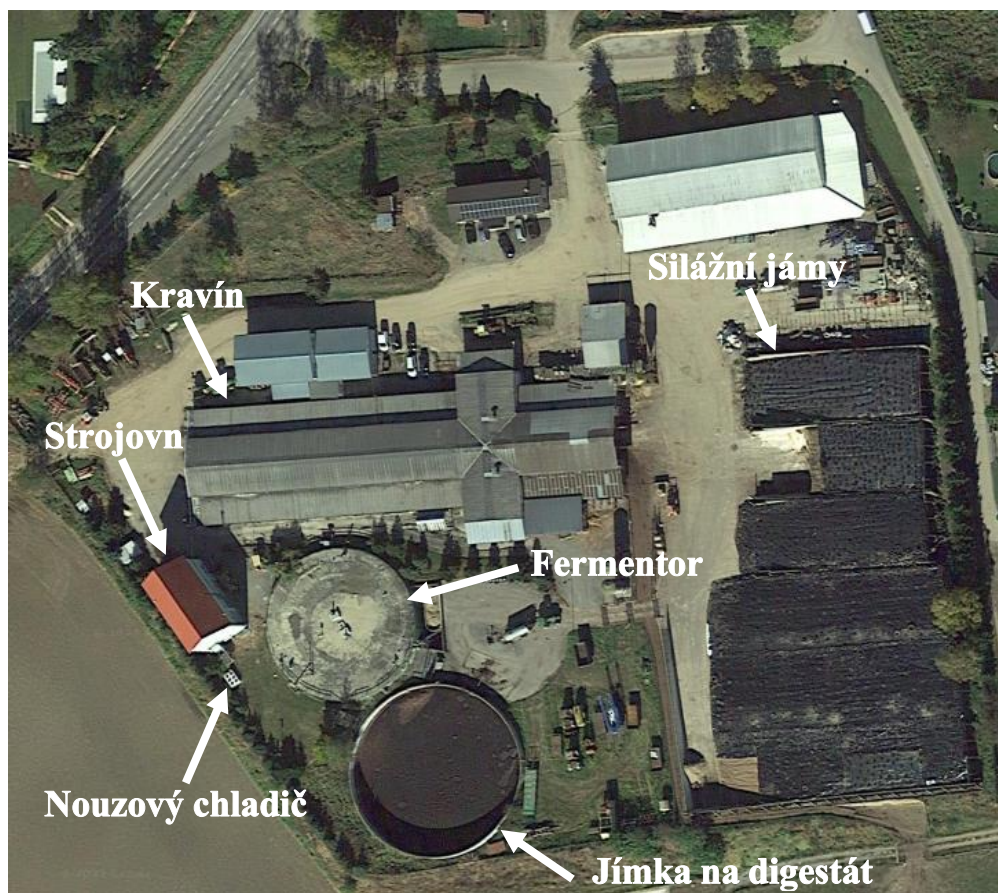
1.3 Bioplynová stanice Chotýčany

Za účelem návrhu konkrétní podoby linky v praktické části této práce je uvažována existující BPS, ke které by se tato linka mohla připojit. S laskavým svolením provozovatelů bude linka na zpracování gastroodpadu navrhována na použití v BPS Chotýčany. Z tohoto důvodu je v této části popsána chotýčanská bioplynová stanice jako ukázková BPS podle informací z rozhovoru s jejími provozovateli [12] a fyzické návštěvy autora v prosinci roku 2022 (proto se uváděné údaje vztahují k tomuto datu).

Bioplynová stanice Chotýčany se nachází v areálu zemědělského družstva v obci Chotýčany, která leží přibližně 10 kilometrů severně od Českých Budějovic. BPS Chotýčany provozuje BP – PROFIT, spol. s r.o. V areálu zemědělského družstva se kromě bioplynové stanice nachází také kravín, který bioplynové stanici zajišťuje přísun hovězí kejdy a silážní jámy, ve kterých se skladuje kukuřičná siláž. Konkrétní rozložení je patrné z obrázku 11.

Kromě těchto dvou surovin se v BPS Chotýčany zpracovává také travní senáž a v minulosti bylo zvažováno zpracovávání lihovarnických výpalků či pivovarnického mláta. V současnosti se

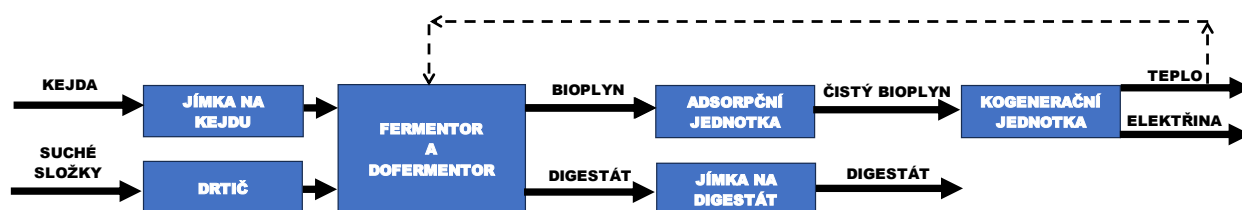
stanice z hlediska teploty provozuje v mezofilních podmínkách, ale probíhá příprava na změnu na termofilní podmínky.



Obrázek 11 Letecký snímek areálu zemědělského družstva v Chotýčanech [13]

1.3.1 Technologie bioplynové stanice Chotýčany

Zjednodušené schéma technologie BPS Chotýčany lze vidět na obrázku 12. Stejně jako v jiných bioplynových stanicích i tam stojí technologie výroby bioplynu na procesech, které se odehrávají ve fermentoru. Fermentor je tvořen betonovou konstrukcí sestávající ze dvou stěn ve tvaru sousedících válců o průměrech 23 a 32 m. Prostor v mezikruží o objemu 2 038 m³ slouží jako fermentor a prostor vnitřního válce s objemem 2 285 m³ představuje dofermentor, do něhož je přepadem, který je způsobený doplňováním čerstvého substrátu do fermentoru, dodáváno odpovídající množství již částečně vyhnílého substrátu z fermentoru.



Obrázek 12 Zjednodušené schéma BPS Chotýčany

Hovězí kejda se z kravína dopravuje pomocí čerpadel do podzemní skladovací jímky, odkud se dávkuje přímo do fermentoru. Kukuřičnou siláž a travní senáž obsluha pomocí nakladačů pravidelně doplňuje do speciálního podavače pevných látek s váhou a časovým spínačem, ze kterého se šnekovými dopravníky v dané intervaly dodává do fermentoru. Kromě vstupních substrátů se do vyhnívacího prostoru přidává také velmi malé množství vzduchu, které umožňuje výskyt bakterií snižující obsah sloučenin síry v bioplynu.

Bioplyn vznikající anaerobním vyhníváním je z vyhnívacího prostoru odváděn do plynojemu o objemu 400 m³, následně k čištění v adsorpční koloně a poté spalován v kogeneračních jednotkách. V tomto případě se jedná o plynové spalovací motory, které jsou připojeny na elektrické generátory dodávající elektřinu do přenosové soustavy. Teplo z kogeneračních jednotek je odváděno oběhem chladicího média v motoru a ve spalinovém výměníku, kterým prochází spaliny po opuštění spalovacího prostoru.

V BPS Chotýčany se momentálně využívají dvě kogenerační jednotky. KGJ GE Jenbacher 312 byla upravena tak, aby se její elektrický výkon zvětšil z výrobního nastavení na 526 kW na nynějších 549 kW, což vedlo i ke zvýšení tepelného výkonu z 558 kW na 566 kW. Zároveň byla v roce 2012 přidána druhá KGJ Tedom Cento 100, která disponuje elektrickým výkonem 99 kW a tepelným výkonem 146 kW. Celkově tak poskytuje BPS Chotýčany 648 kW elektrického výkonu a 712 kW tepelného výkonu. Teplo se v BPS Chotýčany využívá na vyhřívání fermentoru a budov v areálu. V případě nadbytku tepla slouží k chlazení KGJ vzduchové kondenzátory.

Digestát odčerpávaný z dofermentoru se dopravuje vedlejší zásobní jímky, odkud ji lze čerpat pro další využití v zemědělství (především jako hnojivo na pole).

BPS Chotýčany po nedávném navýšení denní vsádky denně zpracuje 30 až 35 tun kukuřičné siláže, 2 až 5 tun travní senáže a přibližně 5 až 13 m³ hovězí kejdy. V roce 2021 vyprodukovala BPS Chotýčany 2 221 224 m³ bioplynu a v roce 2022 dokonce více než 2 318 549 m³ bioplynu, ačkoli v létě proběhla měsíční technologická odstávka a uvedená hodnota byla odečtena ze systému pro období leden-listopad.

2 Gastroodpad jako surovina pro výrobu bioplynu

Tato kapitola se zabývá tím, jak je vnímán gastroodpad z pohledu legislativy v ČR a jaké jsou jeho podmínky a možnosti využití. Dále definuje, kolik gastroodpadu v ČR vzniká a jakými vlastnostmi gastroodpad disponuje.

2.1 Gastroodpad z pohledu legislativy ČR

Od 23. července 2021 platí a od 7. srpna 2021 nabyla účinnosti vyhláška č. 273/2021 Sb. (Vyhláška o podrobnostech nakládání s odpady) [14]. Hlava V popisuje seznam biologicky rozložitelných odpadů určených podle § 63 odst. 1 zákona ke zpracování v zařízení určeném k nakládání s biologicky rozložitelnými odpady, který je uveden v příloze č. 25 stejné vyhlášky.

2.1.1 Způsoby nakládání s biologicky rozložitelnými odpady

Dále je ve sbírce [14] podle typu technologie rozděleno, jak lze s biologicky rozložitelnými odpady nakládat. Zpracovávat ho mohou:

- „kompostárny s aerobním procesem zpracování biologicky rozložitelných odpadů,
- vermikompostárny s aerobním procesem zpracování biologicky rozložitelných odpadů pomocí žížal,
- bioplynové stanice s anaerobním procesem zpracování biologicky rozložitelných odpadů,
- další zařízení využívající technologie vyvinuté na základě postupujícího rozvoje vědy a techniky,
- zařízení sloužící k biologické stabilizaci nerecyklovatelných biologicky rozložitelných odpadů před jejich uložením na skládku nebo jejich odstraněním.“ [14]

Při zpracování biologicky rozložitelných odpadů pomocí anaerobní digesce, která se používá v bioplynových stanicích, je nutné dodržovat technologické požadavky. Jsou to:

„(1) Při zpracování biologicky rozložitelných odpadů v bioplynové stanici musí být po dobu stanovenou v tabulce 2. [14]

Tabulka 2 Požadavky na technologie anaerobní digesce [14]

Technologie	Vstupy	Teplota	Doba
Anaerobní digesce	Biologicky rozložitelné odpady živočišného původu	$\geq 55\text{ °C}$	24 hodin
Anaerobní digesce	Výhradně biologicky rozložitelné odpady rostlinného původu	$\geq 40\text{ °C}$	Střední doba zdržení min. 30 dnů

(2) Požadavky odstavce 1 nemusí být splněny, pokud

a) je v technologii zařazena předúprava nebo následná úprava, v rámci kterých je biologicky rozložitelný odpad zahřátý na teplotu 70 °C po dobu alespoň 1 hodiny, nebo

b) výstup z technologie je dále zpracováván v jiné technologii provozované v souladu s touto vyhláškou.

(3) Doba zdržení biologicky rozložitelných odpadů v procesu anaerobní digesce musí být alespoň 30 dnů. Tato doba zdržení může být zkrácena, nejméně však na 20 dnů, pokud provozovatel zařízení zajistí, že produkovaný digestát je dostatečně stabilní a není zdrojem obtěžujícího zápachu. Požadavek na stabilitu je splněn vždy, když digestát trvale splňuje hodnoty stability stanovené modifikovanou metodou podle technické normy ČSN ISO 11734 Jakost vod – Hodnocení úplné anaerobní biologické rozložitelnosti organických látek kalem z anaerobní stabilizace – Metoda stanovení produkce bioplynu.“ [14]

V § 50 jsou rozepsány detailní podmínky hygienizace, v § 51 výstupy ze zařízení určených k nakládání s biologicky rozložitelnými odpady. V případě bioplynových stanic jsou to bioplyn a digestát. § 52 specifikuje limitní hodnoty koncentrací rizikových látek a limitní hodnoty pro indikátorové organismy ve výstupech. Kritéria, při jejichž splnění přestávají být výstupy odpadem, jsou popsány v § 53.

2.1.2 Hygienická pravidla pro vedlejší produkty živočišného původu

Nařízení komise (EU) č. 142/2011 [15] ze dne 25. února 2011 popisuje hygienická pravidla pro nakládání s vedlejšími produkty živočišného původu a získané produkty, které nejsou určeny lidské spotřebě.

V příloze V v kapitole I jsou uvedeny požadavky na zařízení na výrobu bioplynu. Doslovně zní takto:

„1. Zařízení na výrobu bioplynu musí být vybavena pasterizačně/hygienickou jednotkou, kterou není možné obejít, určenou pro vkládané vedlejší produkty živočišného původu nebo získané produkty o maximální velikosti částic 12 mm před vstupem do jednotky, a to s/se:

a) zařízením na sledování, že je během jedné hodiny dosaženo teploty 70 °C;

b) záznamovými přístroji ke kontinuálnímu zaznamenávání výsledků měření uvedených v písmeni a);

a

c) odpovídajícím systémem, aby se zabránilo nedostatečnému ohřevu.“ [15]

Toto nařízení dále říká, že je-li vyprodukovaný digestát uváděn na trh jako hnojivo, pak jeho výroba podléhá schválení Krajskou veterinární správou. Seznam BPS, které zpracovávají gastroodpad (v tomto případě jde o druh výrobku s označením CATW z anglického catering waste) následuje v tabulce 3.

Tabulka 3 Výpis bioplynových stanic s povolením prodávat digestát vyrobený z gastroodpadu [16]

sekte	reg. číslo	název	adresa	typ závodu	kategorie	druh výrobku	činnost	datum schválení
VI	CZ 32711048	Bioplynová stanice Poběžovice I a II	Hostouňská 45, 34522 Poběžovice	Bioplynové stanice	1,2,3	GLYT, BIOG, CATW, BIOR, FORMF	BIOGP	07.08.2014
VI	CZ 32710553	IC-PARK ENERGO, a.s.	Svojšín č. p. 131, 34901 Svojšín	Bioplynové stanice	2,3	RAW, BIOG, MIMC, CATW, BIOR, PAP, MBM, FORMF, DTC, MANU	BIOGP	11.06.2007
VI	CZ 61710768	AVE Žďár nad Sázavou	Jihlavská 2485/32, Žďár nad Sázavou 1, 59101 Žďár nad Sázavou	Bioplynové stanice	2,3	MANU, BIOG, CATW, COMR	COLL	03.02.2011
VI	CZ 31720272	Kompostárna Jrošovice s.r.o. (BS)	Jarošovice 829, 37501 Týn nad Vltavou	Bioplynové stanice	2,3	CATW, FORMF	BIOGP	21.06.2023
VI	CZ 53711423	Bioplynová stanice Pardubice, areál BČOV	Stará Obec 313, 53354 Rybitví	Bioplynové stanice	2,3	MANU, CATW, BIOG, BIOR, FORMF, CSSM	BIOGP	04.08.2016
VI	CZ 62712020	Pilotní zařízení anaerobní fermentace organického odpadu Brno-Tuřany	Brno 18, Černovice, 61800 Brno 18	Bioplynové stanice	3	BIOR, CATW, BIOG	BIOGP	12.02.2008
VI	CZ 21715130	Anaerobic Power Biogas Benešov spol. s r.o.	ADOS-areál skládky TKO	Bioplynové stanice	2,3	CATW, MANU	BIOGP	24.03.2014
VI	CZ 62712929	EFG Vyškov BPS s.r.o.	Olomoucká, 68201 Vyškov	Bioplynové stanice	2,3	FORMF, CATW, BIOG, BIOR, MANU	BIOGP	26.02.2014
VI	CZ 71710994	EFG Rapotín BPS s.r.o.	Jesenická 812, 78814 Rapotín	Bioplynové stanice	2,3	BIOG, CATW, FORMF, CSSM, BIOR	BIOGP	21.02.2022
VI	CZ 81720301	Ogranic technology s.r.o.	Na Františku, 73535 Horní Suchá	Bioplynové stanice	3	EGG, MIMC, CATW		15.11.2022
VI	CZ 21320	BIOPLYN ENERGY s.r.o.	Podhoří 400/38, Všebořice, 40010 Ústí nad Labem	Bioplynové stanice	2,3	CATW, BIOG, MANU	BIOGP	17.12.2013

2.1.3 Kategorie materiálů vedlejších produktů živočišného původu

Gastroodpad spadá do materiálů kategorie III, které jsou vyjmenovány v článku 10 v nařízení Evropského parlamentu a Rady (ES) č. 1069/2009 [17]. V tomto článku se nacházejí 2 důležité definice, jsou to:

„f) produkty živočišného původu nebo potraviny obsahující produkty živočišného původu, které z obchodních důvodů nebo z důvodu problémů způsobených výrobními vadami, vadami balení

nebo jinými závadami, z nichž nevzniká žádné riziko pro zdraví lidí ani zvířat, již nejsou určeny k lidské spotřebě

a

p) odpady ze stravovacích zařízení, kromě odpadů uvedených v čl. 8 písm. f)“ [17].

Pro úplnost je vhodné uvést výjimku z článku 8 písmene f, která zní:

„f) odpad ze stravovacích zařízení vzniklý v dopravních prostředcích mezinárodní přepravy“ [17].

Tato výjimka spadá do vedlejších živočišných produktů kategorie I.

2.2 Vznik potravinového odpadu a gastroodpadu

Gastroodpad je běžně používané označení pro kategorii „Biologicky rozložitelný odpad z kuchyní a stravoven“ s kódem 20 01 08. Vyhláška č. 273/2021 Sb. [14] zvláště vyčleňuje „biologicky rozložitelný odpad z kuchyní a stravoven rostlinného původu“ s kódem 20 01 08 01. Jeho zpracování, na rozdíl od odpadu 20 01 08, nepodléhá souhlasu veterinární správy.

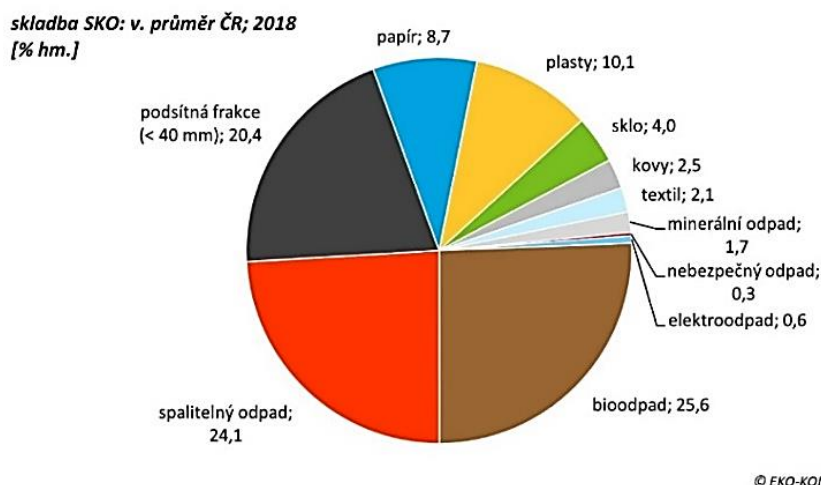
2.2.1 Množství vznikajícího potravinového odpadu a gastroodpadu

Podle Českého statistického úřadu [18] bylo celkové množství veškerého odpadu vyprodukovaného v roce 2020 na území ČR rovno 38 486 186 tunám odpadu, což odpovídá 3 597 kg veškerého odpadu na obyvatele. Na biologicky rozložitelný odpad z kuchyní a stravoven připadalo podle stejné statistiky 26 780 tun, tedy 0,07 % z veškerého odpadu.

Podle Ministerstva životního prostředí [19] bylo v ČR v roce 2021 vyprodukováno 5,9 milionů tun komunálního odpadu, což na jednoho občana odpovídá 562 kg. Celkem bylo v roce 2021 vyprodukováno 39,9 milionů tun veškerého odpadu (přibližně stejně jako v roce 2020). Porovnáním těchto dvou čísel lze získat podíl komunálního odpadu na celkové produkci odpadu v ČR pro rok 2021, což odpovídá 14,8 %.

Množství vznikajícího gastroodpadu v domácnostech

Podle společnosti EKO-KOM a jejího výzkumu z roku 2018 [20] odpovídala průměrná hmotnostní skladba smíšeného komunálního odpadu grafu na obrázku 13. Na bioodpad, jehož součástí je i gastroodpad, připadalo v tomto roce 25,6 % hmotnosti.



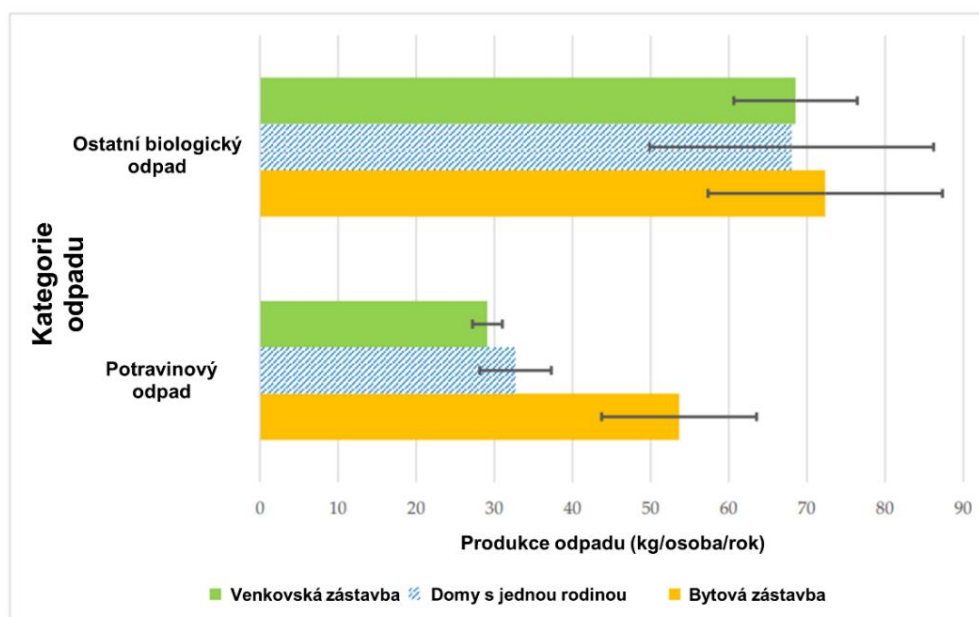
Obrázek 13 Průměrná hmotnostní skladba domovního směsného komunálního odpadu [20]

V říjnu roku 2021 publikovaly Kubíčková, Veselá a Kormaňáková studii [21], která sledovala složení komunálního odpadu u devíti set českých domácností (primárně pro zjištění zastoupení gastroodpadu). Kvůli rozdílným způsobům života a sezónním odchylkám byly během studie sledovány tři typy zástavby a rozbory byly prováděny čtvrtletně. Autorky zmiňují, že složení odpadu bylo částečně ovlivněno první a druhou vlnou pandemie Covidu 19.

Cílem studie bylo zjistit průměrné množství gastroodpadu, které vyprodukuje průměrný obyvatel Česka za rok, jak se mění podíl gastroodpadu v komunálním odpadu v průběhu roku, zdali typ zástavby ovlivňuje objem gastroodpadu a jaké jsou hlavní důvody, proč gastroodpad končí v komunálním odpadu. Autorky pojmem gastroodpad (angl. food waste) rozumějí pouze takový odpad, který je tvořen požitelným jídlem (tedy ne odřezky, slupkami, kostmi a dalšími nepoživatelnými částmi potravin).

Průměrné množství smíšeného komunálního odpadu, které autorky vypočítaly, vycházelo na 217,1 kg na osobu za rok. Z toho 49 % (105,9 kg) tvořil biologický odpad. V bytové zástavbě tvořila biologická složka pouze 45,3 % (99,33 kg), tedy méně než ve venkovské zástavbě a zástavbě rodinných domů. To bylo však způsobeno primárně značnou produkcí rostlinného odpadu (trávy, větvi, pilin...).

