

Fermentor na přípravu biopaliv

Lukáš Krátký

Abstrakt

Bioplyn patří mezi obnovitelné zdroje energie, které mají kladný vliv na ochranu životního prostředí. Příspěvek se zabývá výrobou bioplynu zejména z organických zbytků a odpadů v bioplynových stanicích, jejichž srdcem je zařízení nazývané fermentor, ve kterém dochází při působení mikroorganismů k přeměně substrátu na biopaliva. Návrh a stavba fermentačních zařízení vyžadují znalost nejen technologických, ale i konstrukčních parametrů, které celý proces ovlivňují, jako např. teplota, tlak, pH, složení substrátu a metody jeho promíchávání. Z odborné literatury, článků, výsledků výzkumů a provozních zkušeností byly stanoveny závěry a doporučení pro stavbu fermentačních zařízení. Všechny tyto výsledky budou dále uplatněny při návrhu konstrukce, stavbě a provozu laboratorního fermentoru.

Klíčová slova

anaerobní vyhnívání, biomethanizace, bioplyn, konstrukce fermentoru, míchání, optimalizace teploty, pH, přenos tepla, skladba substrátu

1. Úvod

Bioplyn není žádným novodobým vynálezem, ale je starý jako život na naší planetě. Nový život může vzniknout jen tehdy, zanikne-li ten starý, což platí v celém přírodním koloběhu. Zatímco slunce fotosyntézou umožňuje růst nového života, organická hmota tvořená převážně vodou, bílkovinami, tuky, uhlovodíky a minerálními látkami se při odumírání rozkládá na své původní složky a to na oxid uhličitý, vodu a minerály. Vedle jiných procesů rozkladu, jimiž jsou například hoření, trávení, kvašení nebo trouchnivění, představuje také vyhnívání takový druh přeměny a právě při tomto procesu vzniká bioplyn.

V posledních letech výrazně stoupá zájem o technologii výroby bioplynu. To se projevuje nejen rostoucím počtem projektovaných a budovaných bioplynových stanic, ale i velkým zájmem zemědělců, obcí, firem, politiků a soukromých osob o vývoj v této oblasti. Pro potravinářský průmysl a gastronomii, velkokapacitní kuchyně, kantýny a odpadová hospodářství nabízí bioplynová technologie možnost zlikvidovat organické zbytky a odpady, jichž stále přibývá, nenákladnou cestou v zemědělských zařízeních. A jelikož tato technologie je ekologicky výhodná také pro zpracování kejdy a hnoje (např. sníží se zatížení pachem), oceňují ji stále více i lidé mimo zemědělství.

Cílem této práce je shrnout základní poznatky o tvorbě bioplynu, vlivy různých technologických parametrů a základní konstrukční řešení fermentorů využívaných v praxi. Veškeré dosažené znalosti budou dále uplatněny při návrhu konstrukce laboratorního fermentoru, který bude sloužit k přípravě biopaliv resp. bioplynu.

2. Bioplyn a princip jeho tvorby

Termín „bioplyn“ v posledních letech 20. století zcela zobecněl a stal se nejen běžně rozšířeným mezi technickou odbornou veřejností, nýbrž i synonymem čehosi ekologicky příznivého. Dříve se tento termín nepoužíval a pro název toho plynu byla aplikována synonyma buď „kalový plyn“ a nebo „čistírenský plyn“. Lze tedy konstatovat, že souhrnný termín „bioplyn“ přiřadila současná technická praxe výlučně pro plyný produkt anaerobní fermentace organických látek uváděné též pod pojmy vyhnívání, anaerobní digesce, biomethanizace a nebo biogasifikace.

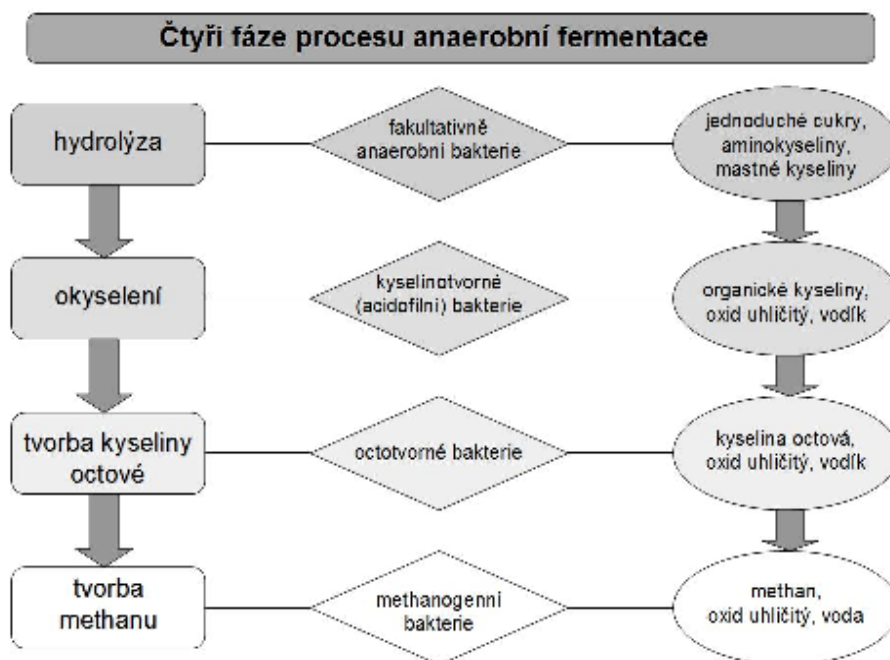
2.1. Složení a kvalita bioplynu

Bioplyn je svým chemickým složením jednoduchým i komplikovaným systémem zároveň. Vzniklé bioreaktorové plyny jsou prakticky tvořeny binární směsí methanu a oxidu uhličitého. Zpravidla se k těmto majoritním složkám bioplynu ještě zahrnují i další vzniklé plyny, jejichž přítomnost je ale z hlediska jejich zastoupení v desetinách objemových procent jako např. sirovodík, amoniak, molekulární dusík, vodík, kyslík nebo vodní pára.

Kvalita bioplynu je určována především poměrem hořlavého methanu CH_4 k „neúčinnému“ oxidu uhličitému CO_2 . Oxid uhličitý má za následek zředování bioplynu a je příčinou vzniku větších nákladů, především při jeho skladování. Proto je nutné usilovat o co nejvyšší obsah methanu a co nejmenší obsah oxidu uhličitého. Obvykle dosažitelný obsah methanu se uvádí 50 až 75% [1].

2.2. Proces tvorby bioplynu

Bioplyn je produktem látkové výměny methanogenních bakterií, ke které dochází, když mikroorganismy rozkládají organickou hmotu. Anaerobní rozklad fermentovaného materiálu vyžaduje koordinovanou metabolickou součinnost různých mikrobiálních skupin a podle nich je možno tento proces rozdělit na čtyři fáze – hydrolýza, acidogeneze (okyselení), acetogeneze (tvorba kyseliny octové) a methanogeneze (vlastní tvorba methanu), které přehledně vystihuje obr.1. Uvedené fáze procesu jsou následné, při kontinuálním provozu však probíhají současně, nejsou tedy odděleny ani místně ani časově. Pokud je proces rozdělen technologicky do dvou stupňů, tak v prvním stupni obvykle probíhá hydrolytická nebo hydrolytická a acidogenní fáze.



Obr. 1. Čtyři fáze procesu tvorby bioplynu [2].

3. Vliv technologických parametrů na biomethanizaci

Pro správný návrh fermentačních zařízení je nutné nejprve zohlednit vliv technologických parametrů jako jsou teplota, pH a složení substrátu. Tyto požadavky a jejich pracovní intervaly vedou k různým typům konstrukčního řešení celého fermentoru včetně pohonu, ohřevu resp. chlazení vsádky, volby typu míchacího ústrojí, volby materiálu nebo metod utěsnění aparátu.

