

Mendelova univerzita v Brně
Agronomická fakulta

TECHNIKA PRO ZPRACOVÁNÍ ODPADŮ II

Ing. Petr Junga, Ph.D.
doc. Ing. Tomáš Vítěz, Ph.D.
doc. Mgr. Monika Vítězová, Ph.D.
Mgr. Milan Geršl, Ph.D.

**Mendelova univerzita v Brně
Agronomická fakulta**

TECHNIKA PRO ZPRACOVÁNÍ ODPADŮ II

**Ing. Petr Junga, Ph.D.
doc. Ing. Tomáš Vítěz, Ph.D.
doc. Mgr. Monika Vítězová, Ph.D.
Mgr. Milan Geršl, Ph.D.**

Brno, 2015



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



Tato publikace je spolufinancována z Evropského sociálního fondu a státního rozpočtu České republiky.

Byla vydána za podpory projektu OP VK CZ.1.07/2.2.00/28.0302 Inovace studijních programů AF a ZF MENDELU směřující k vytvoření mezioborové integrace.

© Ing. Petr Junga, Ph.D., doc. Ing. Tomáš Vítěz, Ph.D., doc. Mgr. Monika Vítězová, Ph.D., Mgr. Milan Geršl, Ph.D., 2015

ISBN 978-80-7509-208-3

ISBN 978-80-7509-209-0 (soubor)

ISBN 978-80-7509-207-6 (I. díl)

OBSAH

1. ZÁKLADNÍ BIOLOGICKÉ PRINCIPY VYUŽÍVANÉ V RÁMCI ZPRACOVÁNÍ ODPADŮ.....	8
1.1 Mikroorganismy a jejich aktivity při zpracování a využívání bioodpadů.....	9
1.2 Výživa mikroorganismů.....	9
1.3 Metabolismus mikroorganismů	11
1.4 Ekologie mikroorganismů.....	15
1.5 Charakteristika jednotlivých skupin mikroorganismů	20
2. TECHNIKA PRO BIOPLYNOVÉ TRANSFORMACE.....	22
2.1 Bioplynové transformace	22
2.2 Proces anaerobní fermentace.....	23
2.3 Bioplynové stanice	26
2.4 Vstupní suroviny pro bioplynové stanice	32
2.5 Provozní parametry bioplynových stanic	32
2.6 Bioplyn	36
2.7 Fermentační zbytek	49
3. KOMPOSTÁRNY	51
3.1 Proces kompostování.....	52
3.2 Vhodné suroviny a odpady pro aerobní kompostování.....	57
3.3 Zásady při kompostování	57
3.4 Technologie kompostování	60
3.5 Kompostování na volné ploše	60
3.6 Technologie pro intenzivní kompostování	62
3.7 Vermikompostování	68
3.8 Prosévací a separační zařízení.....	68
4. ČISTÍRNY ODPADNÍCH VOD.....	70
4.1 Odvádění odpadních vod.....	72
4.2 Odpadní vody a jejich znečištění.....	74
4.3 Způsoby čištění odpadních vod.....	84
4.4 Standardní technologická linka čištění odpadních vod.....	85
4.5 Mechanické čištění	85
4.6 Biologické čištění.....	103
4.7 Procesy probíhající při biologickém čištění odpadních vod	104
4.8 Způsoby aerace aktivačních nádrží	106
4.9 Aktivační proces.....	108
4.10 Aktivační systémy	111
4.11 Základní technologické parametry dosazovacích nádrží.....	114
4.12 Biologické kolony	116
4.13 Rotační diskové reaktory.....	118
4.14 Kořenové čistírny odpadních vod.....	119
4.15 Aanerobní čištění odpadních vod	121
4.16 Kalové hospodářství	122