Po korekci o nepoživatelné součásti biologického odpadu studie dospěla k závěru, že největší podíl vyhozeného jídla byl na sídlištích, a to konkrétně 18,7 % (53,6 kg). V zástavbě rodinných domů to bylo 16,2 % (32,7 kg) a na venkově pouze 14,1 % (29,1 kg). Autorky však podotýkají, že rozdílná čísla pravděpodobně vycházejí z rozdílné možnosti využití potravinových zbytků (např. krmení, kompostování). Po zprůměrování hodnot na celkový vzorek devíti set domácností vychází na 37,4 kg potravinového odpadu na osobu za rok. Grafická podoba těchto dat je na obrázku 14.



Obrázek 14 Struktura biologického odpadu v kilogramech na osobu za rok [21], přeloženo

Autorky studie pro porovnání uvádějí hodnoty z Dánska, kde studie určila 42 kg potravinového odpadu na osobu za rok, tedy relativně podobnou hodnotu.

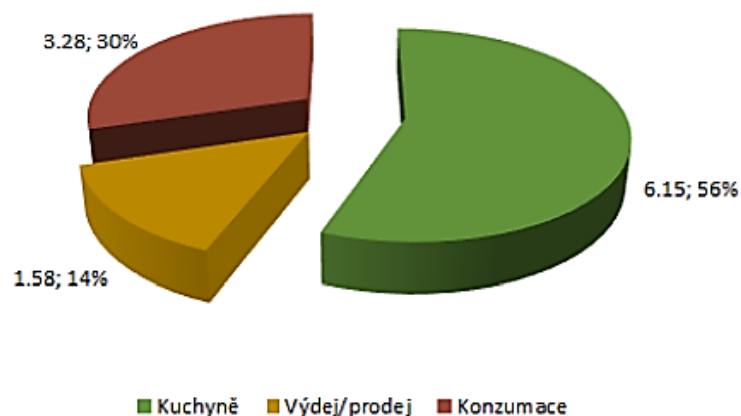
Množství vznikajícího gastroodpadu v jídelnách a restauracích

Spolek Skutečně zdravá škola uvádí na svých stránkách [22], že ročně ve školních jídelnách v České republice vzniká mezi 27 000 a 48 000 tunami gastroodpadu. Tento výpočet vychází z celkového množství uvařeného jídla ve školních jídelnách za jeden rok a z předpokladu, že 20 až 35 procent připraveného jídla končí ve zbytcích. Pomocí rozmanitých akcí a výzev se toto číslo snaží spolek výrazně snížit, nicméně i přesto jsou školní jídelny významným producentem gastroodpadu. I v případě, že by se dojídala všechna vydaná jídla a žádné další porce nezbyly, stále budou vznikat kuchyňské odpady z přípravy těchto pokrmů.

Spolek dále uvádí různé příklady škol, které přijaly výzvu na snížení produkce gastroodpadu. V jednom konkrétním případě se v roce 2018 školní jídelně při Základní škole Litvínov-Hamr podařilo snížit produkci gastroodpadu ze 64 kg za týden na 40 kg. Podle aktuálně dostupné výroční zprávy 2021-2022 [23] obsluhovala školní jídelna v této základní škole ke 31. října 2021 celkem 383 strážníků. Tyto údaje dohromady mohou poskytnout představu o přibližné produkci gastroodpadu v intervalu 0,10÷0,17 kg na strážníka za týden.

Dalších přibližně 27 000 tun jídla se ročně stane gastroodpadem v závodních jídelnách a restauracích rychlého občerstvení. S tímto číslem přišel výzkumný projekt RedPot (Redukce plýtvání potravinami ve veřejném stravování) [24]. Na výzkumu se podílelo Technologické centrum AV ČR, společnost Median, Ústav zemědělské ekonomiky a informací a spolek Zachraň jídlo. Výzkum probíhal ve dvanácti provozovnách třech různých řetězců, které podle odhadů

během 90denního měření (denních šetření v této době proběhlo 63) navštívilo 70 252 zákazníků. Připraveno pro ně za tu dobu bylo 37,4 tun pokrmů (25,7 tun bez nápojů).



Obrázek 15 Struktura vzniku potravinových ztrát a odpadu v šetřených provozovnách (kg/100 kg připravených pokrmů) [24]

Na obrázku 15 lze vidět graf vycházející ze souhrnných dat této studie, podle kterého v provozovnách rychlého občerstvení vzniká většina potravinového odpadu již při samotné přípravě jídla, a to konkrétně 6,15 kg na 100 kg připraveného jídla, což odpovídá 56% podílu z celkového množství potravinového odpadu. Na zbytky po konzumaci vychází podle studie 3,28 kg na 100 kg připraveného jídla (30 %) a na výdej (prodej) pak zbývá 1,58 kg na 100 kg připraveného jídla (14 %). Dohromady se tak vyprodukuje přibližně 0,11 kg gastroodpadu na 1 kg připravených pokrmů, tedy asi 11 %.

Při úvaze množství 25 700 kg připraveného jídla za devadesát dní a počtu 70 252 obslužených strážníků lze 11 % ztráty z připraveného jídla vydělit počtem obslužených strážníků, a získat tak číslo přibližně 0,04 kg zbytků na 1 strážníka (na 1 porci). Tento údaj je možné pro porovnání vynásobit počtem strážníků ve školní jídelně při ZŠ Litvínov-Hamr (383) a číslem 5, které představuje počet dní, kdy se běžně vaří ve školní jídelně. V tomto případě by vycházelo množství gastroodpadu přibližně na 77 kg na týden, což převyšuje skutečnou produkci gastroodpadu ve školní jídelně na ZŠ Litvínov-Hamr, která se pohybovala mezi 40 a 60 kg za týden, ale řádově si hodnoty odpovídají.

Množství vznikajícího potravinového odpadu v supermarketech

Svůj podíl na produkci potravinového odpadu mají i supermarketky. Ročně jde v Česku až o 11 000 tun potravin, kterým končí doba trvanlivosti nebo mají poškozený obal, a tak jsou vyřazeny z prodejních ploch supermarketů [25]. Část z nich může díky nové legislativě končit v potravinových bankách, nicméně v takovém případě se musí jednat o bezpečně konzumovatelné jídlo. Stále tak vzniká určité množství gastroodpadu, který není možné využít ke svému prvotnímu účelu.

2.2.2 Celková produkce potravinového odpadu v Česku

Srovnání poskytuje statistika podle MŽP a dat získaných z Informačního systému odpadového hospodářství [26], podle nichž bylo v roce 2020 vyprodukováno celkem 972 445 tun potravinových odpadů. Na jednoho obyvatele ČR tak podle MŽP vzniklo 90,7 kg potravinového odpadu za rok (69,4 kg z toho přímo v domácnostech, tedy téměř dvakrát větší množství, než udávají autorky předchozí studie). Podrobnější přehled čísel pro porovnání s předchozími daty poskytuje tabulka 4 shrnující produkci potravinových odpadů v ČR za rok 2020.

Tabulka 4 Produkce potravinových odpadů v ČR za rok 2020 [26]

Fáze potravinového řetězce	Produkce odpadů [t]
Prvovýroba	27 022
Zpracování a výroba	100 339
Maloobchodní prodej a jiné způsoby distribuce potravin	64 394
Restaurace a stravovací služby	37 941
Domácnosti	742 749
Celkem	972 445

2.3 Vlastnosti gastroodpadu

Pro analýzu dopadů využití gastroodpadu jako vstupního substrátu pro BPS je nutné znát jeho vlastnosti, proto jsou v této části popsány ty nejdůležitější z nich.

2.3.1 C:N poměr gastroodpadu

Jak již bylo zmíněno v přechozí kapitole, C:N poměr velmi záleží na konkrétním složení gastroodpadu. Je zřejmé, že gastroodpad skládající se pouze ze zbytků zeleniny může mít jiný C:N poměr než gastroodpad se zbytky masa. Web compostmagazine.com [27] uvádí pro C:N poměry následující hodnoty:

- kávová zrna C:N 20:1,
- zeleninový odpad C:N 11:1–13:1,
- potravinový odpad C:N 14:1–16:1.

Sayra a Sánchez [28] oproti tomu vycházejí z hodnot:

- kuchyňský odpad C:N 26:1–30:1,
- potravinový odpad C:N 2:1–18:1,
- zeleninový odpad C:N 21:1–36:1.

Salangsang a kol. [29] uvádí, že se C:N poměr gastroodpadu pohybuje v rozmezí od 3:1 až k 54,9:1.

2.3.2 Cena gastroodpadu

Jedna z nejzajímavějších vlastností gastroodpadu je jeho cena. Ačkoliv je z pohledu provozovatelů bioplynových stanic považován za surovinu, z pohledu legislativy je to stále odpad (případně vedlejší živočišný produkt) a je nutné s ním podle toho nakládat. Gastroodpad se tak zpravidla nevykupuje, ale naopak je nutné za jeho odvoz (likvidaci) platit stejně jako v případě jiných druhů odpadu. Známou výjimkou, kdy se odpad považuje spíše za surovinu, jsou například kovy. U těch se často platí jejich producentům, nikoli za jejich likvidaci.

Cena za svoz a likvidaci gastroodpadu

Pro ukázkou konkrétních nákladů je možné uvést ceník společnosti Marius Pedersen a.s., Provozovna Teplice na svoz gastroodpadu [30] platný od 1. 7. 2022. V tomto ceníku jsou uvedeny kromě cen, které je možné vidět na obrázku 16, také podmínky svozu. Firma pro svoz poskytuje vlastní speciální nádoby, které zabraňují šíření zápachu vznikajícího rozkladem gastroodpadu. Nádoby se nabízejí ve dvou objemech (30 a 60 l), protože je však podle podmínek možné tyto nádoby plnit pouze do $\frac{3}{4}$ jejich objemu, skutečný objem sváženého gastroodpadu tak odpovídá spíše 22,5 a 45 litrům. Vzhledem k účtování svozu za kus toto omezení výrazně ovlivňuje cenu odvozu gastroodpadu na 1 litr. Ceny se uvádějí bez DPH. V ceně svozu je zahrnuta hygienická sanitace nádob po jejich odvozu. Podle podmínek v ceníku je nejdelší možná doba uskladnění gastroodpadu v nádobách za běžných podmínek dva dny.

Jako ukázkový příklad lze uvažovat malou restauraci, která vaří pouze ve všední dny a padesát týdnů v roce. Produkci gastroodpadu má menší než 22,5 litru za dva dny a svoz kvůli požadavkům na uskladnění potřebuje dvakrát týdně. Za rok tato restaurace vyprodukuje při dodržení pravidel a frekvence svozu maximálně 2 250 litrů gastroodpadu a za odvoz zaplatí 20 500 Kč bez DPH. Při přepočtení na 1 litr gastroodpadu odpovídá cena za svoz 9,11 Kč bez DPH.

Odvoz odpadu 20 01 08

Kód odpadu	Název odpadu	Způsob uskladnění
200108	Biologicky rozložitelný odpad z kuchyní a stravoven	Sběrné nádoby o objemu 30l a 60l

Objem nádoby	Typ svozu	Cena za 1 vývoz 1ks** bez DPH
30 l	1 x týdně*	205,-
	2 x týdně	
	3 x týdně	
60 l	1 x týdně*	225,-
	2 x týdně	
	3 x týdně	

* tuto četnost lze využít pouze při skladování odpadu v chlazeném skladu

Cena za samotnou likvidaci gastroodpadu

V případě, že si odvoz gastroodpadu zajišťuje sám producent, bývá běžně cena za likvidaci nižší. Společnost Anaerobic Power Biogas Benešov spol. s r.o. uvádí ve svém ceníku [31] za likvidaci odpadu částky, za které likviduje odpady pomocí anaerobní fermentace v bioplynové stanici. Za gastroodpad vedený pod kategorií 20 01 08 (biologicky rozložitelný odpad z kuchyní a stravoven) si firma účtuje 1000 Kč za tunu bez DPH.

Pro přibližný srovnávací výpočet lze uvažovat hustotu gastroodpadu jako $1\ 000\ \text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$. V tom případě odpovídá 2 250 litrů gastroodpadu z malé restaurace z předchozího příkladu 2 250 kg. Bez započítání nákladů na skladování a odvoz by za likvidaci takového množství gastroodpadu bylo zapláceno 2 250 Kč, tedy 9,11x méně než v případě služby i s odvozem z předchozího příkladu.

2.3.3 Výnos bioplynu z gastroodpadu

Stejně jako není možné jedním číslem definovat C:N poměr gastroodpadu, liší se výnos v závislosti na autorech, na použité metodě vyhodnocení a na konkrétním složení vstupního substrátu i hodnoty měrného výnosu bioplynu z gastroodpadu.

Kromě toho také autoři uvádějí výnos bioplynu pomocí různých jednotek. Jako příklady používaných jednotek lze uvést $\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$ organické sušiny, $1\cdot\text{kg}^{-1}$ sušiny nebo $1\cdot\text{kg}^{-1}$ sušiny určenou ze ztráty žíháním. V prvních dvou případech jde o výnos bioplynu s neznámou koncentrací metanu, ve třetím případě jde o výnos metanu. Zároveň u dat nebývá uvedeno, pro jaké tlakové a teplotní podmínky daný objem platí, což může mít zásadní vliv na interpretaci takovýchto hodnot.

Pro přehlednost jsou vlastnosti potravinových odpadů z různých zdrojů vztaženy na objem v metrech krychlových na hmotnost v kilogramech celkové sušiny nebo organické sušiny. Konkrétní hodnoty jsou vedeny v tabulkách 5,6 a 7.

Tabulka 5 Vlastnosti odpadů podle publikace *Biogas from Waste and Renewable Resources* [9]

Druh substrátu	Obsah sušiny (% hm.)	Obsah org. sušiny v sušině (% hm.)	Spec. produkce bioplynu ($\text{m}^3\cdot\text{kgos}^{-1}$)
Bioodpad	40–75	30–70	0,3–1,0
Přebytky a prošlé potraviny	14–18	81–97	0,2–0,5
Suchý chléb	65–90	96–98	0,7–1,2
Zbytky kuchyní stravoven	9–37	75–98	0,4–1,0

Tabulka 6 Vlastnosti odpadů podle publikace Bioplyn [7]

Druh substrátu	Měrný výtěžek CH ₄ (m ³ ·kgos ⁻¹)
Bramborové slupky	0,55
Kuchyňský odpad	0,5-0,6
Ovocná drť	0,4
Zeleninový odpad	0,4

Tabulka 7 Vlastnosti odpadů podle článku Biogas Potential of Coffee Processing Waste in Ethiopia [32]

Druh substrátu	Měrný výtěžek CH ₄ (m ³ ·kgcs ⁻¹)
Biodpad	0,2-0,6
Bramborové slupky	0,25-0,4
Kuchyňský odpad	0,35-0,6
Zeleninový odpad	0,4

2.3.4 Hustota gastroodpadu

Pro určování objemového toku gastroodpadu je třeba znát jeho hustotu. Shin a Youn [33] zkoumali gastroodpad z jídelny a jeho objemovou hustotu určili jako $\rho = (892,5 \pm 22,5) \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

Faucette, Das a Risse [34] pracovali se směsí gastroodpadů z přípravy jídel a ze zbytků pokrmů. Tato směs byla ještě v kantýně rozdrčena a při tomto procesu ztratila 10÷20 % vody. Objemová hustota gastroodpadu byla poté určena jako $\rho = 760 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

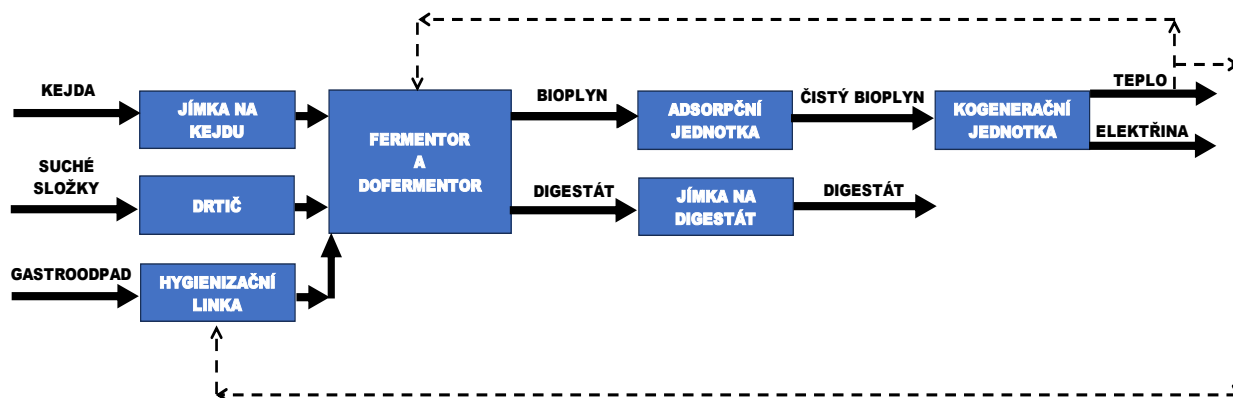
Na základě dat z předchozích odstavců lze říci, že hustota gastroodpadu je nižší než hustota vody. Čím více vody obsahuje gastroodpad, tím více se jeho hustota blíží vodě. Zároveň je nutné uvážit, že předúprava gastroodpadu (jako je mletí nebo drcení) mohou zvýšit jeho hustotu.

3 Analýza využití gastroodpadu v bioplynové stanici

Na základě dat a informací z přechozích dvou kapitol představujících teoretickou část práce je v této kapitole provedena praktická analýza možností využití gastroodpadu v bioplynové stanici. Nejdříve je popsána obecná bioplynová stanice, následně je vytvořen bilanční model vyhodnocující vliv využití gastroodpadu na energetickou a hmotnostní bilanci. Pomocí tohoto modelu je předveden konkrétní dopad využití gastroodpadu pro BPS Chotýčany.

3.1 Zařízení obecné bioplynové stanice

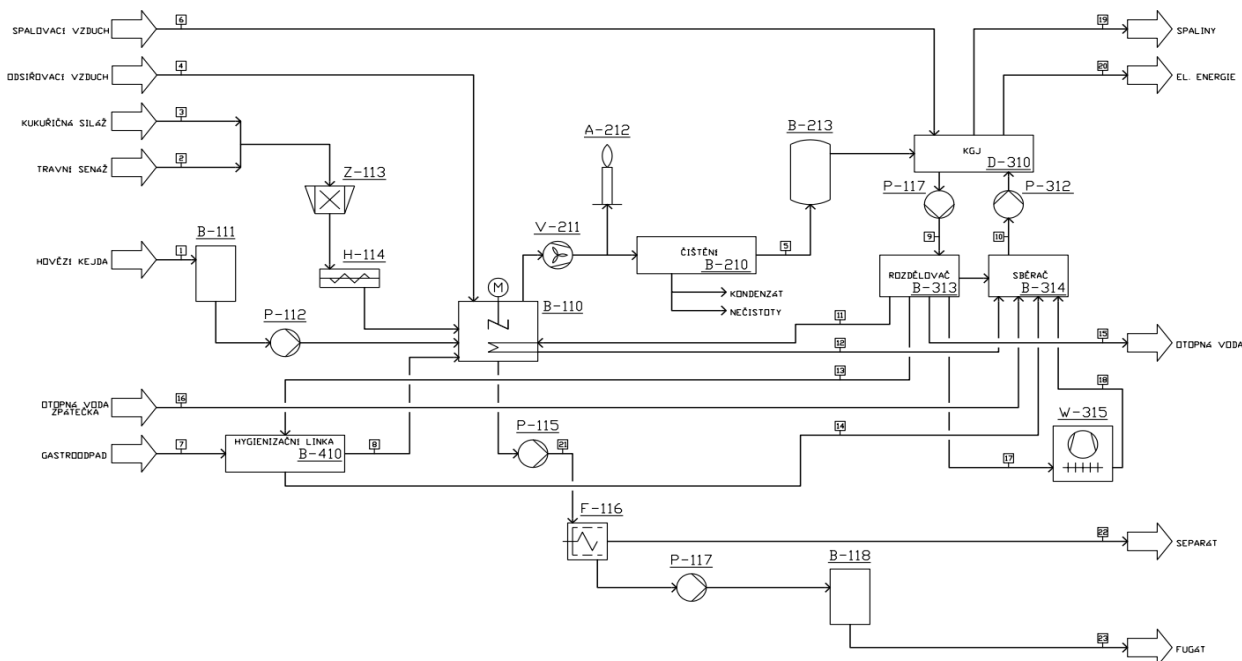
Tato podkapitola vychází z blokového schématu na obrázku 17, na kterém je BPS Chotýčany rozšířena o hygienizační linku zpracovávající gastroodpad.



Obrázek 17 Zjednodušené schéma BPS Chotýčany s hygienizační linkou

PFD schéma (z anglického process flow diagram) na obrázku 18 zobrazuje zařízení obecné BPS a je vytvořeno na základě kombinace informací získaných z rešerše v teoretické části a fyzické prohlídky BPS Chotýčany. Hlavním zařízením je fermentor B-110, ve kterém se odehrává vyhnívací proces dodávaného substrátu, při kterém vzniká bioplyn. Tekuté vstupní substráty jsou do fermentoru přiváděny čerpadlem P-112 z jímky B-111, zatímco suché vstupní substráty jsou po rozdrcení v drtiči Z-113 dopravovány do fermentoru šnekovým dopravníkem H-114.

Bioplyn je následně přečištěn a zbaven vlhkosti (např. v adsorpční koloně a zchlazováním). Poté je spalován v kogenerační jednotce D-310, která vyrábí teplo a elektrickou energii. Proudění otopné vody z kogenerační jednotky zajišťuje systém čerpadel s rozdělovačem B-313 a sběračem B-314. Zpracování digestátu záleží na konkrétní BPS, v tomto případě je uvažována separace pomocí šnekového separátoru F-116. Toto schéma tvoří přílohu 1. Blok označený B-410 představuje hygienizační linku na gastroodpad, kterou je možné přidat do již fungující BPS a která je popsána v další části a tvoří přílohu 2.

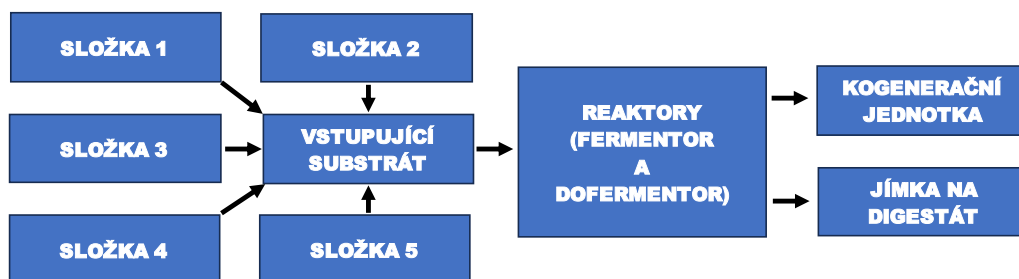


Obrázek 18 PFD schéma obecné BPS

A-212 Nouzová fléra, B-110 fermentor, B-111 jímka na hovězí kejdu, B-118 jímka na fugát, B-320 čistící zařízení, B-213 zásobník bioplynu, B-313 rozdělovač otopné vody, B-314 sběrač otopné vody, B-410 hygienizační linka, D-310 kogenerační jednotka, F-116 šnekový separátor, H-114 šnekový dopravník, P-112 čerpadlo na hovězí kejdu, P-115 čerpadlo pro odvod digestátu, P-117 čerpadlo pro odvod fugátu, P-311 čerpadlo pro rozdělovač, P-312 čerpadlo pro sběrač, V-211 dmýchadlo pro odvod bioplynu, W-315 nouzový chladič, Z-113 příjmový drtič na suchou složku

3.2 Hmotnostní a energetická bilance bioplynové stanice

Pro zhodnocení vlivu zařazení gastroodpadu do zpracovávaných surovin v již fungující BPS je třeba udělat celou řadu výpočtů a porovnání. Za tímto účelem byl vytvořen parametrický bilanční model odpovídající schématu na obrázku 19, dle kterého lze po zadání parametrů z fungující BPS a literatury spočítat vliv gastroodpadu na produkci bioplynu, tepla a elektrické energie či výkonu. Vzhledem k tomu, že jde o parametrický model biologických procesů vytvořený na základě teoretické rešerše převážně empirických dat, nelze očekávat jeho stoprocentní přesnost. Tento model slouží pro orientační výpočet, který lze použít pro většinu již fungujících BPS v Česku. Hodnoty použité v podkapitole 3.2 vycházejí z dat určených pro BPS Chotýčany.