3.1. Vliv teploty

Rychlost procesu tvorby bioplynu je na teplotě silně závislá. V zásadě platí, že se zvyšující se pracovní teplotou roste jak rychlost rozkladu substrátu, tak i produkce bioplynu a doba anaerobního vyhnívání se zkracuje. Methanogenní bakterie obvykle pracují při teplotách v rozmezí 0 °C až 70 °C. V bioplynových technologiích se pro mikroorganismy, účastníci se anaerobní fermentace, uvádí čtyři teplotní oblasti [1]:

- kryofilníteplotní interval 0 °C – 5 °C
- psychofilníteplotní interval 5 °C – 27 °C
- mezofilníteplotní interval 27 °C – 45 °C
- termofilníteplotní interval 45 °C – 60 °C

Naprostá většina fermentačních procesů se dnes odehrává v pásmu středních teplot (s mezofilními kulturami), ale co se týče produkce bioplynu, tak nejvýkonnějšími jsou mikroorganismy termofilní. Výhodou fermentace v této teplotní oblasti je, že dochází k hlubšímu rozkladu organického materiálu, což právě vede k vyšší produkci bioplynu a za termofilních podmínek se také dosahuje vysokého stupně hygienizace substrátu.

3.2. Vliv pH

Pro procesy biomethanizace jsou zvláště významné rovnováhy oxidu uhličitého CO₂, sirovodíku H₂S, čpavku NH₃ a kyselin octové a propionové. Většina biologických systémů pracuje ve slabě alkalické oblasti s hodnotou pH okolo 7,5. Bakterie produkující methan mají podle [1] svá optima většinou v oblasti pH 6,2-7,8.

3.3. Vliv složení substrátu

Všechny organické látky lze alespoň z části rozložit jak aerobní, tak anaerobní cestou. Rozhodujícím faktorem pro volbu vhodné metody zpracování je především obsah sušiny v substrátu. V literatuře [2] se uvádí, že pro bioplynovou technologii je optimální obsah sušiny mezi 5 a 15%.

Hlavní zdroje, poskytující v biologicky rozložitelných materiálech methan, jsou polysacharidy, proteiny a lipidy. U mnoha běžných organických substrátů, ať už jde o odpady, rostlinnou biomasu nebo různé kaly, pochází majoritní podíl methanu z rozkladu polysacharidů, většinou celulóзовých typů. Jen v několika případech však nejsou polysacharidy zdrojem hlavním a jsou v produkci methanu méně významné nežli proteiny a lipidy. K této situaci dochází při zpracování některých druhů odpadních vod a při zpracování průmyslových odpadů např. z jatečních výrob, kde se hlavním zdrojem produkce methanu stávají proteiny a lipidy. Tuhy (lipidy) vynikají především vysokou výtěžností bioplynu, avšak obvykle nebyvají ve fermentované surovině zastoupeny. Bílkoviny (proteiny) jsou rovněž dobře rozkládány, avšak jejich základním problémem je obsah dusíku a síry.

4. Základy návrhu fermentačních zařízení

Mezi nejdůležitější aspekty, které je nutno v praktickém návrhu fermentačního zařízení řešit, patří dvě základní oblasti a to míchání vsádky a sdílení tepla. Cílem této kapitoly bude zhodnotit, pro které podmínky se daná konstrukční uspořádání používají a jaké výhody či nevýhody v sobě skrývají.

4.1. Volba míchacího systému

Míchání suspenzí v reaktorech je pro úspěšný proces fermentace zcela nezbytné. Na rozdíl od potravinářských a chemických zařízení, kde je nutné míchat vsádku nepřetržitě, tak u anaerobních reaktorů je tomu naopak. Pro bioreaktory stačí podle [6] obvykle aplikovat proces míchání několikrát denně nebo alespoň jednou za hodinu jen kvůli přemístění vsádky. Kontinuální míchání vyhnívacích nádrží je zbytečné a má za následek především nižší výtěžnosti bioplynu. Způsob a dobu míchání je nutno volit tak, aby se ve fermentačním zařízení dosáhlo následujících efektů [2]:

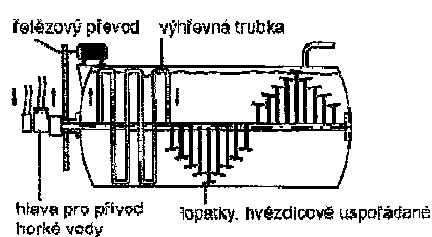
- Smíchání čerstvého substrátu s již vyhnívacím substrátem, aby se čerstvý substrát naočkoval aktivními bakteriemi.
- Rozdělení tepla, aby se ve fermentoru udržovala co nejrovnoměrnější teplotní úroveň.
- Promícháváním vsádky by se mělo zabránit sedimentaci těžších částic ke dnu nádoby a stoupání lehkých částic k hladině, kde mohou vytvořit nejen souvislou krycí vrstvu, ale i relativně houževnatou pěnu, což má za následek znesnadnění odvodu plynu z reaktoru.
- Zlepšení látkové výměny bakterií vypuzením bublin bioplynu a přívodem čerstvých živin.

V praktických aplikacích se lze setkat se třemi základními způsoby míchání :

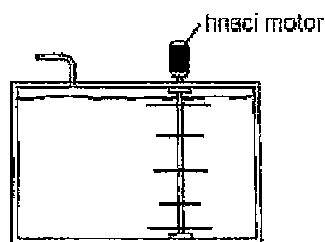
- mechanicky – míchací zařízení zavedená do nádrže (obr. 2.a,b,c,d)
- hydraulicky – odděleně instalovanými čerpadly (obr. 2.e)
- pneumaticky – vtlačování vlastního vyrobeného plynu (obr. 2.f)

K hydraulickému míchání (obr. 2.e) se většinou užívá výkonné čerpadlo, které zároveň může sloužit k přečerpávání substrátu z přípravné nádrže do fermentoru a vyhnílého substrátu ze skladovací nádrže do cisterny. Nasávání substrátu a plnění fermentoru musí probíhat tak, aby se obsah vyhnívací nádrže rovnoměrně promíchával v celém jejím objemu. K tomuto účelu se nejčastěji používají míchací trysky, které se dají natáčet jak ve vodorovné, tak i ve svislé rovině. Hydraulické míchání má tu výhodu, že uvnitř fermentoru nejsou umístěny žádné pohyblivé části a jelikož se nachází mimo prostor vyhnívací nádrže, tak jsou i snadno přístupné. Použití hydraulického míchání se však omezuje na velmi řídké substráty, které nejsou náchylné k tvorbě usazenin a plovoucího koláče, takže se využívají především v odvětví čištění odpadních vod. Dalším negativem je pro velkoobjemové nádrže nutnost použití obrovských čerpadel, kdy uvnitř čerpadel vznikají velká smyková napětí, která pak způsobují destrukci namnožených mikroorganismů.

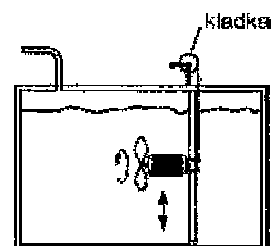
Metoda míchání stlačeným plynem spočívá ve využití vznikajícího bioplynu, jak je tomu uvedeno na obr. 2.f. Vznikající bioplynové bubliny vyvolávají v substrátu vertikální pohyb, nikoliv však horizontální, tudíž fermentor není promícháván v plném rozsahu. U tohoto systému míchání nedochází k oděru mechanických částí jako je tomu např. u rotačního axiálního míchadla a není spotřebována ani energie na jeho pohon. Pořizovací náklady tohoto zařízení jsou ale dosti vysoké a kvůli relativně vysokým hodnotám tlaku plynu je nutné dokonalé utěsnění fermentoru. Další omezení představuje i samotná produkce bioplynu, poněvadž za den se zhruba vyprodukuje takové množství bioplynu jako je objem nádrže a tudíž je ho pro míchání málo.