4.17 Zpracování kalů.....	125
5. TECHNIKA PRO ZPRACOVÁNÍ ODPADŮ Z MLÝNŮ, SLADOVEN, CUKROVARŮ A PIVOVARŮ	136
5.1 Zpracování odpadů z mlynářenského průmyslu.....	137
5.2 Odpady ze sladovnického průmyslu.....	137
5.3 Odpady z pivovarnického průmyslu.....	138
5.4 Odpady z cukrovarnického průmyslu.....	138
5.5 Odpady z lihovarnického průmyslu.....	140
5.6 Odpady ze škrobářenského průmyslu.....	140
5.7 Odpady z vinařského průmyslu.....	141
6. SANACE PŮD A VOD KONTAMINOVANÝCH ROPNÝMI PRODUKTY	142
6.1 Sanace nenasycené zóny <i>in situ</i>	143
6.2 Biologické metody <i>in situ</i>	143
6.3 Fyzikální a chemické metody <i>in situ</i>	145
6.4 Sanace nenasycené zóny <i>ex situ</i>	146
6.5 Biologické metody <i>ex situ</i>	147
6.6 Sanace nasycené zóny a vod <i>in situ</i>	149
6.7 Biologické metody <i>in situ</i>	150
6.8 Fyzikální a chemické metody <i>in situ</i>	150
6.9 Sanace nasycené zóny a vod <i>ex situ</i>	151
6.10 Biologické metody <i>ex situ</i>	151
6.11 Fyzikální a chemické metody <i>ex situ</i>	151
SEZNAM LITERATURY	153

Autorství a spoluautorství jednotlivých kapitol druhého dílu

Ing. Petr Junga, Ph.D. (kapitoly 2, 3, 4, 5)

doc. Ing. Tomáš Vítěz, Ph.D. (kapitoly 1, 2, 3, 4)

doc. Mgr. Monika Vítězová, Ph.D. (kapitoly 1, 2, 3, 4)

Mgr. Milan Geršl, Ph.D. (kapitola 6)

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Principy mikrobiálních přeměn organických látek.....	12
Obrázek 2: Tvary bakterií, Rosypal (1994), upraveno	20
Obrázek 3: Znázornění rozkladu organického materiálu na bioplyn	24
Obrázek 4: Obecné schéma bioplynové stanice (zdroj: Hobson et al., 1981, upraveno).....	26
Obrázek 5: Jednostupňová (A) a dvoustupňová (B) bioplynová stanice	30
Obrázek 6: Kontinuálně provozované fermentory	31
Obrázek 7: Diskontinuálně provozovaný fermentor	31
Obrázek 8: Rychlost růstu mikroorganismů v různých teplotních režimech	33
Obrázek 9: Možnosti umístění zásobníku bioplynu	38
Obrázek 10: Integrovaný jednomembránový zásobník bioplynu	39
Obrázek 11: Integrovaný dvoumembránový zásobník bioplynu	39
Obrázek 12: Samostatně stojící kulový zásobník bioplynu	40
Obrázek 13: Samostatně stojící zásobník bioplynu, vak.....	41
Obrázek 14: Způsoby využití bioplynu, (zdroj: Reinhart, 1993, upraveno)	41
Obrázek 15: Stirlingův motor.....	43
Obrázek 16: Schéma trigenerační jednotky	44
Obrázek 17: Schéma funkce mikroturbíny.....	45
Obrázek 18: Schéma funkce palivového článku	45
Obrázek 19: Způsoby nakládání s fermentačním zbytkem.	50
Obrázek 20: Teplotní průběh kompostování	53
Obrázek 21: Mikroorganismy v kompostu.....	54
Obrázek 22: Spotřeba kyslíku a produkce oxidu uhličitého	55
Obrázek 23: Hmotnostní bilance kompostování	56
Obrázek 24: Schema funkce pásových zakládek s pasivním provzdušňováním	61
Obrázek 25: Schema funkce pásových zakládek s aktivním provzdušňováním	62
Obrázek 26: Kompostovací systém s vrtnou věží a detail šnekového míchadla.....	63
Obrázek 27: Kompostovací žlaby s překopávacím zařízením	64
Obrázek 28: Rotační bioreaktor	65
Obrázek 29: Kompostovací boxy	66
Obrázek 30: Věžový bioreaktor	67
Obrázek 31: Tunelový bioreaktor	68
Obrázek 32: Jednotná stoková soustava.....	72
Obrázek 33: Oddílná stoková soustava	73
Obrázek 34: Zdroje balastních vod	76
Obrázek 35: Blokové schéma standardní technologické linky čistírny městských odpadních vod.....	85