Obrázek 19 Schéma bilančního modelu BPS

Bilanční model vychází z následujících předpokladů:

- fermentační proces probíhá stálou rychlostí při teplotě 35 °C a pH 7,5,
- složení bioplynu je neměnné (51 % obj. tvoří metan a 49 % obj. tvoří oxid uhličitý),
- pro uvažované plyny platí model ideálního plynu,
- složení, vlastnosti, dávkování a poměry substrátů jsou neměnné,
- dávkování odpovídá objemu vyhnívacího procesu,
- fermentory jsou ideálně promíchávané,
- platí zákon zachování hmoty,
- k tepelným ztrátám dochází pouze ve fermentoru (určených specifickým ztrátovým tepelným výkonem v závislosti na objemu fermentoru).

V tabulce 8 lze vidět vstupní parametry jedné složky (v tomto případě jde o kukuřičnou siláž), se kterou bilanční model počítá. Kromě vlastností vstupního substrátu je možné doplnit i periodu doplňování tohoto substrátu, pomocí které se dopočte odpovídající kapacita zásobníku na příslušnou složku. Pro tento bilanční model platí obecné pravidlo – zelená pole je třeba doplnit, protože jsou to nezávisle proměnné, zatímco bílá pole jsou dopočítávána modelem. Světle ořáznová pole jsou slovním hodnocením určitého parametru.

Tabulka 8 Vstup složky 1 do bilance BPS

Složka 1: Kukuřičná siláž		
Vstupní tok složky 1	\dot{m}_1 (kg/h)	1422
Podíl sušiny (z celku) složky 1	c_{1CS}^m (hm. %)	33%
Podíl organické sušiny (z celku) složky 1	c_{1OS}^m (hm. %)	31%
Hustota složky 1	ρ_1 (kg/m ³)	650
CN poměr složky 1	(C:N) ₁ (-)	50
Specifická produkce BP složky 1	Y_1 (Nm ³ /t _{OS})	600
Kapalná složka složky 1	\dot{m}_{1K} (kg/h)	952,5
Tuhá složka složky 1	\dot{m}_{1T} (kg/h)	469,1
Organická tuhá složka složky 1	\dot{m}_{1O} (kg/h)	440,7
Objemový průtok složky 1	\dot{V}_1 (m ³ /h)	2,2
Perioda doplňování zásobníku složky 1	T_1 (h)	24
Odpovídající kapacita zásobníku složky 1	V_1 (m ³)	52,5

Po doplnění zelených polí u vstupních složek model vypočte za pomoci bilančních rovnic (3.1) a (3.2) celkový hmotnostní tok vstupujícího substrátu \dot{m}_S (kg·h⁻¹) a podíl celkové sušiny vstupujícího substrátu c_{SCS}^m (hm. %).

$$\dot{m}_1 + \dot{m}_2 + \dots = \dot{m}_S \quad (3.1)$$

a

$$c_{1C}^m \dot{m}_1 + c_{2C}^m \dot{m}_2 + \dots = c_{SCS}^m \dot{m}_S \quad (3.2)$$

Obdobné bilanční rovnice jsou použity i pro C:N poměr a specifickou produkci bioplynu. Ukázka takto vypočtených hodnot je v tabulce 9. Model zároveň zhodnotí velikost C:N poměru, jehož hodnoty by se podle teoretické části měly pohybovat v určitých mezích (v tomto modelu jsou nastaveny hranice na „velmi nízký“ pro hodnoty <10, „nižší“ pro hodnoty 10÷20, „optimální“ pro hodnoty 20÷30, „vyšší“ pro hodnoty 30÷50 a „velmi vysoký“ pro hodnoty >50). Zde spadá C:N poměr s hodnotou 44 do kategorie „vyšší“, což je také zobrazeno v hodnotícím poli.

Tabulka 9 Souhrn všech vstupujících složek do bilance BPS

Vstupující substrát		
Celkový vstupní tok do fermentoru	\dot{m}_s (kg/hod)	2122
Podíl sušiny (z celku) v substrátu	c_{scs}^m (hm %)	26%
Podíl organické sušiny (z celku) v substrátu	c_{sos}^m (hm %)	25%
Hustota substrátu	ρ_s (kg/m ³)	900
C:N poměr substrátu	$(C:N)_s$ (-)	44
Hodnocení C:N poměru substrátu	-	Vyšší
Specifická produkce BP substrátu	Y_s (Nm ³ /t _s)	582,6
Kapalná složka substrátu	\dot{m}_{sk} (kg/h)	1560,0
Tuhá složka substrátu	\dot{m}_{st} (kg/h)	561,6
Organická tuhá složka substrátu	\dot{m}_{so} (kg/h)	524,2
Objemový průtok substrátu	\dot{V}_s (m ³ /h)	2,4

Vstupujícím substrátem je myšlena směs jednotlivých vstupních složek do reaktoru (bioreaktoru), označovaného také jako fermentor, který může být rozdělen na dvě části – fermentor a dofermentor. Z bilance vstupního substrátu a jeho vlastností vycházejí další výpočty, jejichž příklad je v tabulce 10. Model počítá výnos bioplynu dvěma způsoby. V prvním případě pomocí předpokládané účinnosti rozkladu organické sušiny a její přeměny na bioplyn. Ve druhém případě pomocí směšovací rovnice vyjádřené pro hmotnosti a příslušný příspěvek složky na celkové specifické produkci bioplynu. Pro porovnání model dopočítává relativní rozdíl v těchto dvou výpočtech.

Bioplyn je uvažován jako směs metanu a oxidu uhličitého a jako výpočtový model je používán model ideálního plynu, jak jej používá například Dufek [35]. V celém procesu jsou tlaky blízké atmosférickému tlaku, a tak lze model ideálního plynu použít bez očekávání velké chyby. Produkce bioplynu je přepočítána na normální objemové toky pro teplotu 0 °C a tlak 101,325 kPa. Z této rovnice:

$$pV = nRT, \quad (3.3)$$

lze patřičnými úpravami dosáhnout tvaru pro výpočet objemového toku vznikajícího plynu jako:

$$\dot{V} = \frac{\dot{m}}{Mp} RT, \quad (3.4)$$

kde M ($\text{kg}\cdot\text{kmol}^{-1}$) představuje molární hmotnost bioplynu, tedy směsi CO_2 a CH_4 o příslušných koncentracích a R ($8,314 \text{ kJ}\cdot\text{kmol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) univerzální plynovou konstantu.

Model dokáže spočítat ztrátový tepelný výkon fermentoru, který je třeba dodávat pro udržení dané teploty a množství otopné vody, která dodání takového tepla dokáže zajistit. Model dále umí vyhodnotit očekávaný podíl sušiny ve fermentoru. Tento výpočet funguje na principu úbytku organické sušiny a její přeměně na bioplyn, což má za následek snížení procentuálního obsahu sušiny ve směsi ve fermentoru. Je-li tento podíl sušiny v intervalu 8÷12 %, je hodnocen jako „optimální“ a pokud ne, je hodnocen jako „nízký“ nebo „vysoký“ v závislosti na hodnotě.

Tabulka 10 Bilance reaktoru v BPS

Reaktory (fermentor a dofermentor)		
Předpokládaná účinnost rozkladu	η_{BP} (-)	80%
Hmotnostní průtok bioplynu	\dot{m}_{BP} (kg/h)	397,92
Podíl sušiny (z celku) ve fermentoru	c_{FC}^m (hm %)	8,26%
Hodnocení podílu sušiny (z celku) ve fermentoru	-	Optimální
Podíl CH_4 v bioplynu	$c_{\text{CH}_4}^V$ (obj. %)	51,00%
Podíl CO_2 v bioplynu	$c_{\text{CO}_2}^V$ (obj. %)	49,00%
Molární hmotnost CH_4	M_{CH_4} (kg/kmol)	16,04
Molární hmotnost CO_2	M_{CO_2} (kg/kmol)	44,01
Molární hmotnost bioplynu	M_{BP} (kg/kmol)	29,75
Hustota bioplynu	ρ_{BP} (kg/Nm ³)	1,33
Produkce bioplynu podle účinnosti rozkladu	\dot{V}_{BP} (Nm ³ /h)	299,83
Produkce bioplynu podle specifické produkce	\dot{V}_{BP} (Nm ³ /h)	310,11
Rozdíl ve výpočtech produkce bioplynu	Δ_{BP} (%)	3,32%
Objem reaktoru (fermentor + dofermentor)	V_F (m ³)	4323
Celkové hmotnostní organické zatížení reaktoru	B (kg _{OS} /m ³ d)	2,76
Hmotnostní průtok digestátu	\dot{m}_D (kg/h)	1637,24
Kapalná složka digestátu	\dot{m}_{DK} (kg/h)	1502,061229
Tuhá složka digestátu	\dot{m}_{DT} (kg/h)	135,18
Hustota digestátu		1000
Doba zdržení ve fermentoru a dofermentor	t_F (d)	110,017143
Produkce CH_4	\dot{V}_{CH_4} (Nm ³ /h)	152,91
Produkce CO_2	\dot{V}_{CO_2} (Nm ³ /h)	146,92
Specifický ztrátový tepelný výkon	e_{FREP} (W/m ³)	12,50
Ztrátový výkon	\dot{Q}_{FREP} (W)	54037,50
Potřebné množství teplé vody z KGJ	\dot{m}_{HW} (kg/h)	2315,89
Teplota vody přiváděné do fermentoru	t_{Fin} (°C)	80,00
Teplota vody odváděné z fermentoru	t_{Fout} (°C)	60,00

Sekce bilančního modelu pro kogenerační jednotku dopočítává tepelný a elektrický výkon kogenerační jednotky, a to pomocí účinností přeměn uvolněné energie spalováním bioplynu. Tyto účinnosti jsou udávány výrobcem kogenerační jednotky použité v dané BPS. Po zvolení roční provozní doby model dopočítá zpracovaná množství jednotlivých složek, celkové množství zpracovaného substrátu a také vyrobeného tepla a elektřiny.

Kromě energie, která z fermentoru odchází v podobě bioplynu, z něj odchází také digestát. Pokud prochází běžně užívaným šnekovým separátorem, jsou po zadání dosažitelného podílu sušiny ve

fermentačním zbytku dopočteny hmotnostní toky separátu (tuhý zbytek) a fugátu (kapalný zbytek). Všechny výsledky těchto výpočtů lze vidět v tabulce 11.

Tabulka 11 Bilance KGJ a digestátu v BPS

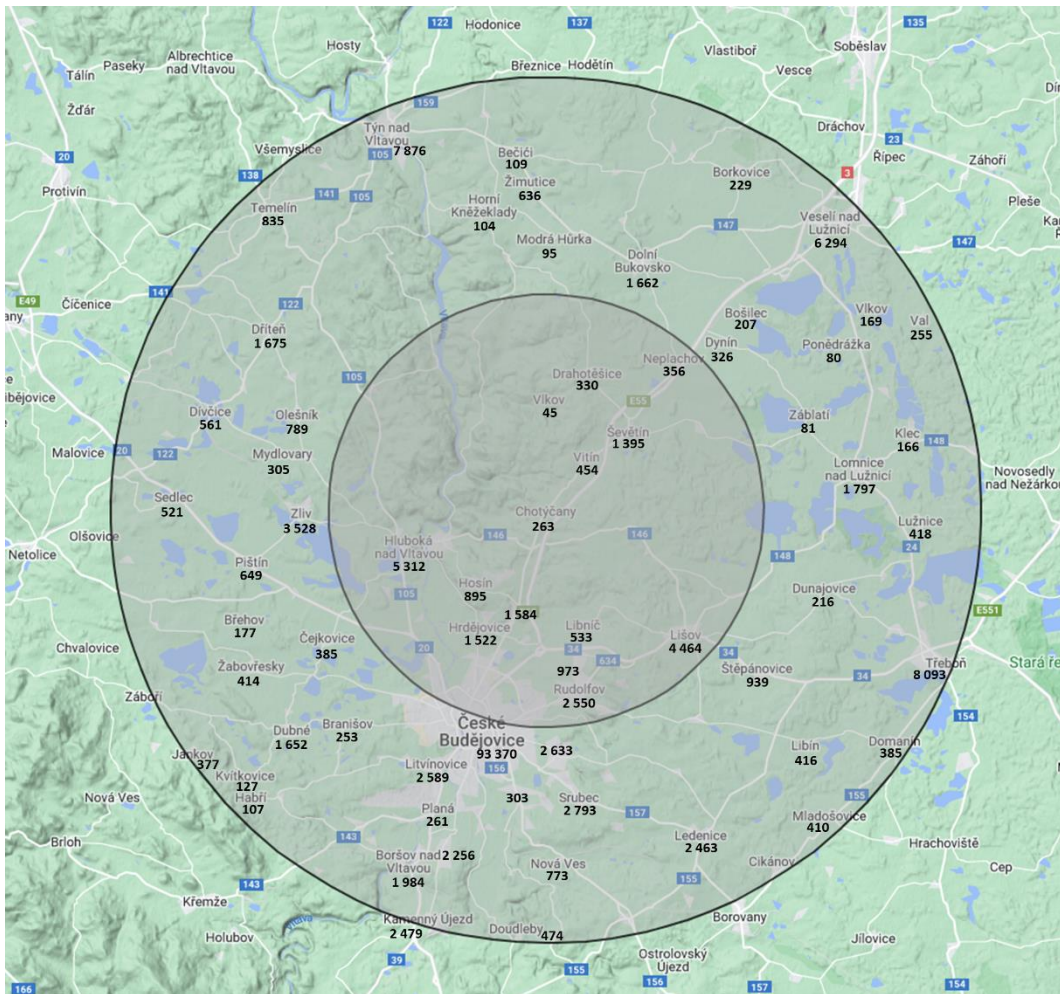
Kogenerační jednotka		
Účinnost přeměny na elektrickou energii	η_E (-)	40,4%
Účinnost přeměny na tepelnou energii	η_H (-)	42,9%
Výhřevnost metanu	Q_{CH_4} (kJ/mol)	802,6
Výhřevnost metanu v kWh/Nm ³	Q_{CH_4} (kWh/Nm ³)	9,95
Výhřevnost bioplynu v kWh/Nm ³	Q_{BP} (kWh/Nm ³)	5,08
Výhřevnost bioplynu v kWh/m ³ (pro 15 °C)	$Q_{BP15^\circ C}$ (kWh/m ³)	4,81
Celková produkce metanu	V_{CH_4} (Nm ³)	1369821
Celková produkce bioplynu	V_{BP} (Nm ³)	2685924
Elektrický výkon KGJ	E (kW _E)	648,0
Tepelný výkon KGJ	H (kW _H)	688,1
Výkon fléry při poruše KGJ	H_{flera} (kW _H)	1604,0
Podíl vlastní spotřeby tepla v reaktoru	s_{Htep} (%)	7,9%
Počet provozních hodin ročně	t_{PROV} (h)	8500
Zpracované množství složky 1	m_1 (tuny/rok)	12084
Zpracované množství složky 2	m_2 (tuny/rok)	1700
Zpracované množství složky 3	m_3 (tuny/rok)	4250
Zpracované množství složky 4	m_4 (tuny/rok)	0
Zpracované množství složky 5	m_5 (tuny/rok)	0
Celkové zpracované množství surovin	m_{rok} (tuny/rok)	18034
Celkové množství vyrobené elektřiny	E_{annum} (MWh _E)	5508
Celkové množství vyrobeného tepla	H_{annum} (MWh _H)	5849
Nádrže na digestát/separátor		
Objem nádrže pro digestát na 6 měsíců	V_{dig6M} (m ³)	7354
Dosažitelný podíl sušiny ve fermentačním zbytku	c_{digCS}^m (hm %)	45,0%
Hmotnostní tok fugátu	\dot{m}_{FUG} (kg/h)	1386
Hmotnostní tok fermentačního zbytku	\dot{m}_{FZB} (kg/h)	316

3.3 Vliv zpracování gastroodpadu v BPS Chotýčany

Model popisovaný v podkapitole 3.2 byl aplikován na BPS Chotýčany před zařazením gastroodpadu do vstupního substrátu. Aby bylo možné zjistit vliv gastroodpadu na chod BPS, je nutné definovat, k jakému množství gastroodpadu bude změna stahována. K určení tohoto množství je možné přistupovat vícero způsoby. Jedním z nich je nejprve vytyčit oblast, ze které by se gastroodpad svážel, a poté podle počtu obyvatel v této oblasti odhadnout potenciální množství vznikajícího gastroodpadu. Za tímto účelem byly určeny dvě oblasti ve tvaru kruhu s poloměrem 10 a 20 km se středem v obci Chotýčany. Do takto vzniklých oblastí byly zapsány počty osob s trvalým pobytem získaných ve statistice Českého statistického úřadu [36].

Z takto vzniklého obrázku 20 je patrné, že ve vnitřním kruhu s poloměrem 10 kilometrů žije s trvalým pobytem přibližně 20 000 obyvatel, zatímco v oblasti mezikruží o poloměrech 10 a 20

kilometrů přibližně 160 000 obyvatel. Velkou roli hraje to, do jaké oblasti jsou zahrnuty České Budějovice, protože leží na hranici těchto dvou oblastí.



Obrázek 20 Počet trvalých obyvatel v okolí BPS Chotýčany – data dle [36] a mapa [37]

Při úvaze průměrné produkce gastroodpadu 37,4 kg na obyvatele na rok (podle studie [21]) popisované v podkapitole 2.2.1) lze získat potenciální množství gastroodpadu pro vnitřní kruh se 20 000 obyvateli jako 748 000 kg ročně a pro oblast mezikruží se 160 000 obyvateli jako 5 984 000 kg ročně. Vydělením těchto čísel předpokládanou roční provozní dobou 8 500 hodin lze získat pro vnitřní kruh hodnotu 88 kg za hodinu, pro mezikruží 704 kg za hodinu, a dohromady pak 792 kg za hodinu. Jako výchozí hodnota pro následující výpočty bude uvažována hodnota 100 kg gastroodpadu za hodinu, jejíž množství by mělo pokrýt již přibližně 10 % celkového potenciálního množství gastroodpadu v domácnostech. Dalším možným zdrojem gastroodpadu jsou restaurace, školní jídelny atd., tudíž dosáhnout této hodnoty by mělo být reálné.

Při porovnání bilance bez zpracovávání gastroodpadu (příloha 3) a bilance se zpracováváním gastroodpadu (příloha 4) bylo nastaveno vstupující množství ostatních substrátů dle rozmezí podle popisu BPS Chotýčany v podkapitole 1.3.1 tak, aby bylo dosaženo elektrického výkonu 648 kW.

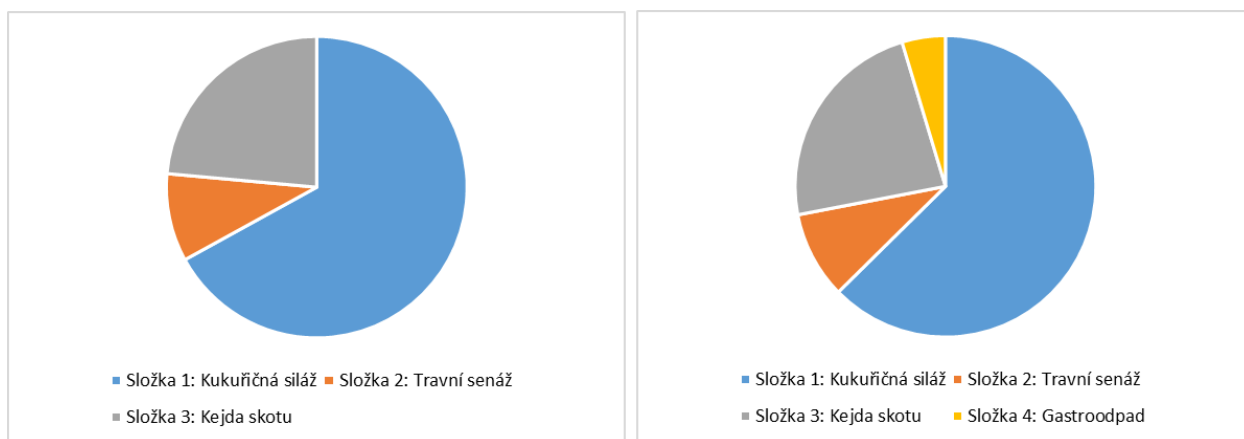
V bilanci se zpracováním gastroodpadu bylo po zadání $100 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$ gastroodpadu pomocí hledače řešení v programu Excel nalezeno odpovídající množství kukuřičné siláže tak, aby byl elektrický výkon udržen na stejné hodnotě jako bez použití gastroodpadu.

Při takto nastavených hodnotách z bilance vychází, že použití $100 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$ gastroodpadu ušetří při zachování elektrického výkonu BPS Chotýčany přibližně $81 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$ kukuřičné siláže, což lze určit z rozdílu hodnot v tabulkách 12 a 8. Tato hodnota závisí nejen na specifickém výnosu bioplynu z organické sušiny, ale i na jejím obsahu v gastroodpadu, která je v tomto případě nižší.

Tabulka 12 Vstup složky 1 do bilance BPS po zařazení $100 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$ gastroodpadu do bilance

Složka 1: Kukuřičná siláž		
Vstupní tok složky 1	\dot{m}_1 (kg/h)	1341
Podíl sušiny (z celku) složky 1	c_{1CS}^m (hm. %)	33%
Podíl organické sušiny (z celku) složky 1	c_{1OS}^m (hm. %)	31%
Hustota složky 1	ρ_1 (kg/m ³)	650
CN poměr složky 1	(C:N) ₁ (-)	50
Specifická produkce BP složky 1	Y_1 (Nm ³ /t _{OS})	600
Kapalná složka složky 1	\dot{m}_{1K} (kg/h)	898,5
Tuhá složka složky 1	\dot{m}_{1T} (kg/h)	442,5
Organická tuhá složka složky 1	\dot{m}_{1O} (kg/h)	415,7
Objemový průtok složky 1	\dot{V}_1 (m ³ /h)	2,1
Perioda doplňování zásobníku složky 1	T_1 (h)	24
Odpovídající kapacita zásobníku složky 1	V_1 (m ³)	49,5

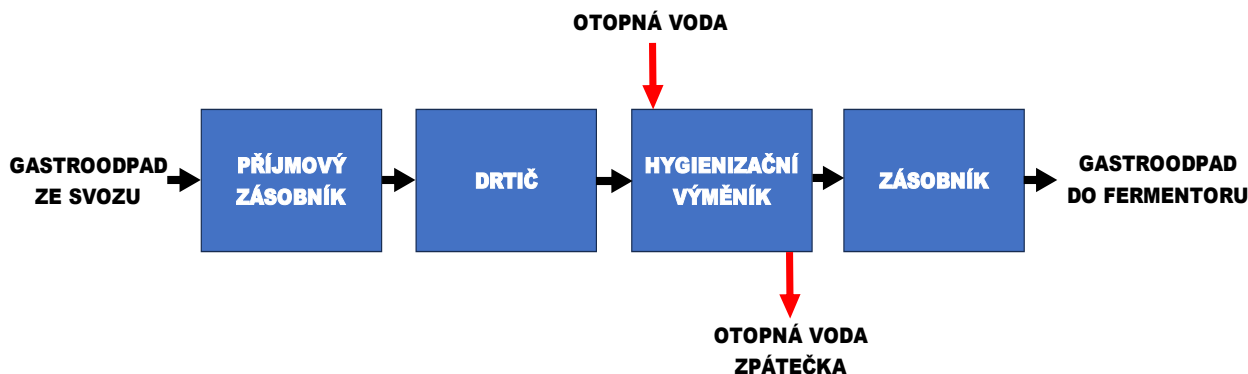
Vliv zařazení gastroodpadu mezi vstupní substráty na hmotnostní podíly je patrný z grafů na obrázku 21.