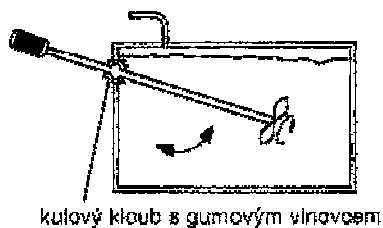
a) mechanické lopatkové míchadlo s výhřevnými trubkami



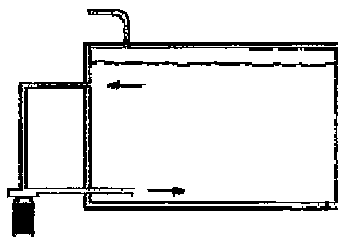
b) mechanické mlýnové míchadlo s excentrickým umístěním



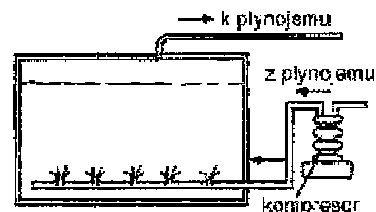
c) ponorné motorové vrtulové míchadlo s nastavitelnou výškou



d) tyčový mixér, otočný



e) hydraulická cirkulace

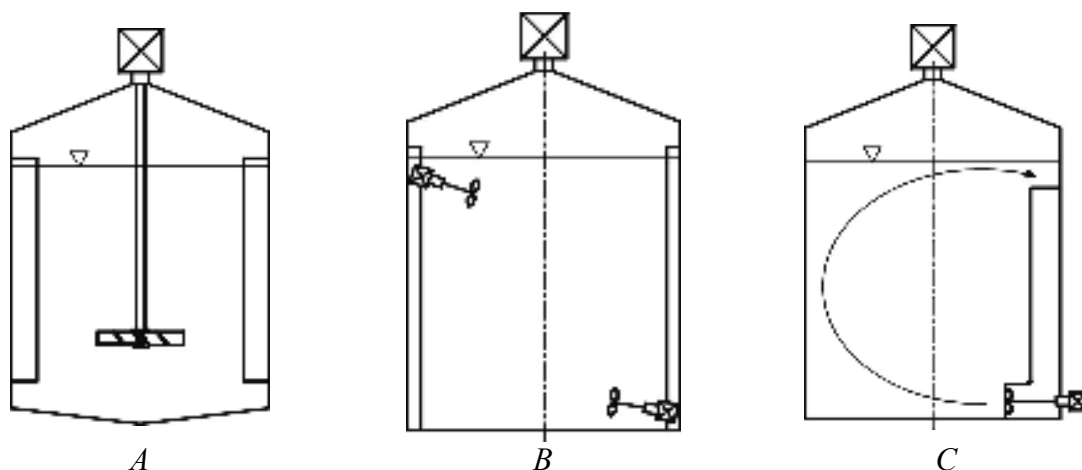


f) pneumatické vtačování bioplynu

Obr. 2. Přehled vyzkoušených míchadel pro bioplynové stanice [2].

Mechanické míchaní tedy patří mezi nejčastěji používané způsoby [4], přičemž umístění a použití těch kterých typů míchadel záleží nejen na velikosti a geometrii reaktoru, ale i na fyzikálních vlastnostech vsádky resp. substrátu. Pro správné nadimezování pohonu je pak třeba určit příkon a frekvenci otáčení míchadla tak, aby byla zaručena nejen homogenita vsádky, ale i požadované efekty uvedené výše.

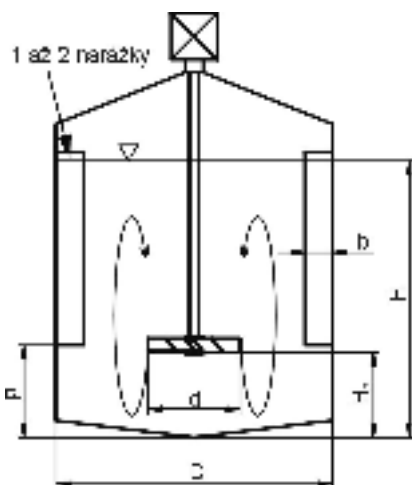
U mechanicky míchaných reaktorů se zpravidla můžeme setkat se třemi základními typy konstrukčního uspořádání. Cirkulace vsádky je většinou zajištěna rychloběžnými axiálními míchadly, která mohou být umístěna na centrálním hřídeli (obr. 3.A) nebo pro velkoobjemová



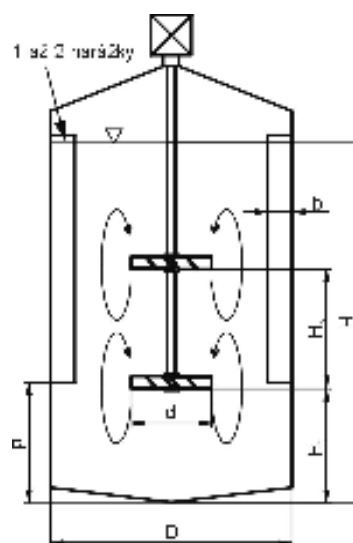
Obr. 3. Konstrukční uspořádání míchaných anaerobních fermentorů [4].
A – centrální rotační míchadlo v nádobě s radiálními narážkami, B – boční míchadla, C – cirkulační míchadlo s difuzorem

zařízení se používají jejich boční konfigurace (obr. 3.B). Tato dvě uspořádání se v bioplynových stanicích používají nejčastěji. Méně častým, ba už zřídka kdy používaným je použití míchadla s difuzorem, které slouží jako cirkulační čerpadlo (obr. 3.C).

Z různých experimentů uváděných v [3], [4] vyplynulo, že pro míchání reálných substrátů (keřda, sláma s vodou, kukuřičná siláž) je z energetického hlediska výhodné použít axiální míchadlo čerpající směrem ke dnu nádoby. Doporučená geometrická konfigurace fermentoru je uvedena na obr. 4. Pro štíhlejší vyhnívací nádoby, kde poměr výšky hladiny H k průměru nádoby D je vyšší jak 1,5, je výhodné použít etážové míchadlo (obr. 5), tj. více rychloběžných axiálních míchadel umístěných na společné hřídeli, přičemž umístění jednotlivých míchadel je dáno tak, že musí svými čerpacími účinky pokrýt celou nádobu [4]. U fermentační zařízení, kde výška hladiny substrátu H nedosahuje průměru nádoby D , je výhodné použít excentricky umístěné axiální míchadlo.

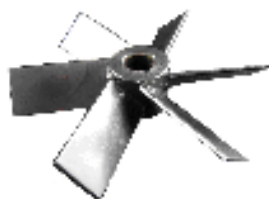


Obr. 4. Doporučená geometrická konfigurace míchaného anaerobního fermentoru s centrálním centricky umístěným axiálním míchadlem $D/d = 3$, $H_2/d = 1$, $p/d = 1$, $b/D = 0,1$ [4].



Obr. 5. Fermentor s axiálním etážovým míchadlem [4].

Pro míchací ústrojí fermentorů se nejčastěji používají rychloběžná axiální míchadla umístěná na centrální hřídeli s vrchním či spodním pohonem. V obou případech je pro dostatečné promíchání vsádky potřeba měrný příkon cca 70 W/m^3 . V průmyslových aplikacích se nejčastěji používají standardizovaná míchadla o různém geometrickém tvaru a počtu lopatek. Nejjednodušším a často i nejpoužívanějším typem je míchadlo s lopatkami skloněnými pod úhlem 45° s různým počtem lopatek (obr. 6.A). Dalšími používanými typy jsou například míchadla s rovnými lomenými lopatkami (obr. 6.B) nebo vrtulová míchadla (obr. 6.C).