Obrázek 36: Lapák štěrku	87
Obrázek 37: Česle, ručně stírané.....	88
Obrázek 38: Česlicový koš.....	89
Obrázek 39: Pásové česle	90
Obrázek 40: Step screen česle, průběh vynášení nečistot, 1-3.....	90
Obrázek 41: Rotační česle.....	91
Obrázek 42: Rotační síto	92
Obrázek 43: Ultrajemné česle	93
Obrázek 44: Pračka a lis na shrabky	94
Obrázek 45: Komorový lapák písku.....	95
Obrázek 46: Štěrbínový lapák písku	95
Obrázek 47: Vertikální lapák písku.....	96
Obrázek 48: Vírový lapák písku.....	97
Obrázek 49: Provdzušňovaný lapák písku	98
Obrázek 50: Pračka písku.....	98
Obrázek 51: Podélná usazovací nádrž.....	100
Obrázek 52: Kruhová usazovací nádrž.....	101
Obrázek 53: Vertikální usazovací nádrž	102
Obrázek 54: Základní pochody v anaerobním prostředí	105
Obrázek 55: Základní pochody v oxickém prostředí	105
Obrázek 56: Schema toku při aktivačním rocesu.....	108
Obrázek 57: Směšovací systém.....	112
Obrázek 58: Směšovací systém.....	112
Obrázek 59: Aktivace s oddělenou regenerací	113
Obrázek 60: Šachtová aktivace	113
Obrázek 61: Oběhová aktivace	114
Obrázek 62: Biologická kolona.....	116
Obrázek 63: Rotační diskový reaktor	119
Obrázek 64: Kořenová čistírna odpadních vod	119
Obrázek 65: Kalové hospodářství čistíren odpadních vod.....	125
Obrázek 66: Kalové pole.....	133
Obrázek 67: Sítopásový lis.....	133
Obrázek 68: Šnekový lis	134
Obrázek 69: Komorový lis	135
Obrázek 70: Odstředivka.....	135

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Aktuální postupy a výsledné produkty biotechnologického zpracování odpadů.....	8
Tabulka 2: Rozdělení mikroorganismů podle typu látkové výměny	10
Tabulka 3: Porovnání katabolizmu a anabolizmu.	11
Tabulka 4: Charakteristika katabolických procesů	13
Tabulka 5: Přírodní organické látky – jejich složení, výskyt a rozklad	13
Tabulka 6: Charakteristika makromolekul vznikajících humifikací (Gobat et al., 2004).	15
Tabulka 7: Členění mikroorganismů podle nároků na teplotu prostředí	16
Tabulka 8: Hodnoty pF kritické pro množení a činnost mikroorganismů	17
Tabulka 9: Členění mikroorganismů podle nároků na pH	17
Tabulka 10: Dělení anaerobního procesu podle teplot, při kterých probíhá	29
Tabulka 11: Složení bioplynu	37
Tabulka 12: Základní fyzikální vlastnosti bioplynu a jeho hlavních složek	37
Tabulka 13: Požadavky na kvalitu biometanu pro možnost jeho dodávky do plynárenských sítí v ČR.....	48
Tabulka 14: Emisní standardy a minimální povolená účinnost čištění	71
Tabulka 15: Specifické množství vody fakturované pro domácnost	73
Tabulka 16: Převažující znečišťující látky v odpadních vodách z různých průmyslových odvětví.....	75
Tabulka 17: Průměrné denní koncentrace znečišťujících látek v odpadních vodách	77
Tabulka 18: Denní produkce znečištění v odpadní vodě vztažená na 1 EO	77
Tabulka 19: Fyzikální principy uplatňované při mechanickém čištění.....	86
Tabulka 20: Technologické parametry usazovacích nádrží	103
Tabulka 21: Oxygenační kapacita při různých způsobech aerace.....	107
Tabulka 22: Přehled základních modifikací aktivačního procesu.....	110
Tabulka 23: Technologické parametry dosazovacích nádrží	115
Tabulka 24: Rozdělení biologických kolon s náplní z plastů.....	118
Tabulka 25: Fyzikální principy uplatňované v kalovém hospodářství.....	122
Tabulka 26: Složení primárního kalu	123
Tabulka 27: Složení přebytečného kalu.	124
Tabulka 28: Dávky srážedla v závislosti v závislosti na požadované, zbytková koncentraci fosforu	125
Tabulka 29: Dosažitelný obsah sušiny podle použité metody a druhu zahušťovaného kalu .	127
Tabulka 30: Kritéria pro zařazení hygienizovaného kalu do třídy I. nebo II., podle vyhlášky MŽP č. 382/2001 Sb.....	131

1. ZÁKLADNÍ BIOLOGICKÉ PRINCIPY VYUŽÍVANÉ V RÁMCI ZPRACOVÁNÍ ODPADŮ

V současné době se při zpracování organických odpadů využívá v podstatě sedmi základních biologických principů (tab. 1). Tyto principy jsou založeny na metabolických aktivitách různých skupin mikroorganismů, některé na interakcích mezi mikroorganismy a bezobratlými živočichy. Výsledkem těchto procesů je látková přeměna organických odpadů případně jejich energetické využití. Biologické zpracování má zároveň za následek zmenšování objemu a snižování hmotnosti odpadů, jejich hygienizaci a případně i omezování úniku skleníkových plynů do atmosféry.