Obrázek 21 Srovnání podílů složek ve vstupním substrátu

4 Návrh linky na hygienizaci gastroodpadu

Při návrhu linky na hygienizaci gastroodpadu v této kapitole jsou respektovány legislativní požadavky popisované v podkapitole 2.1, podle kterých je nutné zahřát částice gastroodpadu o maximální velikosti 12 mm na 70 °C v jádře po dobu alespoň jedné hodiny [15]. Na základě těchto požadavků byl vytvořen návrh, jak by hygienizační linka pro zpracování gastroodpadů mohla vypadat. Tento návrh je v podobě blokového schématu znázorněn na obrázku 22.



Obrázek 22 Prvotní návrh linky na zpracování gastroodpadů

Hlavním zařízením je v tomto případě hygienizační výměník, který má za úkol splnit legislativní požadavky ohřevu, proto je jeho návrh zvolen jako výchozí výpočet.

4.1 Návrh hygienizačního zařízení

Jako výchozí zdroj tepla je uvažována otopná voda vystupující z kogenerační jednotky využívané v BPS Chotýčany, a to konkrétně z jednotky Jenbacher JMS 312 (ve stavu před zvýšením výkonu). Podle technické specifikace této KGJ [38] zpátečka vody do kogenerační jednotky vstupuje o teplotě 70 °C a ohřeje se na teplotu 90 °C. Maximální objemový průtok této otopné vody je 24 m³·h⁻¹.

Hustota vody pro střední teplotu 80 °C odpovídá 972 kg·m⁻³ [39].

Z rovnice pro hmotnostní průtok:

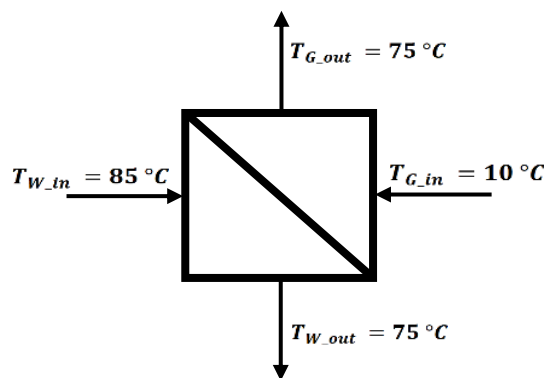
$$\dot{m} = \rho \dot{V}, \quad (4.1)$$

kde \dot{m} (kg·s⁻¹) je hmotnostní průtok média, ρ (kg·m⁻³) je objemová hustota média a \dot{V} (m³·s⁻¹) je objemový průtok média, je možné dosazením příslušných hodnot získat maximální hmotnostní průtok teplé vody z kogenerační jednotky:

$$\dot{m} = 972 \cdot 24 = 23\,328 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1} = 6,48 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}. \quad (4.2)$$

Volba teplot

Na vstupu a výstupu do hygienizačního zařízení byly zvoleny teploty vody jako $T_{W_in} = 85\text{ °C}$ a $T_{W_out} = 75\text{ °C}$, což by mělo zajistit i pokrytí případných ztrát. Zařízení je uvažováno v protiproudé konfiguraci. Hygienizován bude hmotnostní průtok gastroodpadu zvolený na základě výpočtů v předchozí kapitole jako $\dot{m} = 100\text{ kg}\cdot\text{h}^{-1} = 0,028\text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$. Vstupní teplota gastroodpadu je volena jako $T_{G_in} = 10\text{ °C}$ (příjmová nádoba by měla být umístěna uvnitř klimatizovaného kontejneru nebo budovy). Požadovaná výstupní teplota gastroodpadu bude s ohledem na bezpečnost mírně vyšší, než ukládá norma, a to: $T_{G_out} = 75\text{ °C}$. Schéma vstupních a výstupních teplot je naznačeno na obrázku 23.



Obrázek 23 Schéma vstupních a výstupních teplot hygienizačního zařízení

Výpočet potřebného hmotnostního toku otopné vody

Pro teplotu 80 °C , tedy střední hodnotu teploty otopné vody, je hodnota měrné tepelné kapacity za stálého tlaku rovna $c_{pW} = 4\,196\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ [39]. Pro gastroodpad je uvažována hodnota měrné tepelné kapacity $c_{pG} = 4\,179\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, což odpovídá hodnotě pro vodu o teplotě $42,5\text{ °C}$ (=střední teplota gastroodpadu) [39]. Úvaha pro volbu této měrné kapacity je taková, že gastroodpad je z většiny tvořen vodou a čím vyšší obsah vody gastroodpad má, tím blíže je jeho měrná tepelná kapacita hodnotě vody. U gastroodpadů s menším obsahem vody může být hodnota měrné tepelné kapacity o něco nižší, ale z důvodu bezpečnosti (jistoty prohřátí) bude dále počítáno s hodnotou vody.

Z jednoduché entalpické bilance, která neuvažuje ztráty do okolí lze určit následující vztah:

$$\dot{Q} = \dot{m}_G c_{pG} \Delta T_G = \dot{m}_W c_{pW} \Delta T_W, \quad (4.3)$$

kde ΔT_G představuje rozdíl vstupní a výstupní teploty gastroodpadu a ΔT_W rozdíl vstupní a výstupní teploty otopné vody [40].

Vyjádřením hmotnostního toku potřebné otopné vody \dot{m}_W z tohoto vztahu a dosazením číselných hodnot lze získat následující tvar rovnice a hodnotu:

$$\dot{m}_W = \frac{\dot{m}_G c_{pG} \Delta T_G}{c_{pW} \Delta T_W} = \frac{0,028 \cdot 4\,179 \cdot (75 - 10)}{4\,196 \cdot (85 - 75)} = 0,181 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}. \quad (4.4)$$

Tepelný výkon, který je třeba pro ohřev gastroodpadu, vychází obdobným dosazením do rovnice (4.3) jako $\dot{Q} = 7\,605,8 \text{ W}$. Pro představu, jaký podíl z kapacity KGJ by takové zařízení odebíralo, je možné vyjádřit poměr potřebného množství horké vody a maximálního hmotnostního průtoku otopné vody, z něhož po číselném dosazení vychází přibližně hodnota 2,8 %. To znamená, že dodávání tepla z KGJ do hygienizačního zařízení je reálné a nepředstavovalo by velkou zátěž.

V následujících návrhových výpočtech budou porovnány:

- průtokový ohřev,
- vsádkový ohřev.

Poté bude na základě hodnot součinitele přestupu tepla rozhodnuto, který ze způsobů je vhodnější. Médium uvažovaným ve výpočtech je voda, jejíž vlastnosti jsou tabelovány a dobře známy. Jak již bylo popsáno, fyzikální vlastnosti gastroodpadu jsou silně závislé na jeho složení, které je navíc proměnné, a tak je třeba na tuto aproximaci pomocí vody brát zřetel. Výsledná podoba zařízení by měla být dimenzována tak, aby ani v případě nejnepříznivějších podmínek nedošlo k nedodržení podmínek ohřevu. V případě příznivějších podmínek, při kterých by výkon linky převyšoval skutečnou potřebu, je uvažováno snížení výkonu linky řídicí jednotkou.

4.1.1 Návrhový a kontrolní výpočet průtokového výměníku

U průtokového hygienizačního výměníku je třeba navrhnout teplosměnnou plochu, geometrii trubek a provést kontrolní výpočet, zdali je možné výměník provozovat podle požadovaných návrhových parametrů.

Návrhový výpočet výměníku

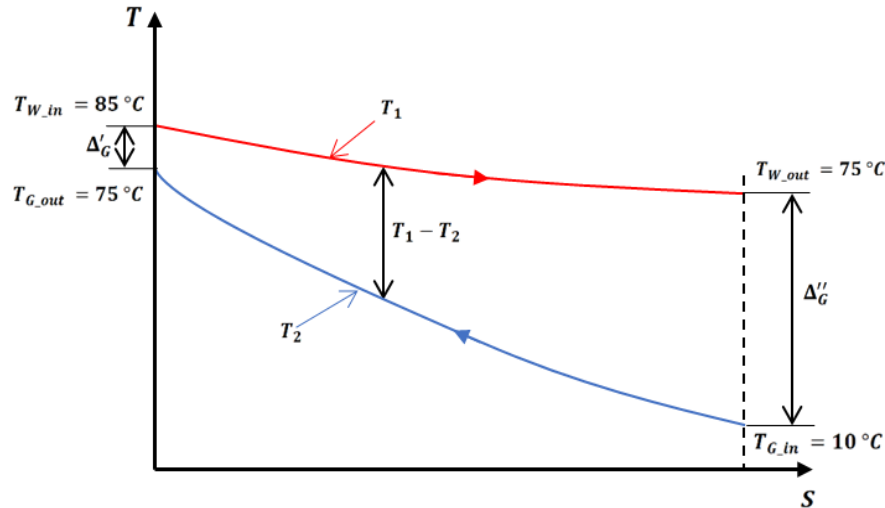
Po zvolení teplot a určení hmotnostních průtoků obou médií je následně možné dopočítat potřebnou plochu pro tepelný výměník podle následujícího vztahu:

$$S = \frac{\dot{Q}}{k \overline{\Delta T}}, \quad (4.5)$$

kde \dot{Q} představuje tepelný výkon, k součinitel prostupu tepla, S teplosměnnou plochu a $\overline{\Delta T}$ charakteristickou střední hodnotu teplotního spádu definovanou integrálem:

$$\overline{\Delta T} = \frac{1}{S} \int_{(S)} (T_1 - T_2) dS, \quad (4.6)$$

kde rozdíl teplot $T_1 - T_2$ představuje hypotetickou lokální hodnotu teplotní difference mezi oběma médii znázorněnou na obrázku 24 [40].



Obrázek 24 Závislost teplot na ploše v protiproudém aparátu

V případě čistě protiproudého výměníku lze tuto hodnotu určit vztahem, který se označuje jako střední logaritmická difference:

$$\overline{\Delta T} = \Delta T_{ln} = \frac{\Delta'' - \Delta'}{\ln \frac{\Delta''}{\Delta'}}, \quad (4.7)$$

ve kterém symboly Δ' a Δ'' představují rozdíly teplot proudů na příslušných stranách tepelného výměníku.

Pro teploty zvolené pro hygienizaci gastroodpadu v předchozí části pak platí:

$$\Delta' = T_{W_{in}} - T_{G_{out}} = 85 - 75 = 10 \text{ °C} \quad (4.8)$$

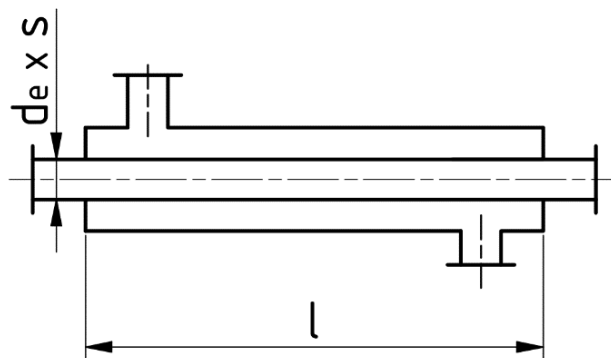
a také

$$\Delta'' = T_{W_{out}} - T_{G_{in}} = 75 - 10 = 65 \text{ °C}. \quad (4.9)$$

Po dosazení těchto hodnot do rovnice číslo (4.7) lze získat hodnotu $\Delta T_{ln} = 29,4 \text{ K}$.

Poslední hodnota, která je třeba pro určení plochy výměníku, je součinitel přestupu tepla. Ten závisí na mnoha veličinách, které v tuto chvíli nejsou známy. Pro návrhový výpočet výměníku je možné použít hodnoty, které jsou běžné pro daný typ výměníku. Zde je zvolen výměník typu trubka v trubce, který se často s výhodou používá v potravinářském průmyslu kvůli své dobré čistitelnosti. Skicu jednoho modulu s uvažovanou délkou teplosměnné plochy lze vidět na

obrázku 25. Pro tento výměník se udávají hodnoty $k = 300 \div 1\,400 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ [39]. Z tohoto rozmezí je pro návrhový výpočet zvolena teplota $k = 500 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$.



Obrázek 25 Skica jednoho modulu výměníku typu trubka v trubce

Po dosazení všech zmíněných hodnot do rovnice (4.5) vychází potřebná plocha výměníku jako:

$$S = \frac{7\,605,8}{500 \cdot 29,4} = 0,52 \text{ m}^2. \quad (4.10)$$

Úpravou rovnice (4.1) a dosazením patřičných hodnot lze získat objemový tok gastroodpadu:

$$\dot{V} = \frac{\dot{m}}{\rho} = \frac{0,028}{900} = 3,11 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}. \quad (4.11)$$

Dále je z následující rovnice pro objemový tok:

$$\dot{V} = S_{Tr} v, \quad (4.12)$$

kde S_{Tr} (m^2) představuje průtočný průřez a v ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) střední rychlost proudění, možné vyjádřit vztah pro určení střední rychlosti proudění pro trubku s kruhovým průřezem jako:

$$v = \frac{\dot{V}}{S_{Tr}} = \frac{\dot{V}}{\frac{\pi d_i^2}{4}}, \quad (4.13)$$

kde d_i (m) je vnitřní průměr trubky.

Protože se trubky zpravidla nevyrobějí na míru zákazníkovi, ale podle běžných výrobních řad do zásoby na sklady, jsou uvažovány běžně používané nerezové trubky z oceli EN X5CrNi18-10 (ČSN 17 240) dodavatele iNerez z jeho internetové nabídky [41].

Odpovídající potřebnou délku trubek l_{Tr} (m), která by pojmula požadované množství gastroodpadu, lze pak určit jako podíl objemu tohoto gastroodpadu a průtočného průřezu:

$$l_{Tr} = \frac{V}{S_{Tr}} = \frac{\frac{m}{\rho}}{S_{Tr}}. \quad (4.14)$$

Pomocí rovnic (4.13) a (4.14) lze pro vybrané trubky určit hodnoty zobrazené v tabulce 13.

Tabulka 13 Data z návrhu trubek pro hygienizační výměník

Trubka (dle normy EN 10217-7)	Vnější průměr (mm)	Tloušťka stěny (mm)	Vnitřní průměr (mm)	Vnitřní průřez (m ²)	Rychlost v trubce (m·s ⁻¹)	Odpov. potřebná délka (m)
Označení	d_e	s	d_i	S_{Tr}	v	l_{Tr}
TR ø6x1- 6000	6	1	4	0,000013	2,456	8 842
TR ø8x1- 6000	8	1	6	0,000028	1,092	3 930
TR ø10x1- 6000	10	1	8	0,000050	0,614	2 210
TR ø16x2- 6000	16	2	12	0,000113	0,273	982
TR ø25x2- 6000	25	2	21	0,000346	0,089	321
TR ø35x2- 6000	35	2	31	0,000755	0,041	147
TR ø48,3x2- 6000	48,3	2	44,3	0,001541	0,020	72
TR ø57x2- 6000	57	2	53	0,002206	0,014	50
TR ø76,1x2- 6000	76,1	2	72,1	0,004083	0,008	27
TR ø101,6x2- 6000	101,6	2	97,6	0,007482	0,004	15

Vydělením hodnot potřebné délky z tabulky 13 délkou jedné trubky a zaokrouhlením těchto hodnot na nejbližší vyšší celá čísla lze získat potřebný počet trubek n_{Tr} (ks).

Informativně lze vypočítat hmotnost těchto trubek jako obsah mezikruží, které odpovídá průřezu trubky, vynásobený potřebným počtem trubek n_{Tr} , délkou jedné trubky l_{1Tr} (m) a hustotou oceli, ze které jsou trubky vyrobeny (uvažováno 7 900 kg·m⁻³).

Z katalogu iNerez je určena také cena za jeden metr trubky C_{Tr1m} (Kč·m⁻¹), ze které je možné jednoduchým přenásobením potřebným množstvím trubek n_{Tr} a délkou jedné trubky l_{1Tr} vypočítat celkovou cenu za pořízení trubek bez DPH C_{Tr} (Kč·m⁻¹) [41].

Hodnoty doplňujících výpočtů provedených dle předchozích odstavců jsou uvedeny v tabulce 14.

Tabulka 14 Doplnující data z návrhu trubek pro hygienizační výměník

Trubka (dle normy EN 10217-7)	Délka 1 trubky (mm)	Potřebný počet trubek (ks)	Hmotnost trubek (kg)	Cena za metr (Kč bez DPH)	Celk. cena (Kč bez DPH)
Označení	l_{1Tr1}	n_{Tr}	m_{Tr}	C_{Tr1m}	C_{Tr}
TR ø6x1- 6000	6 000	1 474	1 097,5	30	265 320
TR ø8x1- 6000	6 000	655	682,8	35,5	139 515
TR ø10x1- 6000	6 000	369	494,5	36,67	81 187
TR ø16x2- 6000	6 000	164	683,8	111,83	110 041
TR ø25x2- 6000	6 000	54	369,9	118	38 232
TR ø35x2- 6000	6 000	25	245,7	263	39 450
TR ø48,3x2- 6000	6 000	13	179,3	278	21 684
TR ø57x2- 6000	6 000	9	147,4	469	25 326
TR ø76,1x2- 6000	6 000	5	110,3	339,5	10 185
TR ø101,6x2- 6000	6 000	3	89,0	472,33	8 502

Z tabulky 13 je patrné, že se zvětšujícím se průměrem trubky klesá střední průtočná rychlost a odpovídající potřebná délka trubky. Tabulka 14 pak ukazuje, že trubky s větším průměrem většinou představují menší pořizovací náklady než trubky s menším průměrem.

Kromě teplotních a časových požadavků byly v podkapitole 2.1 objasněny požadavky na velikost částic zpracovávaného gastroodpadu, které definují, že nesmí obsahovat částice větší než 12 mm. To znamená, že jsou trubky s malými průměry zcela nevhodné pro dopravu tohoto materiálu. Z těchto důvodů je zvolena jako vhodná trubka TR $\varnothing 76,1 \times 2 - 6000$, která má přibližně šestinásobně větší vnitřní průměr, než je maximální dovolená velikost částice.

Vnitřní plochu jedné trubky A_{Tr} (m^2), která má tvar válce, lze určit jako:

$$A_{Tr} = \pi d_i l_{1Tr} = \pi \cdot 72,1 \cdot 6000 = 1\,359\,053 \text{ mm}^2 = 1,36 \text{ m}^2. \quad (4.15)$$

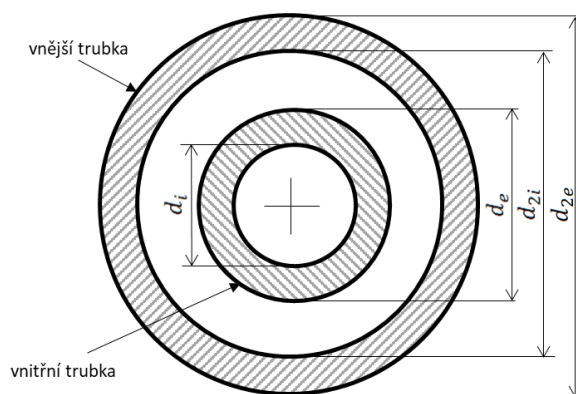
Z toho vyplývá, že i pouhá $\frac{1}{2}$ trubky TR $\varnothing 76,1 \times 2 - 6000$ s délkou $l = 3$ m by podle návrhového výpočtu dle rovnice (4.10) poskytla dostatečnou teplosměnnou plochu a zbytek trubek by mohl být využit jako výdržník pro dodržení předepsané doby zdržení na dané teplotě. Tento závěr je však nutné ověřit, protože hodnoty součinitele přestupu tepla k nebyly vypočítány, ale zvoleny podle běžně dosahovaných hodnot u výměníků typu trubka v trubce.

Kontrolní výpočet výměníku

Pro kontrolní výpočet je zapotřebí určit součinitele přestupu tepla k , k čemuž je možné použít například metodu součtu jednotlivých tepelných odporů, které musí překonat tepelný tok přecházející z otopné vody skrz stěnu trubky do gastroodpadu proudícího ve vnitřní trubce [42]. Protože vlastnosti gastroodpadu velmi silně závisí na jeho složení, které v tuto chvíli nejsou známy, je pro kontrolní účely vypočten součinitel přestupu pro vodu, jejíž vlastnosti jsou tabelovány. Pro válcovou stěnu lze odvodit součinitel přestupu tepla k vztahovaný k vnitřnímu povrchu trubky jako:

$$k|_{R_1} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{R_1}{\lambda} \ln \frac{R_2}{R_1} + \frac{R_1}{R_2} \cdot \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (4.16)$$

Kde R_1 a R_2 (m) jsou poloměry definující stěny vnitřní trubky, a odpovídají tak polovinám d_i a d_e (m). Tyto rozměry jsou zobrazeny na obrázku 26. Symboly α_1 a α_2 ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$) představují součinitele přestupu tepla, α_1 uvnitř vnitřní trubky a α_2 uvnitř mezikruží. Symbol tepelné vodivosti λ ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$) v tomto případě představuje materiálovou vlastnost nerezové oceli, číselně pak $\lambda = 15 \text{ W} \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ [42]. Závislost tepelné vodivosti na teplotě je pro relativně malé teploty ve výměníku zanedbána. Vnější trubka je uvažována s dokonalou izolací zvnějšku.



Obrázek 26 Schématické zobrazení průřezu trubek ve výměníku

K určení α_1 je třeba nejprve vypočítat hodnotu Reynoldsova čísla pro proudění média uvnitř vnitřní trubky:

$$\text{Re} = \frac{v d_i}{\nu} = \frac{0,008 \cdot 0,0721}{0,63 \cdot 10^{-6}} = 916, \quad (4.17)$$

kde $\nu = 0,63 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ představuje kinematickou viskozitu vody pro střední teplotu ve výměníku a v rychlost vody, která by vnitřní trubkou proudila se stejným hmotnostním průtokem, jaký je uvažován pro gastroadpad [42]. Tuto rychlost je možné dopočítat dosazením příslušných hodnot do rovnice (4.13) nebo odečíst z tabulky 8.

Reynoldsovo číslo z rovnice (4.17) je menší než 2 300, jde tedy o laminární proudění. V tom případě je možné využít Hausenovy korelace, která říká:

$$\text{Nu} = \frac{\alpha d}{\lambda} = 3,66 + \frac{0,06868 \text{Gz}}{1 + 0,04 \text{Gz}^{2/3}}, \quad (4.18)$$

kde konstanty α a λ jsou vlastnostmi média a Gz představuje Graetzovo číslo [40].

To lze určit následující rovnicí:

$$\text{Gz} = \frac{\text{RePr}}{\frac{l}{d_i}} = \frac{916 \cdot 4,1305}{\frac{3}{0,0721}} = 91, \quad (4.19)$$

kde Pr představuje Prandtlovo kritérium [40]. Pro vodu o střední teplotě $42,5 \text{ }^\circ\text{C}$ $\text{Pr} = 4,1305$ [39].

Pomocí Graetzova čísla lze určit hodnotu Nusseltova kritéria dosazením do korelace, kterou představuje druhá část rovnice (4.18) jako:

$$\text{Nu} = 3,66 + \frac{0,06868 \text{Gz}}{1 + 0,04 \text{Gz}^{2/3}} = 3,66 + \frac{0,06868 \cdot 91}{1 + 0,04 \cdot 91^{2/3}} = 7,1. \quad (4.20)$$

A konečně lze pomocí první části vztahu v rovnici (4.18) určit velikost součinitele přestupu tepla uvnitř vnitřní trubky:

$$\alpha_1 = \frac{\text{Nu}\lambda_W}{d_i} = \frac{7,1 \cdot 631,55 \cdot 10^{-3}}{0,0595} = 75,3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}, \quad (4.21)$$

kde $\lambda_W = 631,55 \cdot 10^{-3} \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ je součinitel tepelné vodivosti vody o střední teplotě 42,5 °C [39].

Průtočný průřez, kterým bude protékat otopná voda, odpovídá v konfiguraci trubka v trubce mezikruží. Navrhnout vnitřní průměr vnější trubky lze pomocí objemového průtoku topné vody $\dot{V}_W = 1,87 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ získaného dosazením příslušných čísel do rovnice (4.11), zvolením požadované rychlosti průtoku $v = 0,03 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ a dosazením do následující rovnice:

$$d_{2i} = \sqrt{\frac{4\dot{V}_W}{\pi v} - d_e^2} = \sqrt{\frac{4 \cdot 1,87 \cdot 10^{-4}}{\pi \cdot 0,03} + 0,0761^2} = 0,117 \text{ m}. \quad (4.22)$$

Z katalogu iNerez se tomuto rozměru nejlépe přibližuje trubka TR $\varnothing 129 \times 2 - 6000$, která má vnitřní průměr $d_{2i} = 125 \text{ mm}$ [41].