A – šestilopátkové míchadlo



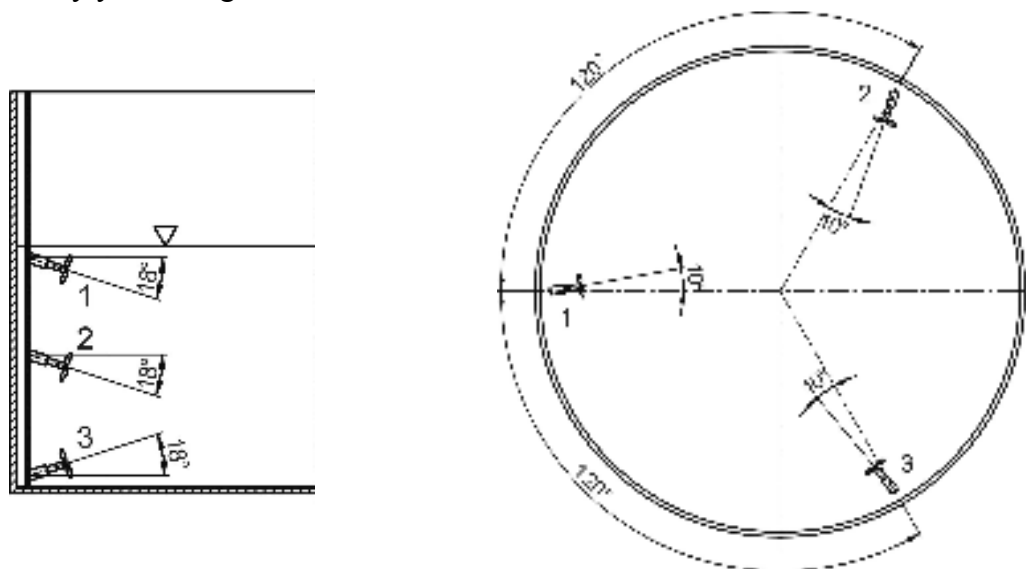
B – míchadlo s rovnými lomenými lopatkami



C – vrtulové míchadlo

Obr. 6. Přehled nejčastěji používaných rychloběžných axiálních míchadel

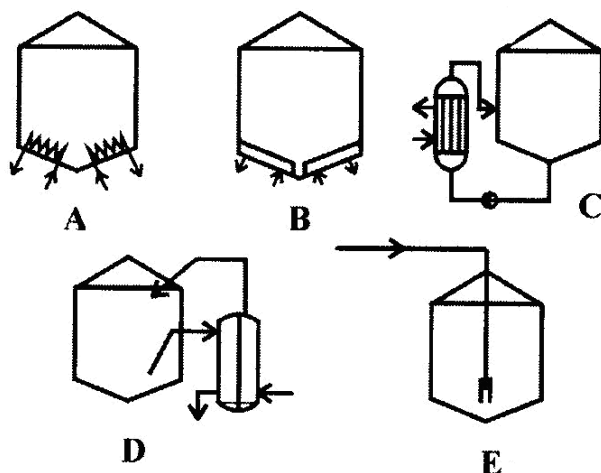
Pro míchání velkoobjemových fermentorů (cca nad 1000 m^3) se používají konfigurace rychloběžných axiálních míchadel převážně v bočním provedení. Zoptimalizovat tento způsob míchání z hlediska vlastní homogenizace vsádky bylo cílem experimentů uváděných například v [4]. Závěry této práce hovoří o optimální konfiguraci míchacího ústrojí zobrazeného na obr. 7., kde je znázorněna jak poloha, tak i natočení míchadel ve fermentoru. Při míchání takovéhoto nádrží je nutné zajistit, aby míchadlo, umístěné nejbližší k hladině, dodávalo dostatečný příkon potřebný k strhávání plouvoucích částic. Podle závěrů uvedených v [4] je třeba dosáhnout měrného příkonu alespoň 40 W/m^3 , přičemž pro promíchání vsádky pak postačí příkon menší, což se prakticky zajistí instalací míchadla s vyšším výkonem než je tomu u zbylých analogů.



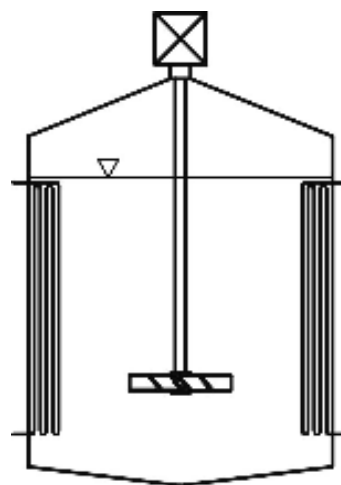
Obr. 7. Optimální konfigurace uspořádání míchadel ve velkoobjemovém fermentoru [4].

4.2. Problematika přestupu tepla

Pro energetickou bilanci procesu tvorby bioplynu hraje sdílení tepla zcela zásadní vliv. Mezofilní a zvláště termofilní mikroorganismy vyžadují přehřívání resp. ochlazování substrátu, neboť biologický růst bakterií je exotermický, a zároveň je nutné minimalizovat tepelné ztráty do okolí.



Obr. 8. Způsoby otopu anaerobních reaktorů [1].
A – vnitřní výměník, B – duplikátorový plášť, C – externí výměník, D – rekuperační výměník, E – přímotopná pára



Obr. 9. Příklad možnosti tvarování topného tělesa do tvaru radiální narážky [4].

Problematika přestupu tepla, správné dimenzování chladicích resp. ohřívacích ploch a s tím spojená i regulace teploty uvnitř reaktoru, je pro bioplynové technologie obzvláště důležitá. Substrát je zpravidla zahříván cirkulací teplé vody, která se ohřívá spaliny z kogeneračních jednotek nebo přímo jimi, pokud jsou dostatečně zchladlé. Příklady možných konstrukčních řešení ohřevu a temperance substrátu jsou znázorněny na obr. 8. Pro zlepšení axiálního promíchávání se fermentory většinou opatřují vhodnými vestavbami např. narážkami. Vzhledem k tomu, že jeden z možných způsobů ohřevu vsádky je pomocí vnitřních vestaveb (obr. 8.A), tak lze topný had tvarovat tak, aby zastával funkci radiálních narážek a současně plnil i funkci tepelného výměníku a ohříval tak substrát (obr. 9).

Největších výtěžků bioplynu se dosahuje, jak tomu bylo uvedeno v kap.3.1., ve fermentorech pracujících v mezofilní teplotní oblasti. Každé pozitivní efekty jsou ale často vyvažovány negativními. S rostoucí fermentační teplotou rostou i náklady spojené nejen s temperací reaktorů, ale i nutností jejich tepelné izolace z důvodu minimalizace tepelných ztrát do okolí. Pro tento účel se podle [2] osvědčily materiály jako minerální vlna, rohože z minerálního vlákna, pěnové hmoty, desky z extrudovaného pěnového polystyrénu, polyuretanová pěna nebo různé organické izolační materiály. Optimální tloušťka izolace je ovlivněna především tvarem a velikostí vyhřívacího prostoru, teplotním rozdílem mezi obsahem nádrže a okolním prostředím (teplota vzduchu nebo půdy), cenou izolačního materiálu a finančně vyjádřenou výší úspory energie potřebné pro proces. Jak uvádí [2], tak například pro vyhřívací nádrž, která pracuje v pásmu teplot od 35 do 45 °C, je doporučená průměrná tloušťka izolace 10 až 12 cm, na menších stanicích s fermentorem o objemu pod 200 m³ by to mělo být ještě o něco výše. Například pro fermentor o průměru 8 m a hloubce 6 m bude použita izolace o tloušťce 10 cm. Při specifických nákladech na izolaci ve výši 150 až 250 €/m³ (pro polystyrén bez opracování) činí celkové materiálové náklady cca 3000 až 5000 €.

5. Návrh konstrukce laboratorního fermentoru

Cílem této práce bylo podle výše uvedených technologických parametrů a konstrukčních řešení navrhnout laboratorní fermentor, určený pro přípravu biopaliv, o pracovním objemu cca 30 l.