Nejvíce využívaným aerobním zhodnocením zdravotně nezávadných organických odpadů je kompostování. V případě cíleného využití žížal hovoříme o vermikompostování. K rychlé hygienizaci zemědělských (většinou tekutých) bioodpadů a kalů z čistíren odpadních vod slouží jejich aerobní termofilní zpracování. Tzv. biologické sušení spočívá v intenzivním provzdušňování a promíchávání odpadu v uzavřených kontejnerech, což vede ke zvyšování teploty, částečnému rozkladu organických látek a postupnému vysušování odpadu. Jde o alternativu mechanicko-biologické úpravy tuhých komunálních odpadů (KO), založené na kombinaci fyzikálních a biologických (aerobních i anaerobních) postupů, kterými by měl projít KO před uložením na skládky. Velký rozvoj zaznamenávají v poslední době anaerobní technologie zaměřené na energetické využití biologicky rozložitelných odpadů, tzn. na výrobu bioplynu nebo etanolu.

Tabulka 1: Aktuální postupy a výsledné produkty biotechnologického zpracování odpadů

Biotechnologický postup	Typ odpadu	Produkt
Kompostování	BRO ¹ a BRKO ² nekontaminované	Kompost
Vermikompostování	Zemědělské odpady, kaly z ČOV ³ (nekontaminované)	Biohumus, vermibílkovina k výrobě některých krmiv a léčiv
Aerobní termofilní zpracování	Zemědělské odpady, kaly z ČOV (nekontaminované)	Organické hnojivo
Biologické sušení	BRO, kaly	Palivo (sypké, tvarované)
Anaerobní zpracování (fermentace)	BRO (kromě dřeva)	Bioplyn, zbytková org. hmota
Lihové kvašení	Odpadní cukry	Bioetanol
Mechanicko-biologické zpracování	Komunální odpady	Stabilizovaný bioodpad, bioplyn

Vysvětlivky:

¹ Biologicky rozložitelné odpady, ² Biologicky rozložitelné komunální odpady, ³ Čistírný odpadních vod

1.1 Mikroorganismy a jejich aktivity při zpracování a využívání bioodpadů

Mikroorganismy jsou morfologicky, fyziologicky i geneticky odlišné skupiny mikroskopických organismů, systematicky řazené do říší *Archaea*, *Bacteria* a *Eucarya*. Prokaryotní (bezjaderné) mikroorganismy, tj. bakterie a sinice nemají pravé buněčné jádro; jejich jaderná hmota je neohraničena v cytoplazmě. Mezi eukaryotní mikroorganismy s pravým jádrem odděleným od cytoplazmy jadernou membránou patří mikroskopické houby (kvasinky, mikromycety) a dále řasy a prvoci. Samostatnou skupinu tvoří viry. Jsou to částice tvořené pouze genetickým materiálem (buď DNA nebo RNA) a obalovými strukturami; rozmnožují se na úkor napadené hostitelské buňky.

Zhruba 70-85 % z celkové hmotnosti mikrobiálních buněk tvoří voda, zbytek sušina. Sušina obsahuje řadu vysokomolekulárních látek, z nichž největší zastoupení mají proteiny (40 %) a dále polysacharidy (16 %), nukleové kyseliny (14 %) a lipidy (11 %). Mikrobiální buňky obsahují rovněž různé produkty svého metabolismu, jako jsou vitamíny, barviva, antibiotika příp. toxiny.

1.2 Výživa mikroorganismů

Mikroorganismy potřebují ke svému růstu, látkové výměně a množení zdroje energie a biogenních prvků. Uhlík je výchozím prvkem pro biosyntézu aminokyselin, jednoduchých cukrů, nukleotidů a lipidů. Podle toho, z jakého zdroje mikroorganismy uhlík čerpají, je dělíme na autotrofy, kteří získávají uhlík z CO₂ a heterotrofy, pro které jsou zdrojem uhlíku organické látky. Většina mikroorganismů zajišťujících biologické přeměny odpadů patří k heterotrofům. Jako zdroj uhlíku a zároveň i energie jim slouží široká škála jednoduchých i komplexních organických látek jako jsou monosacharidy, polysacharidy, aminokyseliny, proteiny, lipidy aj.