Dosazením tohoto rozměru do příslušně upravené rovnice číslo (4.22) lze získat střední průtočnou rychlost topné vody $v_W = 0,024 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Pro určení bezrozměrných kritérií potřebných pro výpočet je nejprve nutné určit hydraulický průměr, který u mezikruží odpovídá rozdílu průměrů ohraničujících mezikruží [40].

Hydraulický průměr lze tedy spočítat pomocí následující rovnice:

$$d_h = d_{2i} - d_e = 0,125 - 0,0761 = 0,0489 \text{ m}. \quad (4.23)$$

Následně je možné určit Reynoldsovo kritérium pro mezikruží:

$$\text{Re} = \frac{v_W d_h}{\nu_W} = \frac{0,024 \cdot 0,0489}{0,387 \cdot 10^{-6}} = 3\,302, \quad (4.24)$$

Kde $\nu_W = 0,387 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ představuje kinematickou viskozitu vody pro střední teplotu otopné vody 80 °C [39].

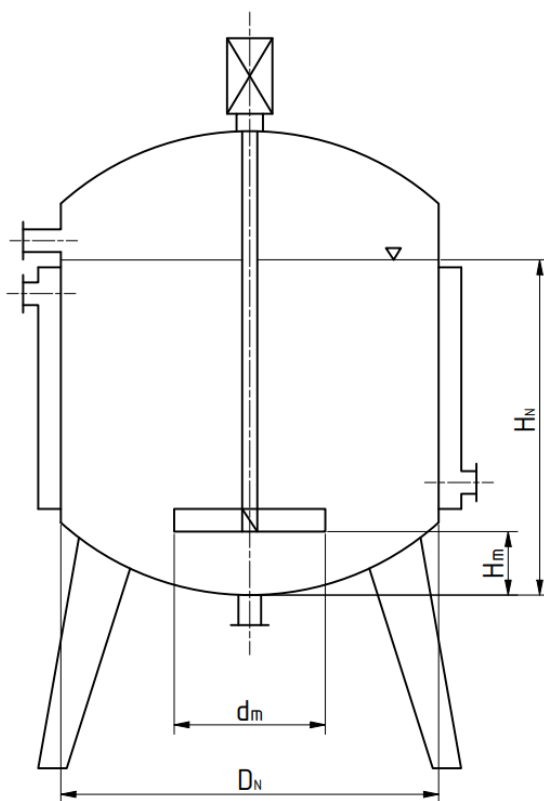
Toto číslo je větší než 2 400, ale zároveň je menší než 10 000. V tomto případě by muselo být počítáno se vztahy pro turbulentní prostředí s korekcí pro přechodový stav mezi laminárním a turbulentním prouděním, což by obsáhlo několik stran rovnic a textu. Lze však jednoduše ukázat, že ani při dosazení maximální běžně zmiňované hodnoty součinitele přestupu tepla, které lze dosáhnout jen pomocí kapénkově kondenzující vodní páry $\alpha_2 = 100\,000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$, do rovnice číslo (4.16), není výsledek dostačující. Vzhledem k tomu, že do hygienizačního výměníku by mělo být dodáváno teplo pomocí otopné vody z kogenerační jednotky, je takové číslo nedosažitelné a součinitel přestupu tepla by tak byl ještě nižší.

$$k|_{R1} = \frac{1}{\frac{1}{75,3} + \frac{0,03605}{15} \ln \frac{0,03805}{0,03605} + \frac{0,03605}{0,03805} \cdot \frac{1}{100\,000}} = 74,5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}. \quad (4.25)$$

Z tvaru rovnice (4.16) je patrné, že zásadní vliv na velikost přestupu tepla k má zejména nízké α_1 , protože součinitel k je i v případě dosažení hodnoty $\alpha_2 = 100\,000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ přibližně čtyřikrát menší než běžně udávané minimální hodnoty pro výměníky typu trubka v trubce [39]. Jak bylo zmíněno na začátku tohoto výpočtu, jde pouze o orientační výpočet. Neneutonské chování gastroodpadu by pravděpodobně vneslo do tohoto výpočtu jiné hodnoty, ale přesto by mohlo vlivem velmi malého Reynoldsova čísla docházet k nedostatečnému prohřátí materiálu až do jeho jádra, a proto je pro zajištění podmínek hygienizace navržen vsádkový ohřev, který díky míchání tomuto problému zamezí.

4.1.2 Návrh vsádkového ohřevu

Vsádku v nádobě lze ohřát několika způsoby, např. duplikátorovým pláštěm, trubkovým hadem nebo externím výměníkem [40]. Z tohoto důvodu začíná návrh výběrem vhodného způsobu. Kvůli dobré čistitelnosti a jednoduché konstrukci byla zvolena míchaná nádoba s duplikátorovým pláštěm, jejíž skica je na obrázku 27. Zároveň je kvůli zajištění dostatečně dlouhé doby zdržení na požadované teplotě pro všechny částice gastroodpadu uvažován výdržník, který následuje po vsádkovém ohřevu a je tvořen z trubek TR $\varnothing 76,1 \times 2-6000$.



Obrázek 27 Skica nádoby s duplikátorem

Výchozím údajem pro návrh této nádoby je požadovaný objem vsádky, který byl zvolen tak, aby pojmul třikrát větší množství gastroodpadu, než je jeho hodinový průtok, tedy 300 kg s objemem vycházejícím jako $V_N = 0,33 \text{ m}^3$. Protože by hladina vsádky H_N (m) v nádobě měla odpovídat velikosti průměru nádoby D_N (m), je možné získat ze vztahu pro výpočet objemu rovnici pro návrh průměru nádoby [43].

Samotná rovnice pro výpočet průměru nádoby a výšky hladiny vypadá následovně:

$$H_N = D_N = \sqrt[3]{\frac{4V_N}{\pi}} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 0,33}{\pi}} = 0,75 \text{ m}. \quad (4.26)$$

Pro ukázkový výpočet přestupu tepla při míchání vsádky bylo zvoleno rychloběžné třílopatkové míchadlo s šikmými lopatkami CVS 69 1025.3, jehož vlastnosti jsou experimentálně naměřeny a popsány. Doporučený poměr průměru nádoby a průměru míchadla by měl odpovídat 3÷4, proto je zvolen průměr míchadla $d_m = 0,25 \text{ m}$ [43].

K určení příkonu míchadla by bylo zapotřebí podrobně znát reologické chování gastroodpadu. To však bude proměnlivé se složením, a proto je návrh příkonu proveden podle hodnot doporučených specifických příkonů $\varepsilon = P/V$ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$), které udávají poměr příkonu a objemu nádoby. U standardních míchacích zařízení s rychloběžnými míchadly se hodnota specifického příkonu pohybuje v rozmezí 150÷590 $\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$ [43].

Při úvaze hodnoty $\varepsilon = 150 \text{ W} \cdot \text{m}^{-3}$ a dosazení příslušných koeficientů A_1 až A_6 míchadla CVS 69 1025.3 vypsanych v tabulce 15 do rovnice pro příkonové číslo:

$$\text{Po} = \left[\left(\frac{A_1}{\text{Re}} \right)^{A_2} + \frac{A_3}{\text{Re}^{A_4} \cdot \text{Re}^{A_5}} + A_6 \right]^{\frac{1}{A_2}}, \quad (4.27)$$

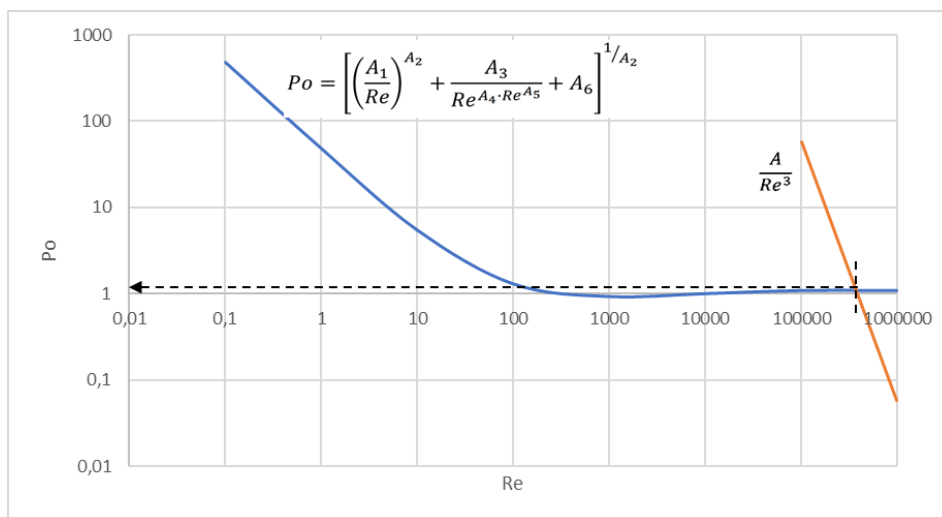
lze získat jeho závislosti na Reynoldsově čísle. Tu lze následně vynést do grafu, čemuž odpovídá obrázek 28. Do něj je také možné vynést rovnici přímky, která vychází z poměření součinu příkonového čísla a Reynoldsova čísla umocněného na třetí:

$$\text{PoRe}^3 = \frac{P\rho^2 d_m}{\mu^3} = \frac{\varepsilon V_N \rho^2 d_m}{\mu^3} = \text{konst.} = A, \quad (4.28)$$

a má tvar $A\text{Re}^{-3}$ [43].

Tabulka 15 Koeficienty míchadla CVS 69 1025.3 [43]

CVS 69 1025.3			
A1	47,5	A4	3,15E-08
A2	1,074	A5	1,609
A3	-0,214	A6	1,108



Obrázek 28 Odečet Reynoldsova a příkonového čísla

Pomocí řešiče v programu Excel byl určen průsečík těchto dvou závislostí (orientačně lze i graficky). Reynoldsovo číslo pro dané parametry odpovídá $Re = 374\,523$ a příkonového číslo $Po = 1,1$. Tomu odpovídají otáčky $n_{ot} = 3,6\text{ s}^{-1}$ a příkon $P = 49,5\text{ W}$. To znamená, že specifický příkon je roven $150\text{ W}\cdot\text{m}^{-3}$, což je výchozí návrhová hodnota. Protože jsou doporučené hodnoty specifického příkonu při míchání vysokoviskózních kapalin vyšší než u standardních míchacích zařízení a zároveň takovýto výpočet nezahrnuje ztráty v uložení hřídele, v ucpávce a v převodovém mechanismu, je uvažován motor o výkonu 1 kW [43]. Takovýto předimenzováním zajistí dostatečný příkon na míchadle, a navíc umožní potenciálně zvětšit rozsah použití.

Ke zjištění součinitele přestupu tepla z vsádky do stěny nádoby míchané rotačním míchadlem je možné využít experimentálně určené korelace:

$$Nu = \frac{\alpha D}{\lambda} = c Re^m Pr^{0,33} \left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0,14}, \quad (4.29)$$

kde se za D (m) dosazuje průměr nádoby D_N (m), koeficient c (-) a exponent m (-) jsou závislé na typu míchadla (pro míchadlo CVS 69 1025.3 a nádobu zahřívanou duplikátorovým pláštěm odpovídá $c = 0,49$ a $m = 2/3$), Reynoldsovo číslo Re je vyjádřeno pro míchání a μ_w (Pa·s) je viskozita na stěně nádoby [40]. Pro zjednodušení je uvažována viskozita vody o teplotě 75 °C $\mu_w = 331 \cdot 10^{-3}\text{ Pa}\cdot\text{s}$. [39].

Dosazením příslušných hodnot do rovnice (4.29) lze získat následující výpočet:

$$Nu = 0,49 \cdot 374\,523^{2/3} \cdot 4,1305^{0,3} \left(\frac{594,72 \cdot 10^{-3}}{331 \cdot 10^{-3}} \right)^{0,14} = 4\,229. \quad (4.30)$$

A konečně také získat součinitel přestupu tepla vyjádřením z první části z rovnice (4.29) a dosazením patřičných hodnot:

$$\alpha_V = \frac{Nu\lambda_W}{D_N} = \frac{5\,128 \cdot 631,55 \cdot 10^{-3}}{0,75} = 3\,561 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}. \quad (4.31)$$

Protože tepelné odpory stěny nádoby a vody proudící v duplikátorovém plášti jsou závislé na konkrétní podobě míchané nádoby, jejíž podobu nelze jednoduše odhadnout, není možné tyto odpory spočítat. Je však možné porovnat součinitele přestupu tepla v nádobě a v trubkovém výměníku. Součinitel přestupu tepla vychází v míchané nádobě přibližně padesátkrát větší než ve výměníku typu trubka v trubce. Díky míchání také nehrozí, že by se některá část materiálu dostatečně neprohřála. Z těchto důvodů byla zvolena míchaná nádoba s duplikátorem jako vhodný způsob ohřevu.

Ověření doby ohřevu částice do jádra

Při návrhu ohřevu nebyl zohledněn vliv času, který je potřeba, aby se částice gastroodpadu zahřála až do svého středu, jak to nařizuje legislativa. Vsádkový ohřev byl vybrán, protože při zvolených podmínkách poskytuje vyšší součinitele prostupu tepla z otopné vody do gastroodpadu než průtokový ohřev. Součinitel přestupu tepla mezi pevnými částicemi gastroodpadu o maximální velikosti 12 mm a kapalnou složkou gastroodpadu, ve které se pevné částice pohybují, závisí na relativní rychlosti pohybu proudící kapaliny – pohybující se částice. Lze předpokládat, že jeho hodnoty budou řádově v desítkách nebo stovkách $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$. Na základě odhadů tohoto součinitele lze určit řádově i čas doby ohřevu a přizpůsobit mu dobu zdržení ve výdržníku.

Pro určení, zdali má větší vliv na dobu ohřevu vnější nebo vnitřní termický odpor, lze využít Biotova čísla, které vypadá následovně:

$$Bi = \frac{\alpha R}{\lambda}, \quad (4.32)$$

kde α ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$) je součinitel přestupu tepla z kapaliny na pevnou částici, R (m) je poloměr této částice a λ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) je tepelná vodivost částice [42]. Pro modelový příklad jsou uvažovány součinitele přestupu tepla 20, 100, 500 a 2 500 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ a maximální možný poloměr kulové částice 0,006 m. Dále je potřeba znát součinitel tepelné vodivosti částice gastroodpadu tvořeného potravinami, jejichž tepelná vodivost se pohybuje v desetínách $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. Pro konkrétní ukázkou je uvažována mrkev s hodnotou 0,13 $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ [44]. Dosazením do níže následujících rovnic lze získat hodnoty, které jsou uvedeny v tabulce 16.

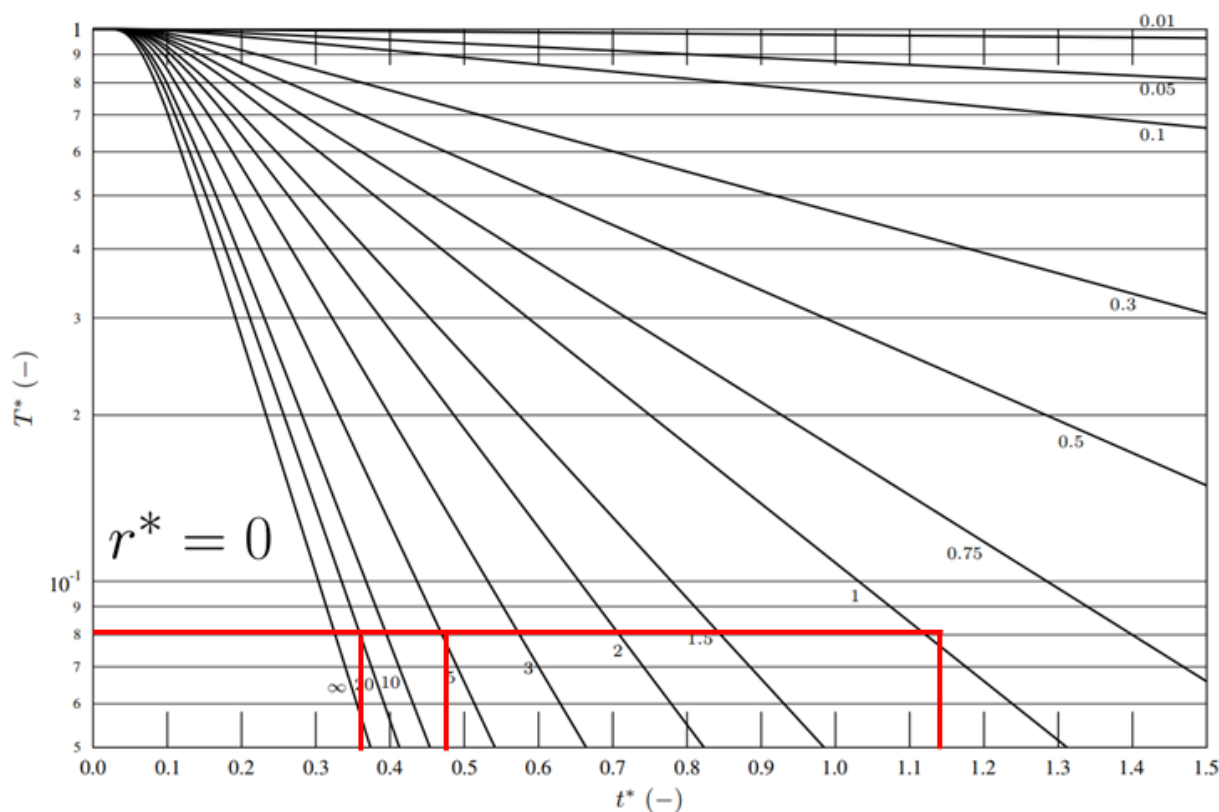
Tabulka 16 Hodnoty Biotova čísla a času prohřátí pro různé hodnoty součinitele přestupu tepla

α ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$)	20	100	500	2 500
Bi (-)	0,92	4,6	23,1	115,4
t (min)	26,3	11,2	8,4	7,4

Pro případy, kdy se hodnoty Biotova čísla pohybují řádově okolo jedné, jsou odpory na obou stranách podobně velké, a nelze tak vliv ani jednoho zanedbat. V těchto případech je možné odečíst z nomogramů bezrozměrný čas, který je třeba pro dosažení teploty 70 °C. K tomu je zapotřebí určit ještě bezrozměrnou teplotu jako:

$$T^* = \frac{T - T_f}{T_0 - T_f} = \frac{70 - 75}{10 - 75} = 0,08, \quad (4.33)$$

kde T (°C) představuje požadovanou teplotu, T_f (°C) rovnovážnou teplotu, které by ohřivané těleso dosáhlo za neomezený čas a T_0 (°C), což je uvažovaná výchozí teplota gastroodpadu [42]. Na základě těchto hodnot lze odečíst z nomogramu pro tvar koule o poloměru nula (tedy v jejím středu) hodnoty bezrozměrného času, jak to lze vidět na obrázku 29.



Obrázek 29 Odečet z nomogramu pro nestacionární vedení tepla v kouli [45]

Bezrozměrný čas je definovaný jako:

$$t^* = \frac{at}{R^2}, \quad (4.34)$$

kde t (s) je čas a a ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$) součinitel teplotní vodivosti, který je pro uvažovanou mrkev roven hodnotě $3,23 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ [44]. Jednoduchým vyjádřením proměnné t a dosazením patřičných hodnot lze získat čas, za který se kulová částice mrkve o poloměru 6 mm prohřeje do svého středu. Pro hodnotu $\alpha = 100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ jde o 11,2 minut a pro hodnotu $\alpha = 500 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ o 8,4 minut.

Při vyšších hodnotách součinitele přestupu tepla má limitující vliv hlavně konduktivní tepelný odpor částice a uvažuje se, že stěna ohřívaného tělesa dosáhne okamžitě teploty kapaliny [42]. Ze stěny se pak šíří teplotní vlna, jejíž hloubku δ (m) lze pro poloneomezené prostředí v závislosti na čase určit jako:

$$\delta = \sqrt{\pi \alpha t}. \quad (4.35)$$

Jednoduchou úpravou lze a dosazením již zmiňovaných hodnot lze získat čas roven 7,4 minutám.

Odhad doby ohřevu částice gastroodpadu do až do jádra se pohybuje v rozmezí 7,4 a 26,3 minut. Hygienizační nádoba na ohřev gastroodpadu byla navržena tak, aby její objem pojmul trojnásobek hodinového průtoku hygienizační linky, střední doba zdržení gastroodpadu je tedy rovna třem hodinám. To spolu s požadavkem na ohřev na teplotu 75 °C bezpečně zajišťuje dobu potřebnou k ohřevu částice do středu na požadovanou teplotu 70 °C.

4.2 Návrh pomocných zařízení hygienizační linky

Kromě hygienizační nádoby s výdržníkem pro hygienizaci gastroodpadu je součástí navrhované linky také celá řada dalších zařízení. Jde o příjmovou nádrž s dopravníkem, macerátor, čerpadla a zásobní nádrž. Jejich klíčové parametry jsou navrženy v této podkapitole. Celkovou podobu linky je možné vidět v příloze 2.

4.2.1 Návrh zásobníku na hygienizovaný gastroodpad

Obdobně jako při návrhu nádoby s duplikátorovým pláštěm lze postupovat i v tomto případě. Objem vsádky $V_z = 8 \text{ m}^3$ je v tomto případě zvolen tak, aby pojmul takové množství gastroodpadu, které by umožnilo zásobovat fermentor hygienizovaným gastroodpadem až po dobu tří dnů. Nádoba bude koncipována stejně jako hygienizační tank na obrázku 27, jen bez duplikátorového pláště. Dosazením objemu vsádky do rovnice (4.26) použité již při návrhu hygienizační nádoby lze získat návrhový průměr zásobníku:

$$H_z = D_z = \sqrt[3]{\frac{4V_z}{\pi}} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 8}{\pi}} = 2,17 \text{ m}. \quad (4.36)$$

Pro kompatibilitu se standardními rozměry den je vnější průměr nádoby zvolen na 2,2 m.

I v případě návrhu příkonu míchadla do zásobníku na hygienizovaný gastroodpad lze využít doporučených specifických příkonů, která je zvolena jako hodnota $\varepsilon = 150 \text{ W} \cdot \text{m}^{-3}$. V zásobníku bude míchání sloužit pouze jako ochrana před zatuhnutím či vytvoření tvrdé krusty na hladině vsádky v nádobě. Výpočet potřebného příkonu vypadá následovně:

$$P = \varepsilon V = 150 \cdot 8 = 1\,200 \text{ W} . \quad (4.37)$$

Tuto hodnotu je opět vhodné předdimenzovat tak, aby pokryla ztráty a umožnila případně zvětšení příkonu míchadla v případě, že by míchání nebylo dostatečné. Proto je volen motor s výkonem 5 kW. Takto velký výkon v kombinaci s řízením motoru pomocí frekvenčního měniče umožní nastavení optimálního potřebného příkonu míchadla a podle zkušeností v provozu bude také možné určit intervaly a čas míchání, což by umožnilo snížit spotřebu elektřiny.

4.2.2 Návrh šnekového dopravníku

Příjem gastroodpadu bude probíhat do uzavíratelného kontejneru s kovovou mříží chránící obsluhu před pádem dovnitř a umožňující zachycení největších cizorodých těles. Zároveň bude v okamžik vykládky probíhat kontrola obsahu nádob na gastroodpad. Uvnitř nádoby bude pomaloběžný šnekový dopravník, který bude poháněn elektromotorem pomocí řemenového převodu tak, aby v případě přetížení proklouzl a obsluha mohla zasáhnout.

Příkon pomaloběžného šnekového dopravníku lze odhadnout pomocí metody součtu příkonů získaných z empirických vztahů [43].