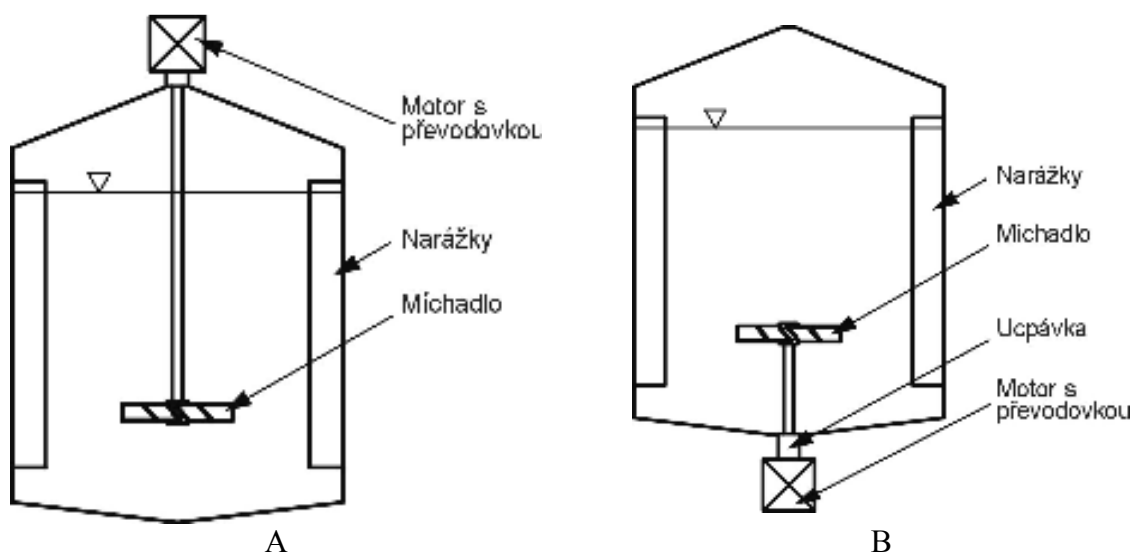
Prvním uvedeným a následně zohledněným kritériem byly teplotní intervaly průběhu fermentačního procesu, přičemž z různých studií, výzkumů a praktických zkušeností vyplynulo, že pro anaerobní rozklad substrátu se nejvíce využívají mikroorganismy pracující v mezofilní a termofilní teplotní oblasti, z čehož také následně vyplývá i požadavek na dosahování průměrných teplot vsádky v intervalu 30 až 60 °C. Pro navrhovaný fermentor byla z tohoto hlediska stanovena maximální dosahovaná teplota substrátu na 70 °C, která byla dále zohledněna např. v pevnostních výpočtech.

Dalším parametrem, který je nezbytný k návrhu každého technologického aparátu, je vnitřní či vnější přetlak. Z různých experimentů provedených v [1] vyplynulo, že methanogenní bakterie nejsou příliš ovlivněny tlakovými podmínkami uvnitř bioreaktoru, a proto z tohoto důvodu je vnitřní přetlak v pracovním prostoru fermentoru volen 0,2 MPa, což zajistí tlakovou diferenci potřebnou k vypouštění bioplynu.

5.1. Návrh nádoby a míchacího zařízení

V kapitole 4.1. bylo uvedeno, že pro míchání vyhřívacích nádrží menších objemů se používají rychloběžná axiální míchadla umístěná na centrálním hřídeli poháněného buď pomocí vrchního nebo spodního pohonu, jak je to schematicky znázorněno na obr. 10. Výška hladiny substrátu H v bioreaktoru se dle doporučení uváděných např. v [4] volí rovna průměru nádoby D , tedy $H/D=1$, přičemž u anaerobních reaktorů se obvykle používají i štíhlejší nádoby s maximálním poměrem výšky hladiny k průměru nádoby $H/D=3$.

Fermentor byl navržen tak, aby bylo možné dosáhnout poměru $H/D=2$, tedy fermentaci vsádky o maximálním objemu cca 45 l.



Obr. 10. Schéma fermentoru s centrálně umístěným mechanickým míchadlem [4].

A – horní pohon, B – spodní pohon

S návrhem každého zařízení jsou spjaty určité technické požadavky. Jelikož se v tomto případě jedná o experimentální zařízení, které bude obsahovat množství čidel, senzorů a snímačů, tak samotná konstrukce fermentoru musí být jednoduchá pro rozebírání, sestavování a čištění, měla by být určitým způsobem zajištěna snadná výměna míchadel a v neposlední řadě i možnost plnění a vypouštění bez jakéhokoliv rozebírání. Kvůli těmto požadavkům je nutné použít variantu se spodním pohonem, ačkoliv v sobě skrývá určité nevýhody spojené s utěsněním hřídele a vypouštěním substrátu. V naprosté většině se k utěsnění fermentorů se spodními pohony používají mechanické ucpávky, mezi jejichž největší zápor patří navyšování pořizovacích nákladů a také zvýšená náročnost na její údržbu.

Dalším důležitým prvkem je stanovení příkonu a frekvence otáčení míchadla. Jedním z několika požadavků na míchadlo je, aby zajistilo homogenitu vsádky a zabránilo sedimentaci resp. vyplouvání částic k hladině. Jelikož se k budoucím prováděným experimentům bude používat různorodý substrát (tj. od slámy s vodou až po kejdu nebo různé kombinace organických odpadů) a různé konfigurace míchacích systémů, tak z tohoto hlediska není možné stanovit jednotné frekvence otáčení míchadel. Pohon fermentoru je tedy vyřešen tak, že z motoru je potřebný příkon pro míchání vsádky přiváděn na hřídel míchadla pomocí řemenového převodu a k regulaci otáček, potřebných k dosažení vznosu a homogenity vsádky, bude sloužit frekvenční měnič.

Jedním z požadavků na konstrukci aparátu byla i snadná vyměnitelnost míchadel, která je v tomto případě zaručena šroubovanou spojkou. Pro první experimenty se bude používat šestilopátkové míchadlo s lopatkami skloněnými pod úhlem 45° (obr. 6.A), přičemž spodní hrana lopatky je polohována ve vzdálenosti H_2 rovné průměru míchadla d ode dna nádoby tak, jak je doporučeno na obr. 4.

Dalším nezbytným prvkem míchaných nádob je umístění nárazek, v tomto případě demontovatelných, které v průběhu míchání zabraňují rotaci vsádky a vzniku středového víru, čímž zlepšují její axiální promíchávání.

5.2. Konstrukční řešení sdílení tepla

Konstrukce teplosměnných ploch, zajišťujících ohřev a temperaci vsádky, musí být navržena tak, aby teplota vyhnívajícího organického materiálu byla maximálně 70 °C, čímž se také zužují možnosti konstrukčního řešení. Problém přestupu tepla je v tomto případě vyřešen v praxi hojně využívaným duplikátorovým pláštěm, přičemž jako temperační médium bude použita voda ohřívána v externím výměníku tepla (v tomto případě v termostatu). Samotný duplikátorový plášť fermentoru je navržen tak, aby z pevnostního hlediska vydržel maximální vnitřní přetlak 0,6 MPa a to z toho důvodu, kdyby se muselo použít pro nucený oběh čerpadlo, jehož výtlačná výška by měla být maximálně 60 m. Duplikátorový plášť, z hlediska technologie jeho výroby, je svařovaný s kuželovými přechody směrem k nádobě a na obr. 11 je po krocích zachycena jeho výroba.



Obr. 11. Konstrukční řešení duplikátorového pláště.

U teplosměnných zařízení se často setkáváme s různými druhy izolací, která mají za úkol minimalizovat tepelné ztráty do okolí. Tento fermentor bude provozován v halových laboratořích Ústavu procesní a zpracovatelské techniky Fakulty strojní, přičemž průměrná teplota vzduchu se v hale pohybuje okolo 20 °C. Jelikož fermentor bude většinou pracovat v teplotním rozmezí 35 až 45 °C, tak z důvodu malého teplotního spádu mezi vsádkou, temperačním médiem a okolím nemusí být použita žádná tepelná izolace.