Dusík potřebují mikroorganismy pro tvorbu aminových (-NH₂) a iminových skupin (-NH-). Ty jsou součástí aminokyselin, nukleotidů a řady dalších sloučenin, které tvoří buněčnou hmotu. Mikroorganismy využívají dusík z různých zdrojů. Jsou to především amonné ionty či amoniak, které snadno pronikají do cytoplazmy, dusičnany (které však musí být před využitím redukovány na formu amonnou), dále organické látky, jako jsou aminokyseliny, proteiny, močovina aj. Organické sloučeniny jsou v procesu amonizace postupně enzymaticky štěpeny až na dusík amonný. Některé mikroorganismy mají schopnost poutat

molekulový dusík z atmosféry. Jde o několik desítek druhů, tzv. fixátorů vzdušného dusíku (diazotrofů), které redukuje N_2 na NH_3 . Diazotrofi poutají vzdušný dusík buď v symbióze s rostlinami (např. bakterie rodu *Rhizobium*, aktinomycety rodu *Frankia*), nebo samostatně (např. bakterie rodů *Azotobacter*, *Clostridium*, některé sinice).

Fosfor je stavební složkou nukleových kyselin a některých tuků. Některých organických sloučenin fosforu (adenozindi- a trifosfát; ADP/ATP) využívá buňka k přenosu a akumulaci energie. Nejvýhodnějším zdrojem fosforu pro mikroorganismy jsou soli kyseliny fosforečné. Mikroorganismy rovněž získávají fosfor rozkladem organických látek; proces je katalyzován enzymy fosfatázami.

Síru vyžadují mikroorganismy hlavně pro syntézu některých aminokyselin (cystein, metionin). Přijímají ji v různých formách včetně solí kyseliny sírové – síranů. Pro většinu mikroorganismů jsou zdrojem síry organické sloučeniny, jejichž rozklad je katalyzován enzymy sulfatázami.

Energie je nezbytná především pro biosyntetické procesy, dále pro osmotickou regulaci, difuzi látek přes cytoplazmatickou membránu (=energie osmotická), udržování povrchového náboje mikrobiální buňky, eventuálně pro pohyb buňky a u eukaryot pro proudění cytoplazmy. Podle zdrojů a způsobu získávání energie dělíme mikroorganismy na fototrofní a chemotrofní. Fototrofní mikroorganismy využívají světelné energie a přeměňují ji na chemickou. Chemotrofní mikroorganismy získávají energii oxidací anorganických nebo organických sloučenin.

Fototrofní i chemotrofní mikroorganismy se dále dělí podle toho, z jakých zdrojů získávají uhlík, vodík a elektrony (Tab. 2).

Tabulka 2: Rozdělení mikroorganismů podle typu látkové výměny

Typ látkové výměny	Zdroje energie	Donor elektronů/vodíku	Zdroje uhlíku	Organismy
Chemoorganoheterotrofní	organické sloučeniny	organické sloučeniny, např. $C_6H_{12}O_6$, C_2H_5OH , CH_3OH	organické sloučeniny	živočichové, houby, většina bakterií
Chemoorganoautotrofní		organické sloučeniny, např. CH_3COOH , CH_3OH , $HCOOH$	CO_2	metanogenní archea
Chemolithoheterotrofní	anorganické sloučeniny	anorganické sloučeniny a molekuly, např. H_2	organické sloučeniny	H_2 oxidující bakterie, metanogenní archea

Chemolitoautotrofní		anorganické sloučeniny a molekuly, např. NH^+_4 , NO_2^- , S^{2-} , H_2S , H_2	CO_2	nitrifikační a sulfurikační bakterie, H_2 oxidující bakterie, metanogenní archea
Fotoorganoheterotrofní	světelné záření	organické sloučeniny	organické sloučeniny	zelené a purpurové bakterie
Fotoorganoautotrofní		organické sloučeniny	CO_2	zelené a purpurové bakterie
Fotolithoheterotrofní	světelné záření	anorganické sloučeniny a molekuly, např. H_2S , S	organické sloučeniny	bakterie (purpurové, sírné), některé řasy
Fotolitoautotrofní		anorganické sloučeniny a molekuly, např. H_2O , H_2S , H_2 , S	CO_2	rostliny, řasy, sinice, některé bakterie