Součet těchto příkonů vypadá následovně:

$$P = P_1 + P_2 + P_3 , \quad (4.38)$$

kde P_1 (W) představuje příkon prázdného dopravníku a lze jej spočítat jako:

$$P_1 = 0,05DL = 0,05 \cdot 0,2 \cdot 2 = 0,02 \text{ W} , \quad (4.39)$$

kde $D = 0,2$ m je průměr navrhovaného dopravníku a $L = 2$ m je jeho délka. Příkon P_2 (W), který představuje příkon pro dopravu materiálu ve svislém směru, lze vyjádřit jako:

$$P_2 = \dot{m}gH = 0,28 \cdot 9,81 \cdot 0 = 0 \text{ W} , \quad (4.40)$$

kde $\dot{m} = 0,28 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ je hmotnostní tok gastroodpadu, $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ je gravitační zrychlení a $H = 0$ m výška, do které je gastroodpad dopravován. Protože je dopravník uvažován pro dopravu v horizontálním směru, je hodnota příkonu $P_2 = 0 \text{ W}$.

Poslední chybějící příkon P_3 (W) představuje příkon pro vodorovnou dopravu gastroodpadu a lze jej vypočítat jako:

$$P_3 = k\dot{m}Lg = 4 \cdot 0,28 \cdot 2 \cdot 9,81 = 22 \text{ W} , \quad (4.41)$$

kde k (-) představuje součinitel odporu proti pohybu materiálu. Tento součinitel závisí na objemové měrné hmotnosti a velikost částic materiálu. Pro materiály s objemovou hustotou menší než $600 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ se pohybuje v rozmezí $1,2 \div 1,6$, pro materiály s větší hustotou pak v rozmezí $2,5 \div 4$

s tím, že pro větší částice platí větší hodnoty, a proto je zvolena hodnota $k = 4$, která stojí na straně bezpečnosti.

Po dosažení jednotlivých příkonů do rovnice (4.38) lze dostat hodnotu potřebného příkonu šnekového dopravníku $P = 20,03$ W. Kromě toho, že tento výpočet vychází z empiricky odvozeného vztahu, nezahrnuje ztráty v uložení a převodech. Z těchto důvodů je zvolen předdimenzovaný motor o výkonu $P = 1\ 000$ W. Na základě těchto údajů je nutné poptat dopravník u konkrétních výrobců a přesnou podobu domluvit s nimi.

4.2.3 Návrh čerpadel a macerátoru

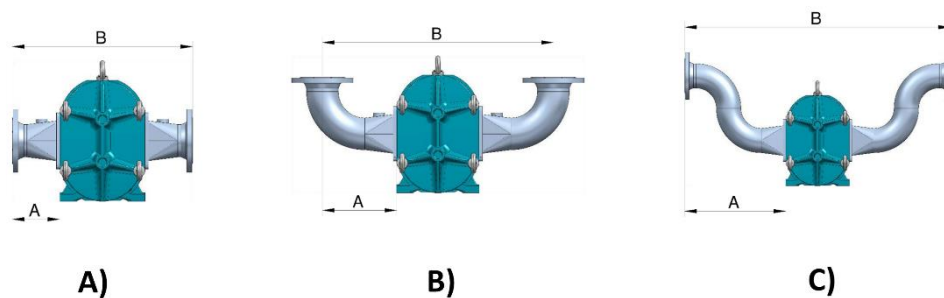
Návrh čerpadel lze provést podle návrhových výpočtů závislých na vlastnostech dopravované tekutiny, ale v tomto případě jsou rozhodující velmi specifické podmínky, za kterých by čerpadlo pracovalo. Jde o relativně nízký průtok $\dot{m} = 100$ kg·h⁻¹, který je většinou u čerpadel pro dopravu těchto tekutin výrazně pod minimální hodnotou průtoku. Z tohoto důvodu byla provedena rozsáhlá rešerše komerčních výrobců čerpadel a jejich příslušenství, z níž vyplynula jako nejvhodnější varianta německá firma Börger GmbH, která nabízí novou řadu rotačních loubových čerpadel pro využití v zemědělství a bioplynových stanicích nazvanou BLUEline NOVA [46].

Z nabídky v tabulce 17 je patrné, že požadovaný průtok zajistí již nejmenší typ z této řady, tedy čerpadlo BLUEline NOVA AN 040. Toto čerpadlo je dostupné v různých konfiguracích a s motory o různých příkonech.

Tabulka 17 Nabídka čerpadel z řady BLUEline NOVA [46], přeloženo

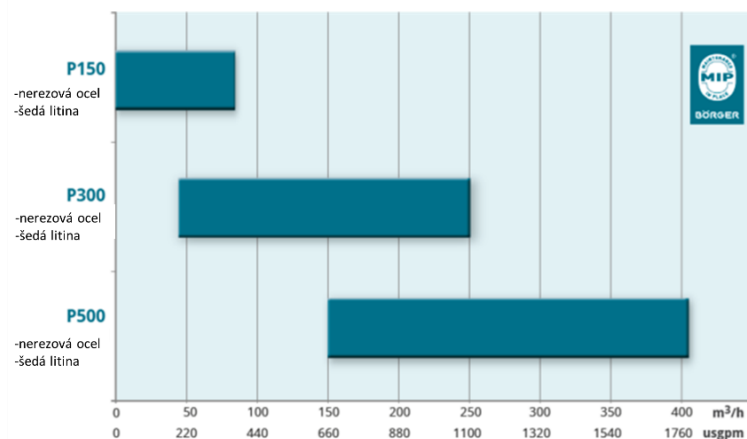
TYP BLUEline NOVA	OTÁČKY (ot./min.)		PRŮTOK		TLAK	TEPLOTA
	Min.	Max.	Min. (m ³ /h)	Max. (m ³ /h)	Max. (bar)	Max. (°C)
AN 040	1	800	0.03	20	10	až do 200
AN 070	1	800	0.04	35	8	až do 200
PN 100	1	800	0.06	50	12	až do 200
PN 160	1	800	0.10	75	12	až do 200
QN 230	1	600	0.14	85	8	až do 200
QN 300	1	600	0.18	110	8	až do 200

Protože čerpadlo může podle technických specifikací od výrobce [47] pracovat i při jedné otáčce za minutu a s minimálním průtokem 0,03 m³·h⁻¹, je i z nabízených motorů zvolen ten s nejmenším příkonem 1,1 kW. Průměry sání a výtlačku čerpadla jsou zvoleny s DN65. Tento rozměr odpovídá trubce TR ø76,1x2 – 6000, ze které je tvořen výdržník a zároveň bude využita jako dopravní trubka mezi jednotlivými zařízeními. Jednotlivé možnosti konfigurace připojení čerpadla do linky jsou na obrázku 30.



Obrázek 30 Konfigurace čerpadla BLUEline NOVA AN040 [47]

Za účelem ochrany čerpadla před poničením velkými kusy, kovy nebo kameny výrobce Börger GmbH nabízí také macerátory Multichopper plus, které rozmělnováním průtočného média zlepšují jeho čerpatelnost a zároveň dokážou separovat zmíněné kovy nebo kameny [48]. Z obrázku 31 je patrné, že díky svému rozsahu představuje nejmenší nabízený typ P150 vhodnou volbu.



Obrázek 31 Rozsahy průtoků macerátorů Multichopper plus firmy Börger [48], přeloženo

Multichopper plus, který je zobrazen na obrázku 32, se nabízí s různými dimenzemi sání a výtlaku a příkony motoru. Kvůli jednoduchosti montáže a společné kompatibilitě je zvolen rozměr DN65. Z příkonové řady je zvolena nejmenší varianta s motorem o příkonu 2,2 kW.

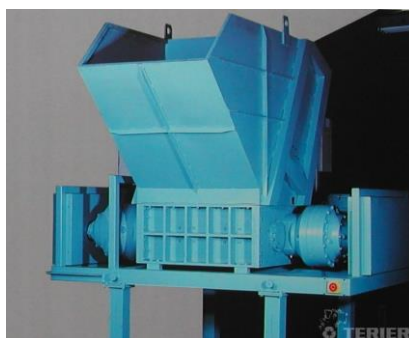


Obrázek 32 Multichopper plus firmy Börger [48]

4.2.4 Návrh drtiče gastroodpadu

Drtiče jsou položkou běžně dodávanou na zakázku podle konkrétního účelu a technických specifikací. Podoba, jakou by drtič mohl mít, vychází z rešerše nabídek výrobců. Za zmínku stojí firma Terier s. r. o., která na svých stránkách nabízí dvouhřídelové drtiče odpadu [49].

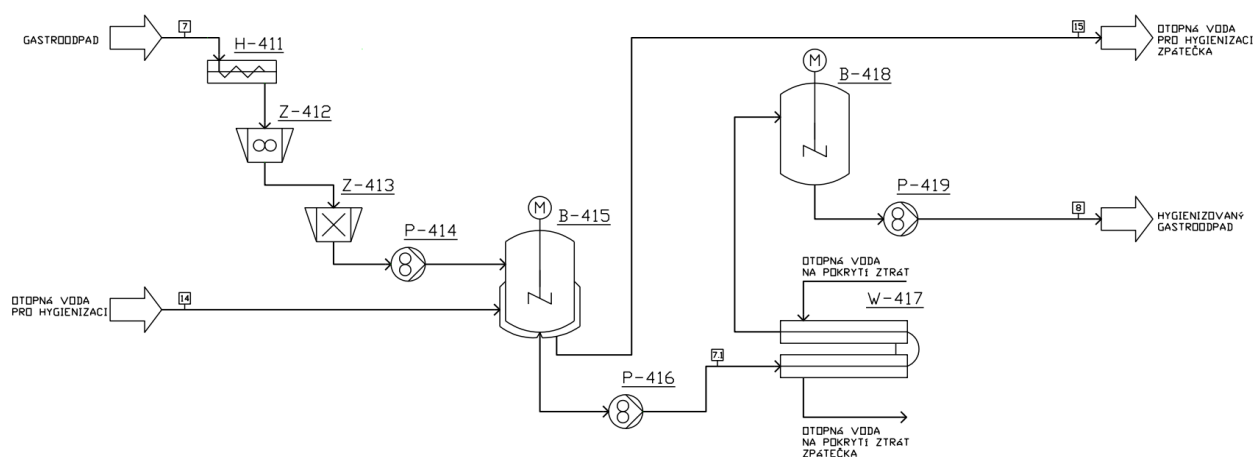
Firma nabízí drtiče o výkonech $100 \div 2\,000 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$ a s příkonem motoru v rozmezí $5 \div 45 \text{ kW}$. Na základě těchto parametrů lze očekávat, že potřebný příkon pro nejnižší výkon bude 5 kW. Konkrétní podobu drtiče je nutné poptat přímo u firem, které drtiče vyrábějí. Možná podoba je na obrázku 33.



Obrázek 33 Dvouhřídelový drtič odpadu firmy Terier [49]

4.3 Návrh celkové podoby linky na zpracování gastroodpadu

Na základě návrhových výpočtů a kriteriálního rozhodování v předchozí podkapitole bylo vytvořeno PFD schéma hygienizační linky, která dokáže hygienizovat gastroodpad pro zpracování v BPS. Toto schéma je v příloze 2 a jeho hlavní část je na obrázku 34.



Obrázek 34 PFD schéma linky na zpracování gastroodpadu

B-415 míchaná nádoba s duplikátorovým pláštěm, B-418 zásobní nádrž na hygienizovaný gastroodpad, H-411 šnekový dopravník s násypkou, P-414 rotační loubové čerpadlo, P-416 rotační loubové čerpadlo, P-419 rotační loubové čerpadlo (dávkovací), W-417 výdržník s krytím ztrát, Z-413 dvouhřídelový drtič, Z-413 macerátor s odlučovačem

5 Náklady CAPEX a OPEX

V této kapitole jsou provedeny výpočty očekávaných investičních nákladů (označovaných také jako „CAPEX“ z anglického capital expenditures) a provozních nákladů (označovaných také jako „OPEX“ z anglického operational expenses) [50]. Na základě těchto hodnot je provedena citlivostní analýza a zhodnocení rentability projektu. Tato ekonomická studie je součástí přílohy 5.

5.1 Náklady CAPEX

Výpočet očekávaných investičních nákladů je založen na odhadu pořizovacích cen klíčových zařízení linky. Uvažované ceny jednotlivých zařízení jsou patrné z tabulky 18. Tyto odhady vyplývají z cen obdobných zařízení či výpočtů prováděných dle charakteristické vlastnosti zařízení [51]. Celková pořizovací cena všech zařízení vychází na 2 970 000 Kč.

Tabulka 18 Ceny pořizovaných zařízení

Položka	cena za kus (CZK)	kusů	celkem (CZK)
Příjmová nádoba se šnekovým dopravníkem 1 kW	130 000	1	130 000 Kč
Dvouhřídelový drtič 5 kW	320 000	1	290 000 Kč
Macerátor 2,2 kW	280 000	1	280 000 Kč
Loubové čerpadlo 1,1 kW	180 000	4	720 000 Kč
Duplikátorová nádoba na hygienizaci 0,33 m ³ (+míchadlo, motor 1 kW)	325 000	1	325 000 Kč
Výdržník (trubka v trubce, 12 m ²)	275 000	1	275 000 Kč
Zásobní tank na hygienizovaný gastroodpad 8 m ³ (+míchadlo, motor 5 kW)	950 000	1	950 000 Kč
			2 970 000 Kč

Další zásadní položkou investičních nákladů je pořizovací cena stavby, ve které linka bude fungovat. V tomto případě je uvažována částka 1 200 000 Kč, která je vyhrazena na stavbu či úpravu existujících prostor. Po sečtení těchto dvou hodnot lze dospět k částce 4 170 000 Kč, ve které však nejsou zahrnuty náklady na úpravu okolní infrastruktury, na projekční a inženýrskou činnost či na nepředvídatelné náklady. Tyto náklady jsou určeny na základě očekávaných podílů a lze je vidět v tabulce 19.

Tabulka 19 Celkové investiční náklady

ISBL (stavby + technologie)			4 170 000 Kč
OSBL (úpravy okolní infrastruktury)			834 000 Kč
Projekční a inženýrská činnost			500 400 Kč
Nepředvídatelné náklady			500 400 Kč
Celkem			6 004 800 Kč
Design factor		1,05	
Celková hodnota investice			6 305 040 Kč

Na úpravu okolní infrastruktury je uvažováno 20 % z nákladů na stavby a technologie. Na projekční a inženýrskou činnost a na nepředvídatelné náklady je shodně uvažováno 10 % ze součtu nákladů na stavby a technologie a nákladů na úpravu okolní infrastruktury. Celkově jde o částku

6 004 800 Kč. Tato hodnota je navíc přenásobena „design faktorem“, který částku navyšuje o určité procento z této hodnoty, aby pokryl případné náklady na doladování linky. Velikost design faktoru závisí na typu použité technologie, a protože tato linka představuje kombinaci již dobře známých procesů a zařízení, je zvolen design faktor s hodnotou 1,05 [51]. Celkové očekávané investiční náklady tak představují částku 6 305 040 Kč.

Rozdělením jednotlivých zařízení do příslušných odpisových skupin podle přílohy 1 Zákona č. 586/1992 Sb. [52] vznikla tabulka 20. Z ní je patrné, jaké náklady budou odepisovány kterým poměrem a jak dlouho. Do skupiny 2 patří šnekový dopravník, dvouhřídelový drtič, macerátor a čerpadla, do skupiny 3 patří hygienizační nádoba s duplikátorem, výdržník a zásobní tank. Do skupiny 5 patří pouze náklady na stavbu.

Tabulka 20 Rozdělení hmotného majetku do odpisových skupin

Odpisy	Doba odepisování	% 1.rok	% další	Investiční náklady
Odpisová skupina 1	3 roky	20	40	-
Odpisová skupina 2	5 let	11	22,25	1 420 000 Kč
Odpisová skupina 3	10 let	5,5	10,5	1 550 000 Kč
Odpisová skupina 4	20 let	2,15	5,15	-
Odpisová skupina 5	30 let	1,4	3,4	1 200 000 Kč
Odpisová skupina 6	50 let	1,02	2,02	-

5.2 Náklady OPEX

Provozní náklady se rozdělují na přímé provozní náklady, nepřímé provozní náklady a distribuční náklady [50]. Do přímých provozních nákladů spadají náklady na energie, na zaměstnance, údržbu, spotřební materiál a na rezervu. Detailní rozpis poskytuje tabulka 21.

Hygienizační linka spotřebovává teplo a elektrickou energii. Náklady na teplo jsou považovány za nulové, protože zdrojem tepla bude KGJ. Náklady na elektrickou energii jsou vypočteny vynásobením roční spotřeby všech zařízení a ceny dodávky jednotky elektrické energie, v tomto případě stanovenou na částku 5 600 Kč za 1 MWh. V kapitole 4 bylo vysvětleno, jakým způsobem byly určeny nominální příkony jednotlivých zařízení, ze kterých plynuly rezervy pro náhlé vyšší zatížení. Zároveň ne všechna zařízení budou fungovat celou provozní dobu, např. míchací zařízení je možné spouštět pouze v určitých intervalech. Proto jsou náklady na elektrickou energii uvažovány jako 60 % z maximální možné spotřeby odpovídající plnému příkonu po celou provozní dobu.

Dále jsou do přímých provozních nákladů zahrnuty náklady na zvýšení mzdy stávajících dvou pracovníků BPS zahrnující povinné odvody zaměstnavatele státu. Jejich práce by měla být v podstatě stejná jako dosavadní činnost v provozu bez hygienizační linky, protože by linka

neměla vyžadovat souvislou obsluhu. Dodávky gastroodpadu by měla realizovat svozová firma, která má prostor pro marži plynoucí z rozdílu cen likvidace gastroodpadu se svozem a bez svozu popisovaném v podkapitole 2.3.2.

Tabulka 21 Provozní náklady

Provozní náklady	878 394	Kč/rok
Přímé provozní náklady	770 034	Kč/rok
Energie		
Elektrický příkon linky		17,5 kW
Cena elektřiny dle ceníku dodavatele	5 600	Kč/MWh
Roční spotřeba elektrické energie		89,3 MWh
Náklady na elektrickou energii	499 800	Kč/rok
Osobní náklady		
Navýšení mzdy 2 stávajícím zaměstnancům o 5000 Kč měsíčně	160 560	Kč/rok
Údržba		
Náklady na údržbu	63 050	Kč/rok
Spotřební materiál		
Náklady na spotřební materiál	31 525	Kč/rok
Rezerva		
Rezerva na provozní náklady	15 099	Kč/rok
Nepřímé provozní náklady	108 359	Kč/rok
Pojištění	31 525	Kč/rok
Podíl na podnikové režii	76 834	Kč/rok
Distribuční náklady	0	Kč/rok
Transport a distribuce	0	Kč/rok

Roční náklady na údržbu jsou odhadnuty jako 1 % z celkových investičních nákladů, náklady na spotřební materiál jako 0,5 % stejné hodnoty a rezerva představuje 2 % všech přímých provozních nákladů (kromě rezervy samotné). Dohromady přímé provozní náklady vycházejí na 766 333 Kč ročně.

Nepřímé provozní náklady zahrnují náklady na pojištění (5 % z investičních nákladů) a na podíl na podnikové režii (40 % z se součtu navýšení mezd a ½ nákladů na údržbu). Distribuční náklady nejsou očekávány, proto jsou považovány za nulové.

Celkové provozní náklady na provoz hygienizační linky vycházejí na částku 878 394 Kč ročně, což odpovídá přibližně 13,7 % celkových investičních nákladů potřebných pro výstavbu linky. Ve fázi výstavby linky se předpokládá potřeba 10 % provozních nákladů, celková investice nutná pro výstavbu a zprovoznění linky je rovna 6 392 879 Kč.

5.3 Zhodnocení rentability návrhu

Pro vyhodnocení rentability navrhované linky je třeba stanovit její příjmy. Ty jsou tvořeny dvěma hlavními složkami – inkasováním poplatků za likvidaci gastroodpadu a snížením potřeby nákupu

kukuřičné siláže o určité množství. Dalšími možnými příjmy do projektu jsou například dotace, ty však nejsou uvažovány.

Při úvaze, že linka zpracovává $100 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$ gastroodpadu a inkasuje poplatek 1 000 Kč za tunu zpracovaného gastroodpadu a zároveň snižuje o $81 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$ množství potřebné kukuřičné siláže s cenou 1 400 Kč za tunu, lze dojít k číslu 1 813 900 Kč ročně. Tato hodnota vychází z předpokladu provozní doby 8 500 hodin ročně a je patrná z tabulky 22.

Tabulka 22 Roční příjmy

Provozní vlastnosti linky		
Roční provozní doba	8 500	h
Uvažované množství gastroodpadu ke zpracování	100	kg/h
Uvažované ušetřené množství kukuřičné siláže	81	kg/h
Cena nahrazované kukuřičné siláže	1 400	Kč/t
Poplatek za likvidaci gastroodpadu	1 000	Kč/t
Roční příjmy		
	1 813 900	Kč/rok
Snížení nákladů na kukuřičnou siláž	963 900	Kč/rok
Příjmy z likvidace gastroodpadu	850 000	Kč/rok
Roční příjem ze záměny části substrátu	1 813 900	Kč/rok

Pro ukázkový příklad financování projektu linky je uvažována investice provozovatelů BPS ve výši 2 650 420 Kč a bankovní úvěr ve výši 3 500 000 Kč s ročním úrokem 9,00 % a dobou úročení šest let, jehož kalkulace je v tabulce 23. V případě realizace projektu je třeba brát v úvahu individuální možnosti provozovatele a aktuální situaci na trhu s bankovními úvěry.

Tabulka 23 Kalkulace bankovního úvěru

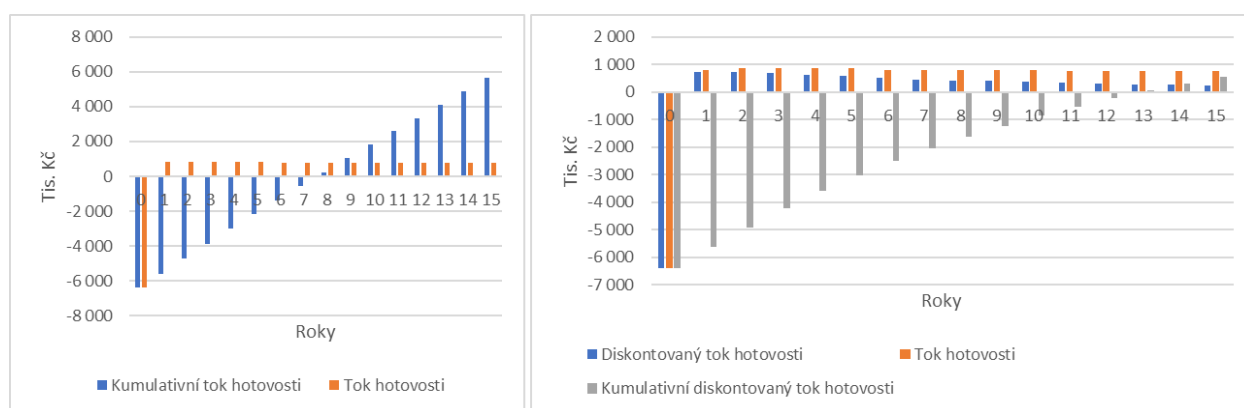
Úvěr				
Úvěr	3 500 000 Kč			
Úroková sazba	9,00 % p.a.			
Doba úročení	6,00 let			
rok	anuita	splátka úroku	splátka jistiny	zůstatek půjčky
	1 780 219 Kč	315 000 Kč	465 219 Kč	3 034 781 Kč
	2 780 219 Kč	273 130 Kč	507 089 Kč	2 527 692 Kč
	3 780 219 Kč	227 492 Kč	552 727 Kč	1 974 965 Kč
	4 780 219 Kč	177 747 Kč	602 472 Kč	1 372 492 Kč
	5 780 219 Kč	123 524 Kč	656 695 Kč	715 797 Kč
	6 780 219 Kč	64 422 Kč	715 797 Kč	0 Kč

Pro zhodnocení rentability projektu existuje více druhů ukazatelů jako je prostá doba návratnosti, návratnost investice, index rentability nebo vnitřní výnosové procento [50]. Shrnutí těchto hlavních ukazatelů ukazuje tabulka 24. Podle prosté doby návratnosti 7,96 let lze konstatovat, že je projekt rentabilní. Stejně tak podle návratnosti 5,89 % se projekt vyplatí realizovat.