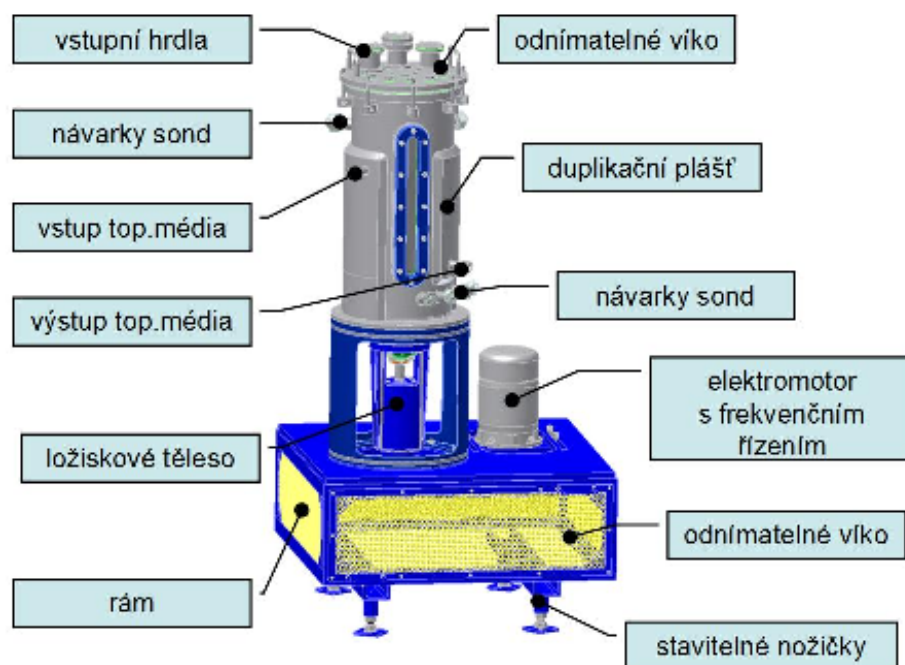
Důležitá je z konstrukčního hlediska také koroze a tím i volba použitého materiálu. Jelikož vsádka bude mít určitou teplotu, pH a složení, budou se uvolňovat nejen prospěšné, ale i škodlivé plyny a sloučeniny, které napadají materiál a způsobují tak jeho korozi. Části fermentoru, které přicházejí do styku se substrátem, musí být tedy vyrobeny z nerezových materiálů, což zajistí i lepší sanitaci celého zařízení. Z tohoto důvodu byla použita austenitická chromniklová ocel legovaná molybdenem a titanem s označením 1Cr18Ni10MoTi resp. její český ekvivalent ČSN 17 246. Pro ostatní části byly použity klasické ocelové konstrukční materiály typu ČSN 11 373, ČSN 11 523 a ČSN 11 600.

5.3. Ostatní požadavky na konstrukci

Kromě již zmíněných požadavků jako byla například jednoduchost pro rozebírání, sestavování a čištění, snadná výměna míchadel nebo možnost čištění bez rozebírání, jsou důležitá i jiná hlediska. U fermentoru by měla být mimo jiné zajištěna i možnost pohledu do reaktoru po celé výšce včetně osvětlení, možnost odebrání vzorků pro analýzy nebo možnost regulace pH. Na nádobě by měl být také umístěn dostatečný počet návarků pro instalaci snímačů na měření různých veličin.

6. Konstrukce fermentoru

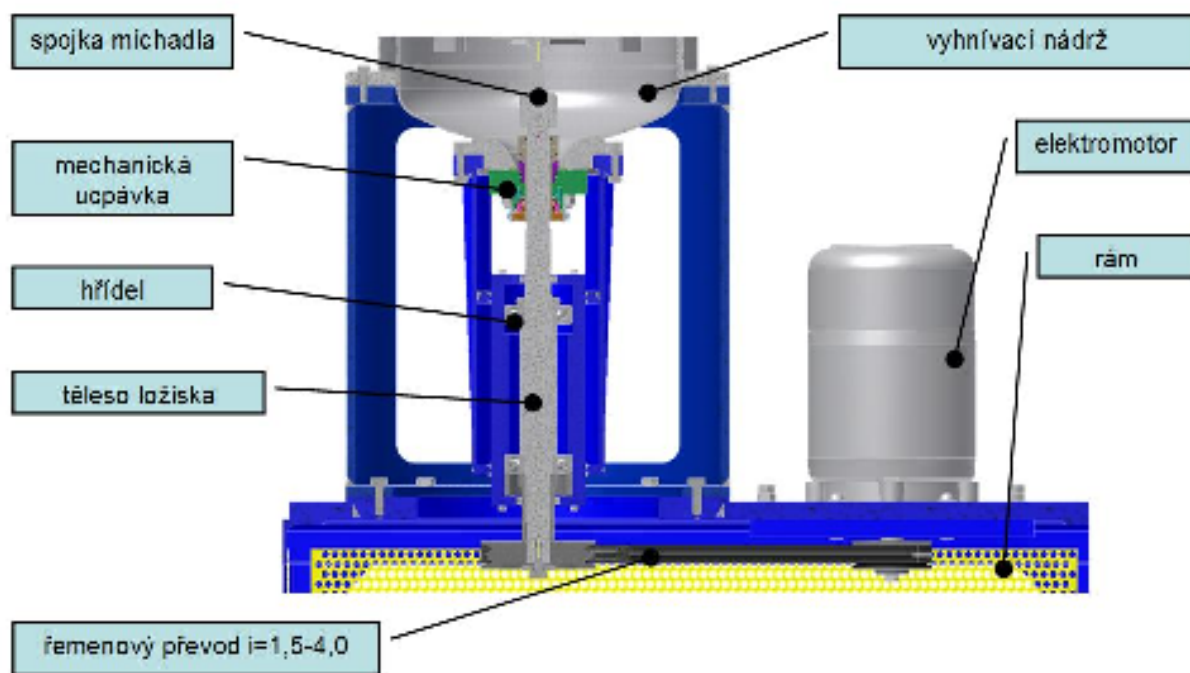
Konstrukční řešení celého fermentačního zařízení vyplynulo jednak z technologických aspektů (teplota, tlak, složení substrátu, pH), používaných konstrukčních řešení (míchání, přenos tepla) a požadavků, kterých nebylo ani málo ani mnoho. V této části bude popsáno definitivní konstrukční řešení celého aparátu vyobrazeného na obr. 12.



Obr. 12. Konstrukční řešení laboratorního fermentoru.

Jak již bylo několikrát uvedeno, tak fermentor bude sloužit k přípravě bioplynu ze substrátu o objemu cca 30 l. Míchání aparátu budou zajišťovat vyměnitelná, polohovatelná axiální nebo radiální míchadla umístěná na centrálním hřídeli se spodním pohonem, kam je potřebný příkon přiváděn z frekvenčně řízeného motoru pomocí řemenového převodu s převodem $i = 1,5$ (viz. obr. 13). Konstrukce celého pohonu je řešena tak, že při použití pomaloběžných míchadel, tj. míchadel s nízkými frekvencemi otáčení, se dá převodový poměr kvůli možnému přehřívání motoru jednoduše změnit až na $i = 4$, což zajišťují snadno vyměnitelné řemenice s kuželovými pouzdry a nastavitelná osová vzdálenost mezi motorem a hřídelem míchadla. Prostor mezi hřídelem a nádobou je utěsněn pomocí mechanické ucpávky s dvojitým hrazením, kde jako těsnící médium bude použita voda cirkulující v nuceném okruhu.

Konstrukce vyhnívací nádoby byla navržena tak, aby byla zajištěna dostatečná možnost čištění, plnění a vypouštění nebo možnost umístění různých snímačů v různých místech nádoby. Fermentor má demontovatelné horní víko, na kterém se nalézají vstupy pro nalévání substrátu, malé kruhové průhledítko a zátky sloužící k instalaci různých snímačů. Víko je staženo k nádobě pomocí šroubů s okem a utěsněno, z důvodů častého demontování, měkkým silikonovým těsněním. Uvnitř nádoby jsou pak umístěny čtyři demontovatelné nárazníky zabráňující rotaci vsádky. Při pohledu na obr. 12 je vidět, že čelu celého fermentoru vévodí po jeho téměř celé výšce průhledítko, které zajistí dostatečný pohled jak na cirkulaci vsádky v bioreaktoru, tak na případnou tvorbu pěny. Dále jsou v nádobě umístěny návarky pro sondy a to v rovině působení míchadla a v místě výskytu plynné fáze, přičemž nepoužitá měřicí místa jsou zaslepena zátkami a utěsněna vitonovými O-kroužky.



Obr. 13. Detail pohonu fermentoru.

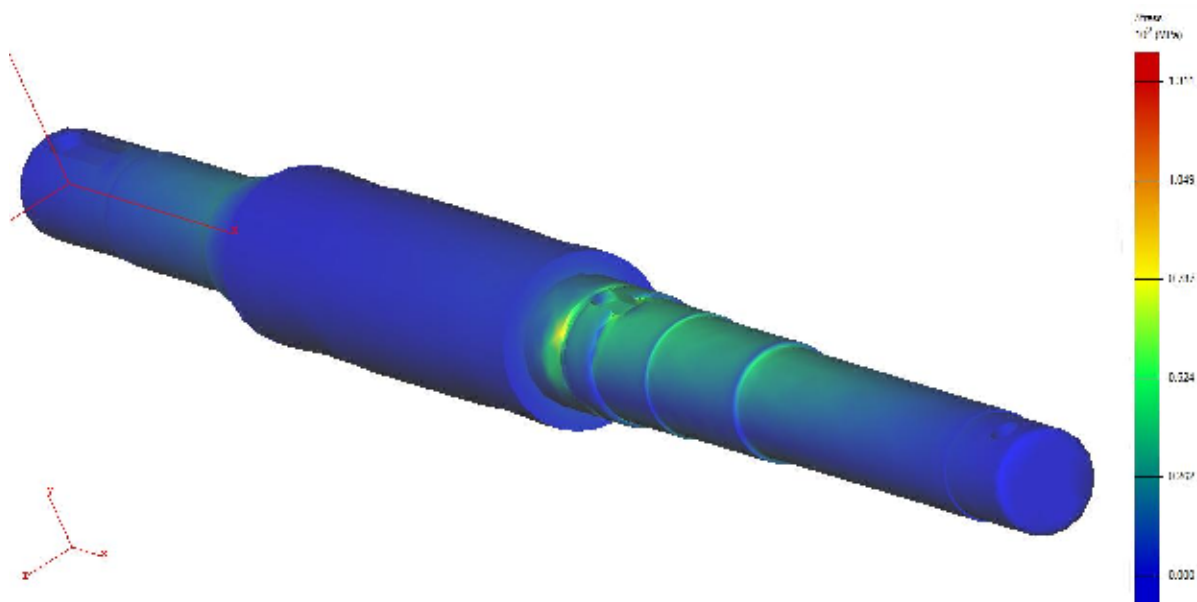
V této části bylo velmi stručně pojednáno o základních konstrukčních prvcích celého zařízení. V dalších částech tohoto článku bude pojednáno o výpočtech nejdůležitějších částí aparátu, mezi které patří návrh a výpočet pohonu včetně návrhu hřídele, pevnostní výpočet duplikačního pláště zatíženého vnitřním přetlakem a nakonec výpočet nádoby zatížené vnějším přetlakem.

7. Výpočet pohonu a návrh hřídele fermentoru

V kapitole 4.1. bylo uvedeno, že pro mechanicky míchané fermentory s centrální hřídelí se potřebný příkon, dostačující pro promíchání vsádky a její homogenizaci, pohybuje v hodnotách cca 70 W/m^3 a více. Z této hodnoty lze vyjít i při odhadu velikosti elektromotoru s tím, že v našem případě bude maximální objem vsádky cca 45 l. Z předchozích měření a zkušeností byl s nutnou rezervou volen třífázový, šestipólový asynchronní motor o výkonu 1,1 kW s výstupními otáčkami 915 ot/min.

Síla, působící od řemenového převodu (výpočet podle [9]), a síla, která by vznikla při zablokování míchadla. To jsou zatížení, která způsobují ohybové momenty na hřídeli míchadla. Hřídel je namáhán kombinovaně a to jak krouticím, tak i ohybovým momentem vyvolaným působením zmíněných silových účinků. Výpočet nejmenšího průměru hřídele byl stanoven pomocí výpočtového postupu E.E.U.A [8] a je roven $16,6 \text{ mm}$.

Rozměry hřídele a jeho odstupňování jsou dány především přípojemovými rozměry komponent. V tomto případě nehraje žádnou roli např. průměr pod ložisky, ale průměr pod ucpávkou. Jelikož na utěsnění fermentoru je použita mechanická ucpávka, tak proto byla zvolena tato robustnější konstrukce resp. odstupňování hřídele, poněvadž mechanické ucpávky se standardně dodávají od průměrů 25 mm. Na obr. 14 je k nahlédnutí numerická analýza průběhu napětí u skutečného hřídele zatíženého jak silovými účinky, tak krouticím momentem.

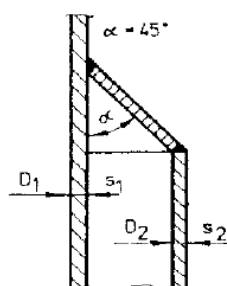


Obr. 14. Průběh napětí podél hřídele.

8. Pevnostní výpočet duplikátorového pláště

Výpočet válcových skořepin s duplikátorovým pláštěm na zatížení vnitřním přetlakem se provádí podle normy ČSN 69 0010 část.4.17, přičemž dimenzování tloušťky stěny pláště duplikátoru upravuje norma ČSN 69 0010 část 4.5.

Duplikátorový plášť je vyroben z austenitické chromniklové oceli 1.4541 o mezi kluzu $\sigma_{Kl} = 226 \text{ MPa}$, která odpovídá teplotě přibližně 75°C . Vnitřní přetlak uvnitř nádoby je přibližně dán výtlačným tlakem použitého čerpadla, v tomto případě o maximální výtlačné výšce 60 m, což odpovídá vnitřnímu přetlaku 0,6 MPa. Duplikátor je tvořen válcovou nádobou s navařovanými kuželovými přechody (obr. 11, 15) pomocí kombinovaných svarů a to tupými a následně koutovými.



D_1 – vnitřní průměr nádoby	294 mm
D_2 – vnitřní průměr duplik.pláště	334 mm
s_1 – provedená tloušťka stěny nádoby	3 mm
s_2 – provedená tloušťka stěny duplik.pláště	3 mm

Obr. 15. Schematické znázornění spoje duplikačního pláště s kuželovým přechodem

Při výpočtu duplikátorového pláště na vnitřní přetlak byla stanovena minimální tloušťka stěny 1,46 mm, provedená tloušťka je 3 mm, což tedy vyhovuje. Následující výpočty na zkušební přetlak, dovolený přetlak, spojení duplikátorového pláště kuželovým přechodem, zatížení vlastní silou, na nízkocyklickou únavu a výpočty únosnosti svarových spojů potvrdily správnost a dostatečnou pevnost navrženého konstrukčního řešení duplikátorového pláště.