Tabulka 24 Shrnutí finančního hodnocení projektu

Shrnutí projektu		
Fixní kap. investice	tis. Kč	6 305
Celkové kapitálové investice (CAPEX + 10 % OPEX)	tis. Kč	6 393
Průměrný roční tok hotovosti	tis. Kč	803
Doba hodnocení projektu	roky	15
Diskontní sazba	%	8,0%
Prostá doba návratnosti	roky	7,96
ROI	%	5,89%
NPV	tis. Kč	561
IRR	%	9,44%
IRR vlastních zdrojů	%	10,32%
Index rentability	-	1,09
Reálná doba návratnosti	roky	13,79

Vynesáním hodnot peněžních toků projektu v jednotlivých letech do grafu je možné získat rychle čitelnou informaci, jak si projekt finančně povede. To lze vidět na obrázku 35.



Obrázek 35 Očekávaný finanční vývoj projektu

Při uvažování diskontní sazby ve výši 8 % se však doba návratnosti mění na reálnou dobu návratnosti, která bere v potaz časovou hodnotu peněz [50]. Ta vychází na 13,79 let, což je doba, která je velmi blízká uvažované životnosti projektu (15 let). V takovém případě je vhodnost této investice diskutabilní.

Pro zlepšení finančních ukazatelů tohoto projektu lze snížit investiční náklady, zvýšit příjmy nebo zkombinovat obojí. Jmenovitě je možné například:

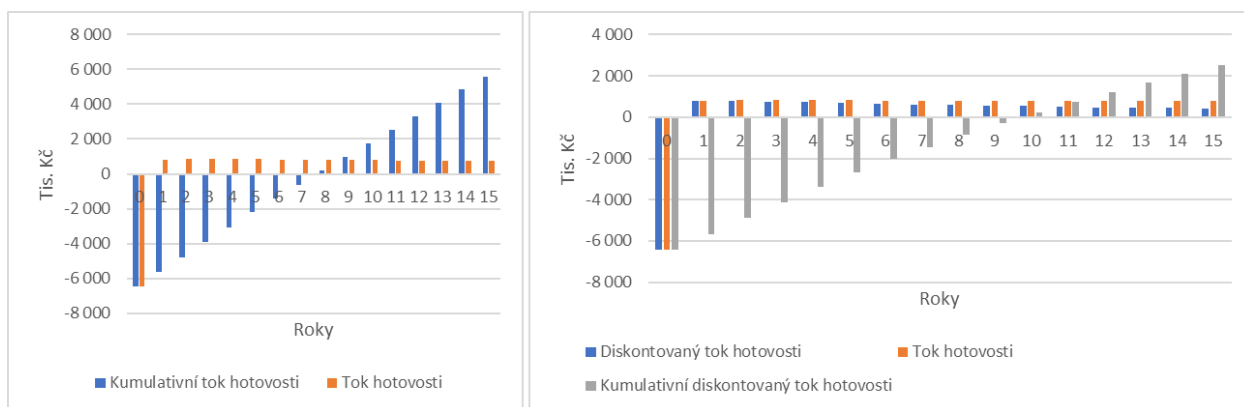
- umístit linku do budovy s dalším projektem využívajícím teplo z KGJ,
- zabudovat linku do kontejneru a ušetřit náklady na stavbu budovy,
- zásobní tank, představující nejdražší část linky, změnit z nerezového na plastový,
- získat dalšího investora či dotační podporu od měst v okolí, ČR nebo EU,
- zvýšit poplatek za likvidaci gastroodpadu,
- po odzkoušení funkčnosti linky zvýšit množství zpracovávaného gastroodpadu.

5.4 Citlivostní analýza návrhu

Za účelem zhodnocení různých potenciálních scénářů, které by měly vliv na hotovostní toky linky, lze provést citlivostní analýzu, která tyto změny simuluje. V této části je provedena citlivostní analýza změn diskontní sazby, investičních nákladů a nákupních cen a likvidačních poplatků.

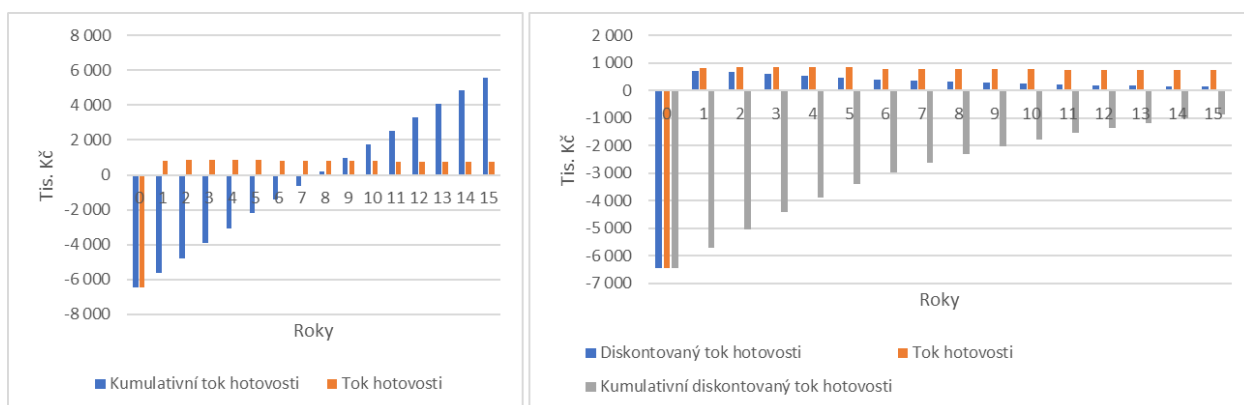
Změna diskontní sazby

Vliv snížení diskontní sazby na polovinu původně uvažované hodnoty, tedy na 4 %, je patrný z obrázku 36. Zatímco prostá doba návratnosti zůstává stejná, reálná doba návratnosti se snížila na přívětivějších 10,76 let.



Obrázek 36 Vliv snížení diskontní sazby na 4 %

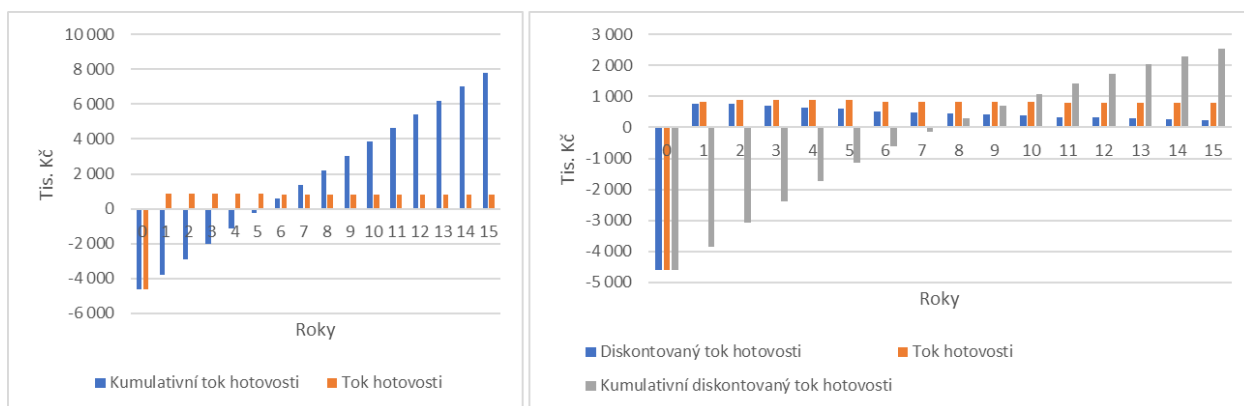
V případě zvýšení diskontní sazby na hodnotu 12 % je vliv na reálnou dobu návratnosti opačný. Jak lze vidět na obrázku 37, kumulativní diskontovaný tok hotovosti v grafu nepřekročí nulovou hodnotu na ose y. Reálná doba návratnosti se zvýší na 17,37 let, což je více než plánovaná doba životnosti projektu, a tak investici v takovém případě nelze vůbec doporučit.



Obrázek 37 Vliv zvýšení diskontní sazby na 12 %

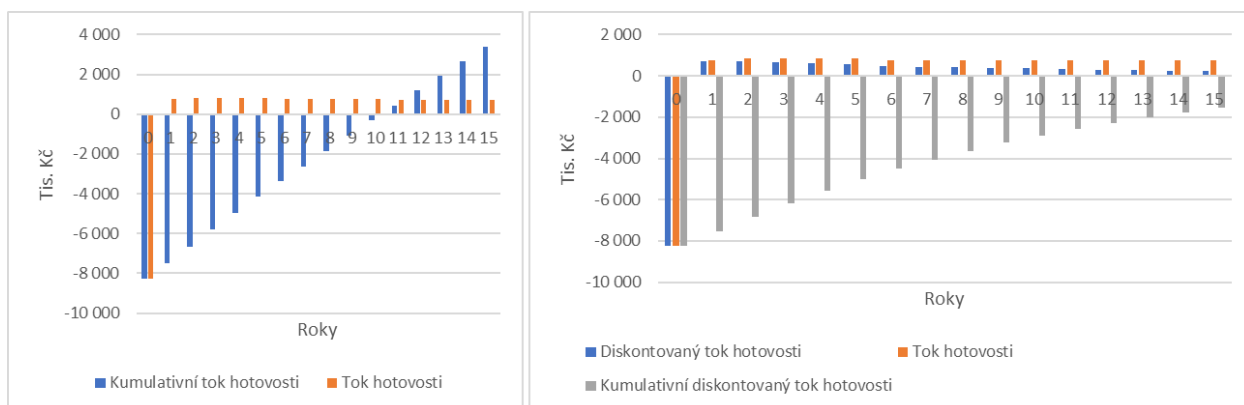
Změna investičních nákladů

Při úvaze nulových nákladů na stavbu budovy, kde by hygienizační linka stála, a zachování původní diskontní sazby ve výši 8 % se výrazně zlepší toky hotovosti projektu, jak to ukazuje obrázek 38. Reálná doba návratnosti by v tomto scénáři klesla na 9,67 let, prostá doba návratnosti dokonce na pouhých 5,58 let.



Obrázek 38 Vliv snížení investičních nákladů

Pokud by bylo nutné postavit zcela novou budovu s dvakrát vyššími náklady, než předpokládá původní varianta, projekt by nemohl být doporučen k realizaci. Prostá doba návratnosti by sice byla 10,63 let, ale reálná doba návratnosti by přesáhla uvažovanou životnost projektu, jak to naznačuje obrázek 39.

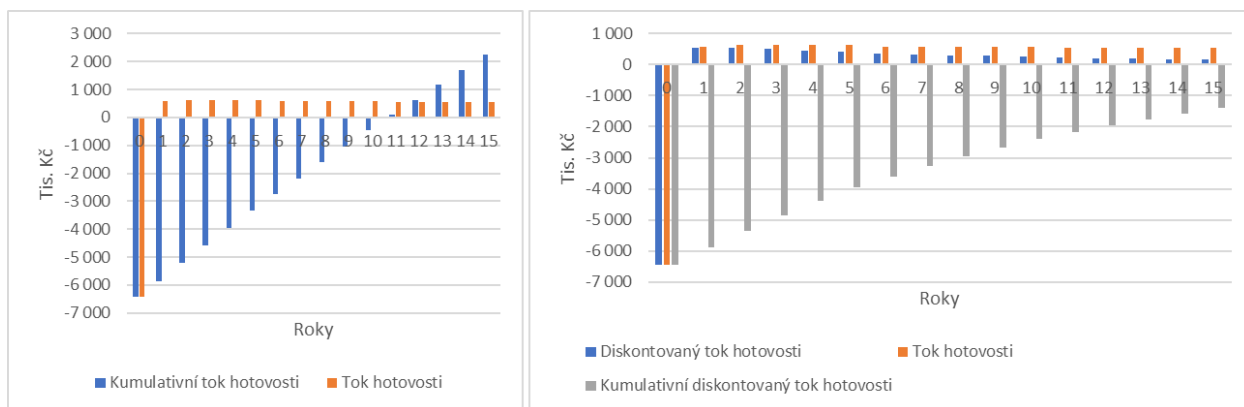


Obrázek 39 Vliv zvýšení investičních nákladů

Změna nákupních cen a likvidačních poplatků

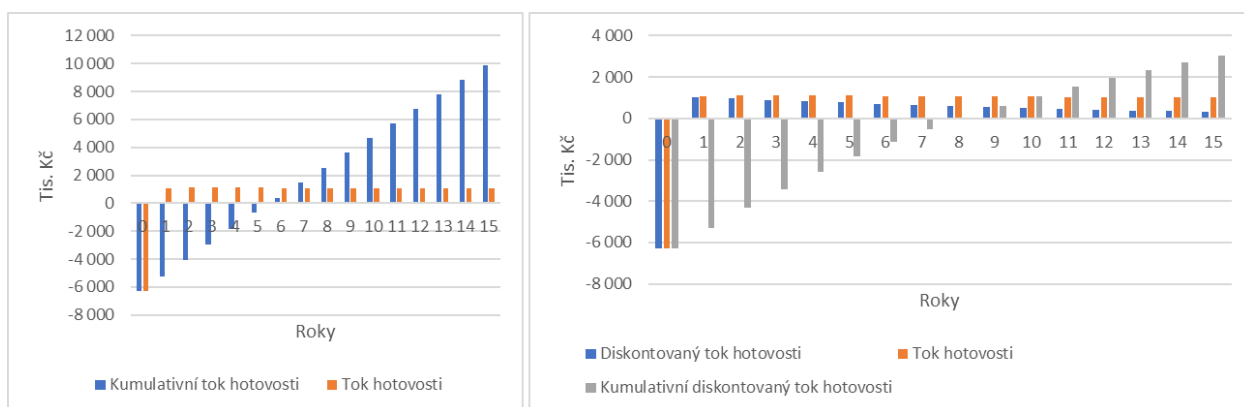
Je pravděpodobné, že se budou v průběhu provozu projektu měnit nákupní ceny kukuřičné siláže a likvidační poplatky gastroodpadu. Pro vyhodnocení tohoto vlivu jsou uvažovány dva scénáře. Snížení nákupní ceny kukuřičné siláže a zvýšení likvidačního poplatku.

Při snížení nákupní ceny kukuřičné siláže na 1 000 Kč za tunu z původně uvažovaných 1 400 Kč za tunu se opět zvýší reálná doba návratnosti nad uvažovanou životnost projektu, jak je to patrné z obrázku 40, a pro projekt to představuje závažnou hrozbu.



Obrázek 40 Vliv snížení nákupní ceny kukuřičné siláže

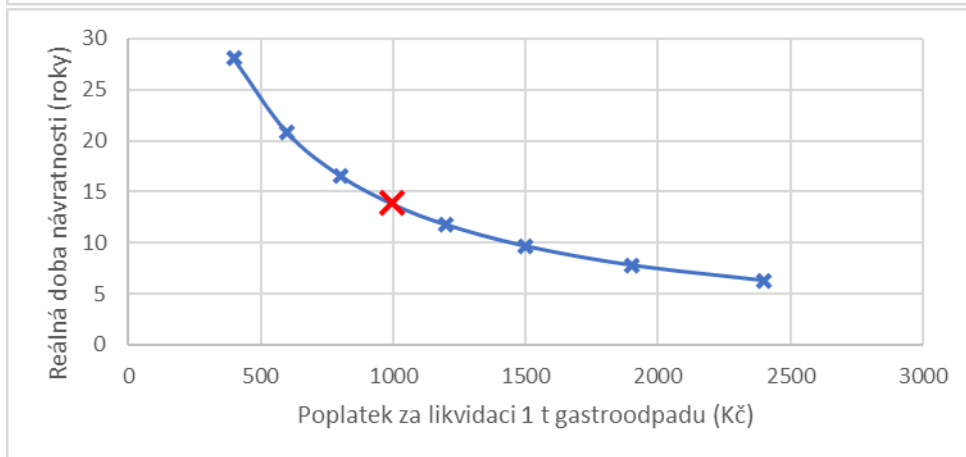
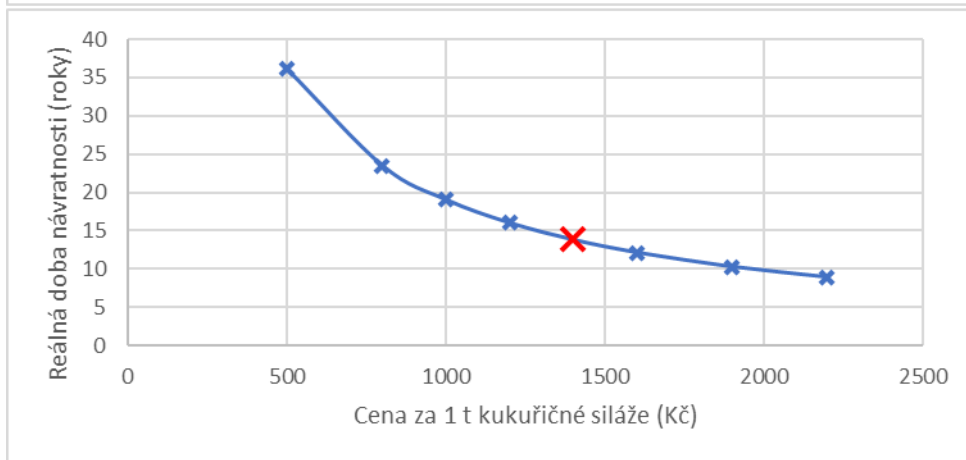
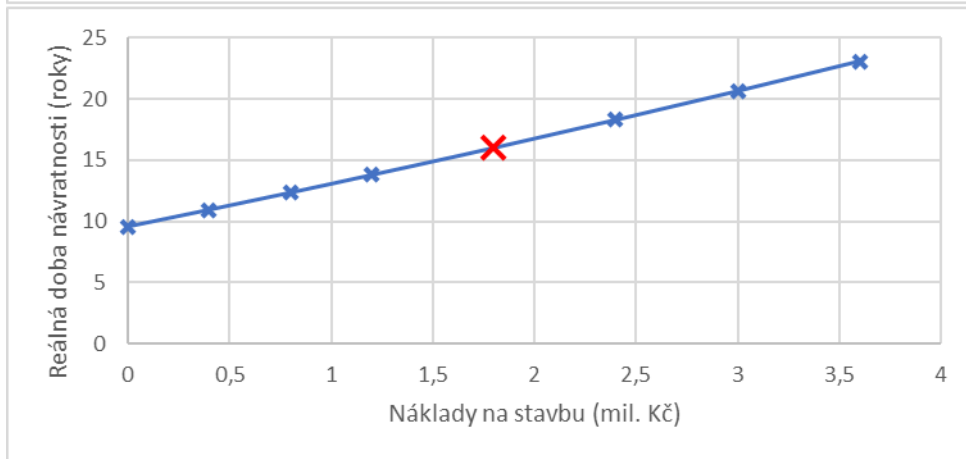
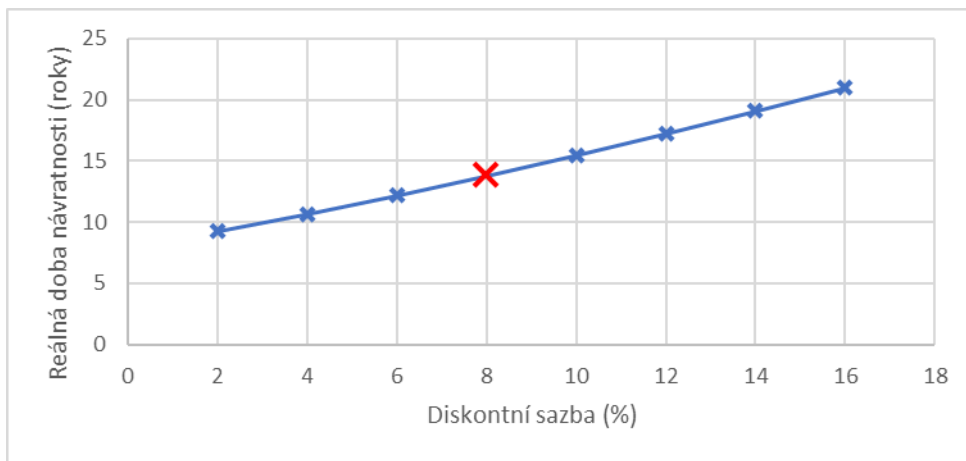
Naopak příležitost představuje zvýšení likvidačních poplatků. Pro zhodnocení vlivu je uvažováno zvýšení z 1 000 Kč na 1 400 Kč. Tato změna by měla velmi pozitivní přínos, reálná doba návratnosti projektu by odpovídala 10,15 rokům, jak naznačuje obrázek 41.



Obrázek 41 Vliv zvýšení likvidačního poplatku

Existuje mnoho scénářů, jak se tyto změny mohou vzájemně kombinovat. Je zřejmé, že mohou mít klíčový dopad na rentabilitu projektu, jak ukazuje analýza citlivosti výše. Z tohoto důvodu je důležité brát je v úvahu a při případné realizaci s nimi počítat.

Citlivosti reálné doby návratnosti na zmiňovaných proměnných jsou zpracovány do grafů, které představuje obrázek 42. Podle nich lze rychle určit, jaký vliv má případná změna na reálnou dobu návratnosti a zdali se vyplatí projekt realizovat či nikoli.



Obrázek 42 Citlivosti reálné doby návratnosti na jednotlivých parametrech

Závěr

V této práci byl zkoumán potenciál využití gastroodpadu v bioplynových stanicích. Analýza ukázala, že gastroodpad v nich může být zpracován s pozitivním ekonomickým přínosem a že představuje perspektivní možnost pro rozvoj obnovitelných zdrojů energie. Navíc nabízí vhodné řešení, jak nakládat s gastroodpadem, který se podle současných trendů v budoucnu nebude smět skládkovat.

Navržená linka pro zpracování gastroodpadu je v souladu s legislativními požadavky a nabízí efektivní řešení, jak gastroodpad hygienizovat. Hodnocení ekonomické rentability projektu pomocí rozvahy CAPEX a OPEX potvrzuje, že investice do takového zařízení může být výhodná i bez dotací, což v oblasti obnovitelných zdrojů nebývá časté. Citlivostní analýza provedená na konci rozvahy ukázala hrozby a příležitosti pro projekt, se kterými je třeba v případě realizace počítat.

Na základě provedené teoretické rešerše a analýzy využití gastroodpadu v bioplynových stanicích byla navržena linka pro BPS Chotýčany. Tento návrh je ale možné přizpůsobit kterékoli jiné BPS. Výsledky této práce přinášejí užitečné poznatky pro další rozvoj využití gastroodpadu a mohou přispět k udržitelnému rozvoji energetického sektoru, který je v současnosti tolik diskutovaným tématem.

Dalších výzev v oblasti zpracování gastroodpadu v bioplynových stanicích je mnoho. První z nich je převod teoretických poznatků do praktického využití. Je nezbytné provést důkladná testování vlastností gastroodpadu a optimalizovat technologie zpracování gastroodpadu na základě těchto výsledků. Zřízení laboratorní testovací linky, která by umožnila testování a měření potřebných dat, by mohlo přispět k účinnějšímu využití gastroodpadu v bioplynových stanicích. Dále by bylo vhodné provést experimentálních měření, která by potvrdila nebo vyvrátila předpoklady použité v oblasti návrhových výpočtů, díky čemuž by bylo následně možné návrh upravit.

Dalším významným aspektem je motivace domácností ke správnému třídění gastroodpadu. Zajištění správného třídění je klíčové, aby gastroodpad neobsahoval látky (např. léky či chemikálie), které by mohly ohrozit proces fermentace. Proto je velmi důležitá i edukace a rozšiřování povědomí o principech fungování bioplynových stanic.