9. Pevnostní výpočet nádoby fermentoru

Pevnostní výpočet tlakové nádoby fermentoru vychází z normy ČSN 69 0010 části 4.5. V duplikátorovém plášti byl stanoven maximální přetlak 0,6 MPa, jak tomu bylo uvedeno v kapitole 5.2. Co se týče samotného návrhu a výpočtu minimální tloušťky stěny, tak musí být

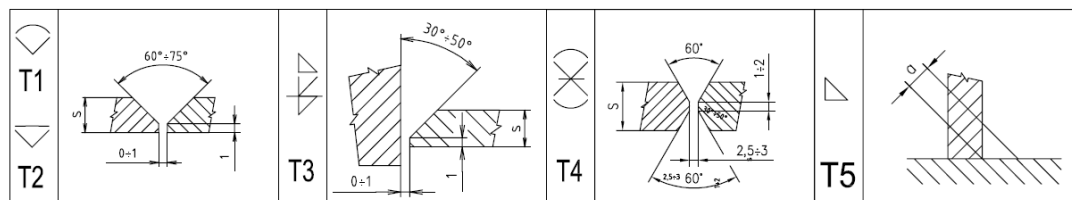
provedena pro nejhorší podmínky, které mohou nastat, v tomto případě tedy pro maximální tlakový rozdíl mezi duplikátorem a nádobou, kterého se dosáhne tehdy, bude-li v provozu temperační okruh s 0,6 MPa v duplikátoru a nádoba bude nenatlakovaná.

Duplikátorový plášť je vyroben z austenitické chromniklové oceli 1.4541 o mezi kluzu $\sigma_{Kl} = 226 \text{ MPa}$, která odpovídá teplotě přibližně 75 °C. Plášť je vytvořen pomocí skruženého a následně svařeného plechu svařeného tupým svarem (obr. 11).

Z provedeného pevnostního výpočtu byla stanovena minimální tloušťka stěny nádoby 2,79 mm, přičemž provedená tloušťka stěny je 3 mm, což vyhovuje. Dále byla samozřejmě nádoba podrobena výpočtům na zkušební a dovolený přetlak, přičemž konstrukce nádoby všem pevnostním výpočtům jednoznačně vyhověla.

10. Technologie výroby fermentoru

Nejkomplikovanější výrobní částí celého fermentoru byla nádoba včetně členitého duplikátorového pláště. Nádobu tvoří skroužený plech (obr. 11.) zavařený tupým svarem T1 (obr. 16) a k němu je přivařeno klenuté dno, příruba víka a duplikátorový plášť. Celý komplet je sešroubován s rámem fermentoru, který je vyroben z konstrukční oceli ČSN 11 373.1 s následnou povrchovou úpravou. V našem případě byla použita vypálená prášková barva, která vytváří celistvý a dobře omyvatelný povrch. Nerezová nádoba byla po úplném svaření mořena ve 20% roztoku kyseliny dusičné kvůli pasivaci a dekontaminaci povrchu. Nejdůležitější částí celé konstrukce se tak staly svarové spoje upravovány podle ČSN 69 0010 části 6.2, od nichž byla požadována 100% těsnost a pevnost. Na nádobě resp. celém fermentoru se používaly tupé svary, koutové svary nebo jejich vzájemné kombinace (obr. 16). Metody svařování se lišily podle druhu svařovaného materiálu. Veškeré nerezové součásti (nádoba, duplikátor, návarky, hrdla, příruby, dno) byly svařovány v ochranné atmosféře metodou TIG, svařování v ochranném neutrálním plynu s netavicí se wolframovou elektrodou, podle EN ISO 4063.



Obr. 16. Přehled použitých tvarů svarových ploch dle ČSN EN 29692.

11. Závěr

Cílem této práce bylo nejprve shrnout dosavadní teoretické znalosti, experimentální výsledky a provozní zkušenosti všech podstatným parametrů, které mají vliv na konstrukci fermentačních zařízení. Bioreaktory většinou pracují v rozmezí teplot 30 až 60 °C, pH kolísá v intervalu mezi 6,2 – 7,8, vliv tlaku je zanedbatelný a samozřejmě také záleží i na složení substrátu, při jehož anaerobním vyhnívání vzniká požadovaný bioplyn. K ohřevu vsádky nejčastěji se nejčastěji používá teplá voda ohřátá spaliny z kogeneračních jednotek a k promíchávání se nejčastěji používají mechanické míchací systémy s centrální hřídelí ať už s vrchním či spodním pohonem. Takto získané poznatky byly dále aplikovány na návrh a konstrukci reálného bioreaktoru, který bude sloužit k přípravě nejen bioplynu, ale i např. bioethanolu nebo biovodíku.

V současné době je již fermentor vyroben a nyní je fázi postupného uvádění do provozu, což s sebou přináší i další konstrukční řešení uchycení jednotlivých snímačů, instalace nucených okruhů (temperační, ucpávkový) a vyřešení programového vybavení sloužícího pro lepší efektivitu měřených dat a jejich následného zpracování. Na obr. 17 je k nahlédnutí

aktuální stav celého aparátu. Srdcem každé bioplynové stanice je fermentační zařízení a v tomto případě tomu nemůže být jinak. Fermentor se tak stává plnohodnotnou součástí experimentální, poloprovozní bioplynové stanice budované v halových laboratořích Ústavu procesní a zpracovatelské techniky Ú 12118.



Obr. 17. Fermentor v halové laboratoři Ústavu procesní a zpracovatelské techniky Ú 12118

Seznam symbolů

b	šířka narážky	[mm]
d	průměr míchadla	[mm]
D	průměr nádoby	[mm]
D_1	vnitřní průměr nádoby	[mm]
D_2	vnitřní průměr duplikátorového pláště	[mm]
H	výška hladiny vsádky v nádobě	[mm]
H_2	vzdálenost spodní hrany lopatky míchadla ode dna nádoby	[mm]
H_3	vzdálenost spodních hran lopatek jednotlivých míchadel tvořících etážové míchadlo	[mm]
i	převodový poměr	[-]
p	vzdálenost spodní hrany narážky ode dna nádoby	[mm]
s_1	provedená tloušťka stěny nádoby	[mm]
s_2	provedená tloušťka stěny duplikátorového pláště	[mm]
t	teplota	[°C]

Řecké symboly:

α	úhel sklonu kuželového přechodu	[deg]
ε	měrný příkon	[W.m ⁻³]
σ_{Kt}	mez kluzu	[MPa]
$\sigma_{Kt}^{20^\circ\text{C}}$	mez kluzu při teplotě 20 °C	[MPa]
σ_{Pt}	mez pevnosti	[MPa]

Seznam literatury

- [1] Straka, F. a kol.: *Bioplyn*. Praha: GAS s.r.o., 2006, s. 706.
- [2] Schulz, H., Eder, B.: *Bioplyn v praxi*. Ostrava: HEL s.r.o., 2004, s. 167.
- [3] Kaštánek, F.: *Bioinženýrství*. Praha: Academia, 2001, s. 334.
- [4] Jirout, T., Rieger, F., Moravec, J.: *Studie míchání anaerobních fermentačních reaktorů na BPS. [Výzkumná zpráva]*. Praha: ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav procesní a zpracovatelské techniky, 2008, s. 22.
- [5] Holm-Nielsen, J.B., Al Seadi, T., Oleskowicz-Popiel, P.: *The future of anaerobic digestion and biogas utilization*. ScienceDirect, Elsevier, 2009, s. 7.
- [6] Kaparaju, P., Buendia, I., Ellegaard, L., Angelidakia, I.: *Effects of mixing on methane production during thermophilic anaerobic digestion of manure: Lab-scale and pilot-scale studies*. ScienceDirect, Elsevier, 2007, s. 10.
- [7] Ward, A.J., Hobbs, P.J., Holliman, P.J., Jones, D.L.: *Optimisation of the anaerobic digestion of agriculture resources*. ScienceDirect, Elsevier, 2008, s. 13.
- [8] Ditl, P., Novák, V.: *Dimenzování hřídelů míchacích zařízení. [Výzkumná zpráva]*. Praha: ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav procesní a zpracovatelské techniky, s. 11.
- [9] ČSN 02 3111: *Hnací klínové řemeny klasických řemenů. Výpočet převodů a předávaných výkonů.*, 1987
- [10] ČSN 69 0010: *Tlakové nádoby stabilní. Technická pravidla.*, 1993