Seznam použitých zdrojů

- [1] POPKOSTOVA, Yana. *Europe's energy crisis conundrum : origins, impacts and way forward*. Publications Office of the European Union, 2022. ISBN 978-92-9462-085-9. Dostupné také z: <https://data.europa.eu/doi/10.2815/508124>
- [2] EVROPSKÁ RADA. *Energy prices and security of supply* [online]. Brusel: Evropská komise, Generální ředitelství pro komunikaci, 2022 [cit. 2022-10-18]. Dostupné z: <https://www.consilium.europa.eu/en/policies/energy-prices-and-security-of-supply/>
- [3] EVROPSKÁ RADA. *Where does the EU's energy come from? - Consilium* [online]. Brusel: Evropská komise, Generální ředitelství pro komunikaci, 2022 [cit. 2022-10-20]. Dostupné z: <https://www.consilium.europa.eu/en/infographics/where-does-the-eu-s-energy-come-from/>
- [4] EUROSTAT. *Energy statistics - an overview - Statistics Explained* [online]. Lucemburk: Eurostat, 2022 [cit. 2022-10-20]. Dostupné z: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Energy_statistics_-_an_overview#Primary_energy_production
- [5] ODDĚLENÍ STATISTIKY A SLEDOVÁNÍ KVALITY. *Roční zpráva o provozu elektrizační soustavy České republiky za rok 2021* [online]. 21.6.2022. Jihlava: Energetický regulační úřad, 2022 [cit. 2023-07-08]. Dostupné z: <https://www.eru.cz/rocn-zprava-o-provozu-elektrizacni-soustavy-cr-pro-rok-2021>
- [6] BUFKA, Aleš, Jana VEVERKOVÁ, Miloslav MODLÍK a Jana BLECHOVÁ-TOURKOVÁ. *Obnovitelné zdroje energie: Obnovitelné zdroje energie v roce 2020*. Praha: Ministerstvo průmyslu a obchodu, 2021.
- [7] STRAKA, František a Michal DOHÁNYOS. *Bioplyn: [příručka pro výuku, projekci a provoz bioplynových systémů]*. 2., rozš. a dopl. vyd. Praha [i.e. Říčany u Prahy]: GAS, 2006. ISBN 80-732-8090-6.
- [8] SCHULZ, Heinz a Barbara EDER. *Bioplyn v praxi: teorie - projektování - stavba zařízení - příklady*. Ostrava: HEL, 2004. ISBN 80-861-6721-6.

- [9] DEUBLEIN, Dieter a Angelika STEINHAUSER. *Biogas from waste and renewable resources: an introduction*. 2nd, rev. and expanded ed. Weinheim: Wiley-VCH, 2011. ISBN 978-3-527-32798-0.
- [10] MINISTERSTVO ZEMĚDĚLSTVÍ. *Desatero bioplynových stanic* [online]. Praha: Ministerstvo zemědělství, 2007 [cit. 2023-01-16]. Dostupné z: <https://i.iinfo.cz/files/podnikatel/urs/Desatero-118457095824755.pdf>
- [11] ŽÁKOVEC, Jan. *Biometan: hospodárné užití obnovitelných zdrojů energie*. Praha: GAS, 2012. GAS. ISBN ISBN978-80-7328-276-9.
- [12] ŽENČUCH, Jan, jednatel BP - PROFIT, spol. s r.o. [ústní sdělení]. [cit. 2022-12-16].
- [13] Google Earth. In: *Google Earth* [online]. Mountain View: Google [cit. 2023-06-29]. Dostupné z: https://earth.google.com/web/search/Chot%20c3%bd%20c4%8dany/@49.06511649,14.52170799,523.94387419a,438.29299306d,35y,0h,0t,0r/data=CnUaSxJFCiQweDQ3NzM0ZDcxZTRlNzVkOWI6MHg0MDBhZjBmNjYxNGU1YzAZ393KEp2ISEAhxDXj2YoKLU AqC0Nob3TDvcSNYW55GAEgASImCiQJuqNskr82REARrHrhVGAzREAZmGMo_ZV-DcAhFCOKLprBDcA
- [14] ČESKÁ REPUBLIKA. Vyhláška o podrobnostech nakládání s odpady. In: *Sbírka zákonů*. Praha: Tiskárna Ministerstva vnitra, 2021, ročník 2021, Částka 119, číslo 273.
- [15] EVROPSKÁ KOMISE. *Nářízení komise (EU) č. 142/2011*. In: . Brusel, 2011, ročník 2011, 142/2011.
- [16] Zpracovatelé vedlejších živočišných produktů. In: *Státní veterinární správa* [online]. Praha: Ústřední veterinární správa, 2023 [cit. 2023-06-29]. Dostupné z: <https://www.svscr.cz/registrovane-subjekty-svs/zpracovatele-vedlejsich-zivocisnych-produktu/>
- [17] EVROPSKÝ PARLAMENT. *Nářízení Evropského parlamentu a Rady (ES) č. 1069/2009*. In: . Štrasburk, 2009, 1069/2009.
- [18] ODBOR STATISTIKY OBCHODU, DOPRAVY, SLUŽEB, CESTOVNÍHO RUCHU A ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ. *Produkce, využití a odstranění odpadů: za období 2020* [online]. Praha: Český statistický úřad, 2021 [cit. 2023-01-05]. Č. j. 03758/2021.

Dostupné z: <https://www.czso.cz/documents/10180/143330119/28002021.pdf/41f799e9-3ffb-4702-a517-0c2dc1525144?version=1.3>

- [19] INFORMAČNÍ SYSTÉM ODPADOVÉHO HOSPODÁŘSTVÍ. *Produkce a nakládání s odpady v roce 2021*. Praha: Ministerstvo životního prostředí, 2022. Dostupné také z: [https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/odpady_podrubrika/\\$FILE/OODP-Produkce_a_nakladani_2021-20221031.pdf](https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/odpady_podrubrika/$FILE/OODP-Produkce_a_nakladani_2021-20221031.pdf)
- [20] EKO-KOM A.S. Skladba směsného komunálního odpadu z domácností ČR. *EKO-KOM - Systém sběru a recyklace obalových odpadů* [online]. Praha: EKO-KOM, a.s., 2019 [cit. 2023-02-20]. Dostupné z: <https://www.ekokom.cz/skladba-smesneho-komunalniho-odpadu-z-domacnosti-cr/>
- [21] KUBÍČKOVÁ, Lea, Lucie VESELÁ a Marcela KORMAŇÁKOVÁ. Food Waste Behaviour at the Consumer Level: Pilot Study on Czech Private Households. *Sustainability*. 2021, 13(20). ISSN 2071-1050. Dostupné z: doi:10.3390/su132011311
- [22] SKUTEČNĚ ZDRAVÁ ŠKOLA. Plýtvání potravinami ve školních jídelnách... In: *Skutečně zdravá škola* [online]. Brno: Skutečně zdravá škola, z.s., 2019 [cit. 2023-02-22]. Dostupné z: <https://www.skuteczdravaskola.cz/novinky-ze-skol/novinky-ze-skuteczdrave-skoly/plytvani-potravinami-ve-skolnich-jidelnach-pokracuje-nektere-skoly-ale-ukazuji-ze-existuji-moznosti-zlepseni>
- [23] ZŠ LITVÍNŮV. *Výroční zpráva školy: školní rok 2021 - 2022*. ZŠ Litvínov – Hamr, Mládežnická 220, okres Most, 2022. Dostupné také z: <https://www.zshamr.cz/skola/dokumenty-ke-stazeni/?page=2>
- [24] HEBÁKOVÁ, , RATINGER, VANČUROVÁ, PILECKÁ, KEBOVÁ a BOŠKOVÁ. *Výsledky měření potravinových ztrát a odpadu ve vybraných provozovnách veřejného stravování*. Praha: TC AVČR, Median, Zachraň jídlo a ÚZEI, 2019. Dostupné také z: <https://redpot.strast.cz/cs/storage/a801702c2370ba4d59f446a9f7b741176e3b2c5b?uid=a801702c2370ba4d59f446a9f7b741176e3b2c5b>
- [25] ŠEFROVÁ, Kateřina. Konec vyhazování jídla. Obchody budou muset... *Hospodářské noviny* [online]. 2016 [cit. 2023-02-23]. Dostupné z: <https://archiv.hn.cz/c1-65256640-obchody-prestanou-vyhazovat-jidlo>

- [26] MINISTERSTVO ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ. *Produkce potravinových odpadů v roce 2020* [online]. In: . Praha, 2022 [cit. 2023-02-23]. Dostupné z: [https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/odpady_podrubrika/\\$FILE/OODP-Produkce_potravinovy_odpad-20221110.pdf](https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/odpady_podrubrika/$FILE/OODP-Produkce_potravinovy_odpad-20221110.pdf)
- [27] COMPOST MAGAZINE. The Essential Role of the Carbon – Nitrogen Ratio in Composting. In: *Compost magazine - Composting tips, advice and science*. [online]. [cit. 2023-02-18]. Dostupné z: <https://www.compostmagazine.com/compost-carbon-nitrogen-ratio/>
- [28] SAYARA, Tahseen a Antoni SÁNCHEZ. A Review on Anaerobic Digestion of Lignocellulosic Wastes: Pretreatments and Operational Conditions. *Applied Sciences*. 2019, **9**(21). ISSN 2076-3417. Dostupné z: doi:10.3390/app9214655
- [29] SALANGSANG, Maria, Mutsumi SEKINE, Shinichi AKIZUKI, Hiroyuki SAKAI, Norio KUROSAWA a Tatsuki TODA. Effect of carbon to nitrogen ratio of food waste and short resting period on microbial accumulation during anaerobic digestion. *Biomass and Bioenergy* [online]. 2022, **162** [cit. 2023-02-18]. ISSN 09619534. Dostupné z: doi:10.1016/j.biombioe.2022.106481
- [30] MARIUS PEDERSEN. Ceník svozu gastroodpadů. In: *Marius Pedersen a.s.* [online]. Teplice, 2022 [cit. 2023-02-19]. Dostupné z: <https://www.mariuspedersen.cz/file/edee/2022/07/cenik-svozu-gastroodpadu-2022-od-01.07.2022.pdf>
- [31] ANAEROBIC POWER BIOGAS BENEŠOV. *Základní ceník zpracování odpadů Anaerobic Power Biogas Benešov* [online]. In: . Příbyšice, 2022 [cit. 2023-02-19]. Dostupné z: <http://apbb.cz/cenik/>
- [32] CHALA, Bilhate, Hans OECHSNER, Sajid LATIF a Joachim MÜLLER. Biogas Potential of Coffee Processing Waste in Ethiopia. *Sustainability* [online]. 2018, **10**(8) [cit. 2023-02-19]. ISSN 2071-1050. Dostupné z: doi:10.3390/su10082678
- [33] SHIN, Hang-sik a Jong-ho YOUN. Conversion of food waste into hydrogen by thermophilic acidogenesis. *Biodegradation*. 2005, **16**(1), 33-44. ISSN 0923-9820. Dostupné z: doi:10.1007/s10531-004-0377-9

- [34] FAUCETTE, Britt, K. DAS a Mark RISSE. *Evaluation of Aerated Container Composting of University Preconsumer and Postconsumer Food Waste*. University of Georgia, 2000.
- [35] DUFEK, Milan. *Termodynamika látkových soustav: příklady a úlohy*. Vyd. 3. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2000. ISBN 80-010-2167-X.
- [36] ČESKÝ STATISTICKÝ ÚŘAD. *Počet obyvatel v obcích České republiky k 1. 1. 2021*. Praha: Český statistický úřad, 2022. Dostupné také z: <https://www.czso.cz/documents/10180/165603907/13007221n03.pdf/861e0df0-61bc-46ba-8e3e-8de656146466?version=1.2>
- [37] Mapy Google. In: *Google* [online]. Mountain View: Google, 2022 [cit. 2022-12-15]. Dostupné z: <https://www.google.com/maps/@49.0667021,14.4813364,11z?entry=ttu>
- [38] GE JENBACHER GMBH & CO OHG. *Jenbacher gas engines - Technical Specification: JMS 312 GS-B.L* [online]. Jenbach: GE Jenbacher GmbH & Co OHG. Dostupné také z: KAPLANOVÁ, Eva. Studie proveditelnosti bioplynová stanice v Srbské republice [online]. 2018 [cit. 2023-02-02]. Dostupné z: <https://is.vstecb.cz/th/uzarq/>. Diplomová práce. Vysoká škola technická a ekonomická v Českých Budějovicích. Vedoucí práce Vladimír NÝVLT.
- [39] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE. *VDI Heat Atlas* [online]. Second Edition. Berlin Heidelberg: Springer, 2010 [cit. 2023-02-02]. ISBN 978-3-540-77877-6. Dostupné z: <https://link.springer.com/referencework/10.1007/978-3-540-77877-6>
- [40] ŠESTÁK, Jiří a Rudolf ŽITNÝ. *Tepelné pochody II: výměníky tepla, odpařování, sušení, průmyslové pece a elektrický ohřev*. Vyd. 2. V Praze: Nakladatelství ČVUT, 1997. ISBN 80-010-3475-5.
- [41] 3Q METAL. Nerezové svařované trubky 1.4301/07. In: *INerez* [online]. Libiřany: 3Q Metal [cit. 2023-04-06]. Dostupné z: <https://www.inerez.cz/zbozi-nerezove-svarovane-trubky-1-4301-07-23872>
- [42] ŠESTÁK, Jiří a František RIEGER. *Přenos hybnosti, tepla a hmoty*. Dot. 1. vyd. V Praze: České vysoké učení technické, 1996. ISBN 80-010-0957-2.
- [43] RIEGER, František, Václav NOVÁK a Tomáš JIROUT. *Hydromechanické procesy II*. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2005. ISBN 80-010-3302-3.

- [44] DOSTÁL, Martin, Karel PETERA, Jiří MORAVEC, Radek ŠULC a Tomáš JIROUT. *Zkouškový pomocník PHTH*. Praha: Ústav procesní a zpracovatelské techniky, FS ČVUT, 2020.
- [45] ŠESTÁK, Jiří, Jaromír BUKOVSKÝ a Milan HOUŠKA. *Tepelné pochody: transportní a termodynamická data*. Vyd. 5. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004. ISBN 80-010-2934-4.
- [46] The new BLUEline Rotary Lobe Pump | Börger Pumps. In: *Börger Pumps* [online]. Borken-Weseke: Börger [cit. 2023-03-06]. Dostupné z: https://www.boerger.com/en_UK/start.html?type=1107386203&tx_bcpagflip_pi1%5Bbook%5D=149&tx_bcpagflip_pi1%5Baction%5D=show&tx_bcpagflip_pi1%5Bcontroller%5D=Book&cHash=7d75509acfbadd8acc89b6508fbec269#1
- [47] Dimensions - The BLUEline Rotary Lobe Pumps | Börger Pumps. In: *Börger Pumps* [online]. Borken-Weseke: Börger [cit. 2023-03-06]. Dostupné z: https://www.boerger.com/en_UK/products/rotary-lobe-pumps/pump-series/the-blue-line-rotary-lobe-pump/dimensions.html
- [48] Multichopper plus - Product types | Börger pumps. In: *Börger Pumps* [online]. Borken-Weseke: Börger [cit. 2023-03-06]. Dostupné z: https://www.boerger.com/en_UK/products/macerating-units/multichopper/product-types/multichopper-plus.html
- [49] DRTIČE DVOUHŘÍDELOVÉ | Výrobky | TERIER s.r.o. - drtiče, recyklační linky. In: *TERIER s.r.o. - drtiče, recyklační linky* [online]. Chrastava: Terier [cit. 2023-03-06]. Dostupné z: <http://www.terier.cz/cz/10/-drtice-dvouhridelove//katalogove-listy.htm>
- [50] ROUŠAR, Ivo. *Projektové řízení technologických staveb*. Praha: Grada, 2008. ISBN 978-80-247-2602-1.
- [51] TOWLER, Gavin a Ray SINNOT. *Chemical engineering design*. Burlington: Elsevier, 2008. ISBN 978-0-7506-8423-1.
- [52] ČESKÁ A SLOVENSKÁ FEDERATIVNÍ REPUBLIKA. *Zákon č. 586/1992 Sb.: Zákon České národní rady o daních z příjmů*. In: . Praha, 1992, číslo 586.

Seznam použitých symbolů a zkratek

Latinské písmeno	Jednotka	Veličina
a	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	Součinitel teplotní vodivosti
A	m^2	Plocha
C	Kč; Kč · m^{-1}	Cena
c^m	–; %	Hmotnostní podíl
c_p	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	Měrná tepelná kapacita za stálého tlaku
d	m; mm	Průměr
D	m	Průměr
g	$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$	Gravitační zrychlení
H	m	Výška
k	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$	Součinitel prostupu tepla
k	–	Koeficient odporu proti pohybu
l	m; mm	Délka
M	$\text{kg} \cdot \text{kmol}^{-1}$	Molární hmotnost
\dot{m}	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$; $\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$	Hmotností tok
n	kmol	Počet částic
n_{ot}	s^{-1}	Otáčky
n_{Tr}	–	Počet trubek
p	kPa	Tlak
P	W; kW	Příkon
\dot{Q}	W; kW	Tepelný výkon
R	$\text{kJ} \cdot \text{kmol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	Univerzální plynová konstanta
$R_1; R_2$	m	Poloměr
S	m^2	Průřez
t	s; min	Čas
T	°C	Teplota
V	m^3	Objem
v	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	Střední rychlost proudění
\dot{V}	$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	Objemový tok

Řecký symbol	Jednotka	Veličina
α	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$	Součinitel přestupu tepla
δ	m	Hloubka penetrace teplotní vlny
ε	$W \cdot m^{-3}$	Specifický příkon
λ	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	Součinitel tepelné vodivosti
μ	Pa · s	Dynamická viskozita
ν	$m^2 \cdot s^{-1}$	Kinematická viskozita
ρ	$kg \cdot m^{-3}$	Hustota

Podobnostní číslo	Význam
Bi	Biotovo číslo
Gz	Graetzovo číslo
Nu	Nusseltovo číslo
Pr	Prandtlovo číslo
Re	Reynoldsovo číslo

Zkratka	Význam
AV ČR	Akademie věd České republiky
BPS	Bioplynová stanice
CAPEX	Capital expenditures (investiční náklady)
CATW	Catering waste (gastroodpad)
CNG	Compressed natural gas (stlačený zemní plyn)
CO ₂	Oxid uhličitý
ČOV	Čistírna odpadních vod
ČR	Česká republika
DPH	Daň z přidané hodnoty
EU	Evropská unie
CH ₄	Metan
KGJ	Kogenerační jednotka
LNG	Liquefied natural gas (zkapalněný zemní plyn)
MŽP	Ministerstvo životního prostředí
OPEX	Operational expenses (provozní náklady)
OZE	Obnovitelné zdroje energie
PFD	Process flow diagram (proudové technologické schéma)

Seznam obrázků, tabulek a příloh

Seznam obrázků

Obrázek 1 Primární zdroje energie podle typu paliva v EU (1990-2020) [4], přeloženo	9
Obrázek 2 Podíl paliv a technologií na výrobě elektřiny brutto v krajích ČR v roce 2021 [5]	10
Obrázek 3 Podíl paliv a technologií na výrobě elektřiny brutto v ČR v roce 2021 [5].....	10
Obrázek 4 Vývoj instalovaného výkonu [6]	11
Obrázek 5 Vývoj výroby elektřiny z bioplynu (celkem) [6].....	11
Obrázek 6 Čtyři fáze procesu vyhnívání [8]	13
Obrázek 7 Vliv teploty vyhnívacího procesu a doby kontaktu na množství a složení vyrobeného plynu [8].....	14
Obrázek 8 Vliv teploty na dosažitelné množství plynu ve vztahu k hodnotě dosažené při optimálních teplotních poměrech (32 °C mezofily, 55 °C termofily) podle Kalterwassera [8] ...	14
Obrázek 9 Schematický přehled bioplynových technologií [8]	16
Obrázek 10 Teoretická výtěžnost surovin [10]	19
Obrázek 11 Letecký snímek areálu zemědělského družstva v Chotýčanech [13]	21
Obrázek 12 Zjednodušené schéma BPS Chotýčany	21
Obrázek 13 Průměrná hmotnostní skladba domovního směsného komunálního odpadu [20]	27
Obrázek 14 Struktura biologického odpadu v kilogramech na osobu za rok [21], přeloženo	28
Obrázek 15 Struktura vzniku potravinových ztrát a odpadu v šetřených provozovnách (kg/100 kg připravených pokrmů) [24]	29
Obrázek 16 Ceník odvozu gastroodpadu spol. Marius Pedersen [30]	31
Obrázek 17 Zjednodušené schéma BPS Chotýčany s hygienizační linkou	34
Obrázek 18 PFD schéma obecné BPS.....	35
Obrázek 19 Schéma bilančního modelu BPS.....	35
Obrázek 20 Počet trvalých obyvatel v okolí BPS Chotýčany – data dle [36] a mapa [37].....	40
Obrázek 21 Srovnání podílů složek ve vstupním substrátu	41
Obrázek 22 Prvotní návrh linky na zpracování gastroodpadů	42
Obrázek 23 Schéma vstupních a výstupních teplot hygienizačního zařízení.....	43
Obrázek 24 Závislost teplot na ploše v protiproudém aparátu.....	45
Obrázek 25 Skica jednoho modulu výměníku typu trubka v trubce	46
Obrázek 26 Schématické zobrazení průřezu trubek ve výměníku	49
Obrázek 27 Skica nádoby s duplikátorem.....	51
Obrázek 28 Odečet Reynoldsova a příkonového čísla.....	53

Obrázek 29 Odečet z nomogramu pro nestacionární vedení tepla v kouli [45].....	55
Obrázek 30 Konfigurace čerpadla BLUEline NOVA AN040 [47]	59
Obrázek 31 Rozsahy průtoků macerátorů Multichopper plus firmy Börger [48], přeloženo	59
Obrázek 32 Multichopper plus firmy Börger [48]	59
Obrázek 33 Dvouhřídelový drtič odpadu firmy Terier [49].....	60
Obrázek 34 PFD schéma linky na zpracování gastroodpadu	60
Obrázek 35 Očekávaný finanční vývoj projektu.....	65
Obrázek 36 Vliv snížení diskontní sazby na 4 %.....	66
Obrázek 37 Vliv zvýšení diskontní sazby na 12 %.....	66
Obrázek 38 Vliv snížení investičních nákladů	67
Obrázek 39 Vliv zvýšení investičních nákladů	67
Obrázek 40 Vliv snížení nákupní ceny kukuřičné siláže	68
Obrázek 41 Vliv zvýšení likvidačního poplatku	68
Obrázek 42 Citlivosti reálné doby návratnosti na jednotlivých parametrech	69

Seznam tabulek

Tabulka 1 Srovnání vybraných parametrů biometanu v ČR a jiných evropských zemích [11]....	18
Tabulka 2 Požadavky na technologie anaerobní digesce [14]	23
Tabulka 3 Výpis bioplynových stanic s povolením prodávat digestát vyrobený z gastroodpadu [16]	25
Tabulka 4 Produkce potravinových odpadů v ČR za rok 2020 [26].....	30
Tabulka 5 Vlastnosti odpadů podle publikace Biogas from Waste and Renewable Resources [9]	32
Tabulka 6 Vlastnosti odpadů podle publikace Bioplyn [7].....	33
Tabulka 7 Vlastnosti odpadů podle článku Biogas Potential of Coffee Processing Waste in Ethiopia [32].....	33
Tabulka 8 Vstup složky 1 do bilance BPS	36
Tabulka 9 Souhrn všech vstupujících složek do bilance BPS.....	37
Tabulka 10 Bilance reaktoru v BPS	38
Tabulka 11 Bilance KGJ a digestátu v BPS.....	39
Tabulka 12 Vstup složky 1 do bilance BPS po zařazení 100 kg·h ⁻¹ gastroodpadu do bilance	41
Tabulka 13 Data z návrhu trubek pro hygienizační výměník	47
Tabulka 14 Doplnující data z návrhu trubek pro hygienizační výměník	47
Tabulka 15 Koeficienty míchadla CVS 69 1025.3 [43].....	52
Tabulka 16 Nabídka čerpadel z řady BLUEline NOVA [46], přeloženo	58

Tabulka 17 Ceny pořizovaných zařízení	61
Tabulka 18 Celkové investiční náklady	61
Tabulka 19 Rozdělení hmotného majetku do odpisových skupin.....	62
Tabulka 20 Provozní náklady.....	63
Tabulka 21 Roční příjmy.....	64
Tabulka 22 Kalkulace bankovního úvěru.....	64
Tabulka 23 Shrnutí finančního hodnocení projektu	65

Seznam příloh

Příloha 1 Obecná BPS.....	2xA3
Příloha 2 Hygienizační linka.....	1xA4
Příloha 3 Hmotnostní bilance bez gastroodpadu.....	1xA4
Příloha 4 Hmotnostní bilance s gastroodpadem.....	1xA4
Příloha 5 Ekonomická bilance.....	2xA3