1.3 Metabolismus mikroorganismů

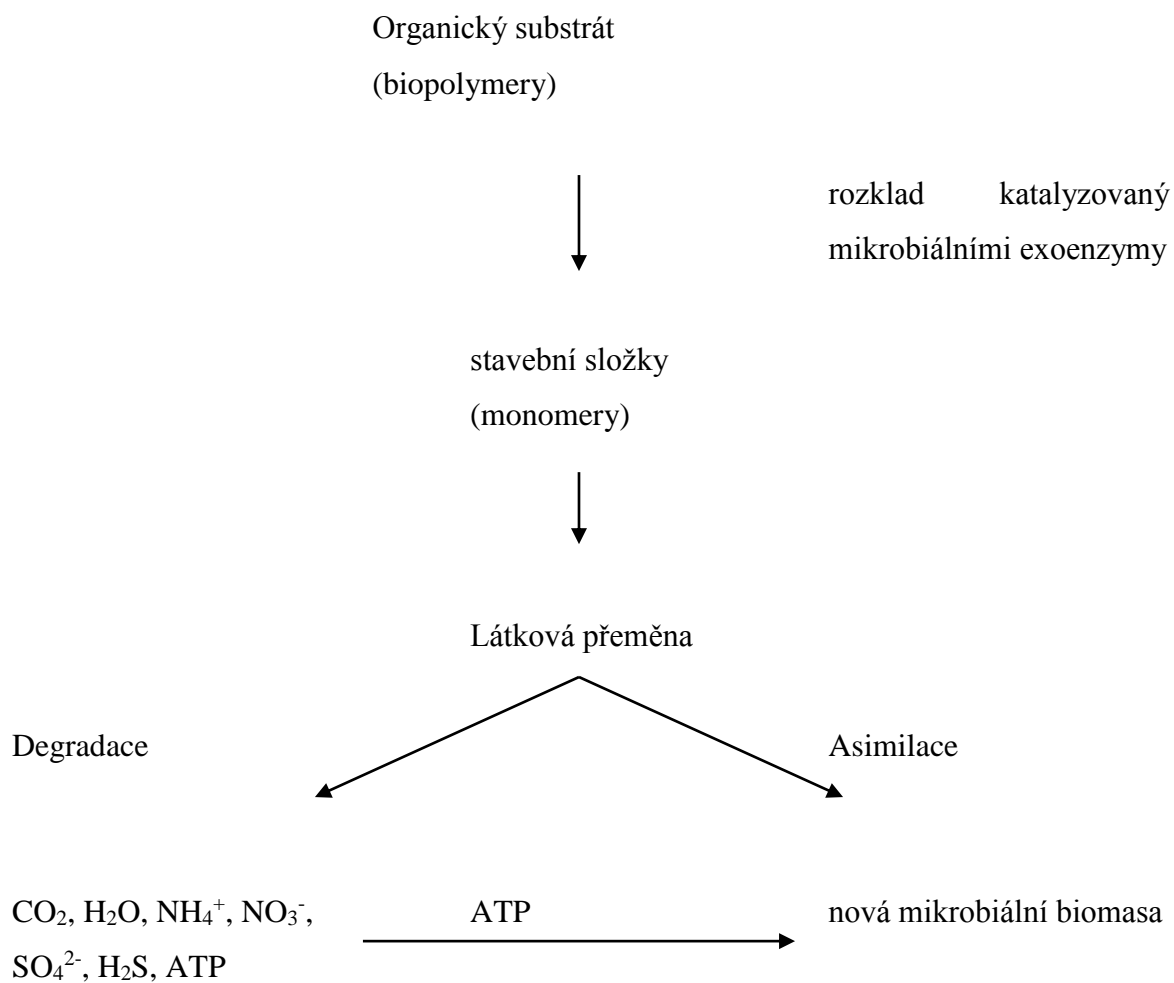
Metabolismus (látková výměna) je soubor procesů, kterými se uskutečňuje příjem látek buňkou, jejich vnitrobuněčné přeměny a vylučování produktů do prostředí. Mikrobiální metabolismus zahrnuje dva typy protichůdných procesů: (a) katabolické a (b) anabolické. V průběhu katabolických procesů jsou složité organické látky oxidovány (rozkládány, disimilovány) na látky jednodušší za současného uvolňování energie.

Procesy anabolické (biosyntetické, asimilační) vyžadují volnou energii využitelnou pro přeměnu látek jednoduchých na látky složitější. Anabolické procesy jsou mnohem rozmanitější než procesy katabolické. Z údajů v Tab. 3 a Obr. 1 vyplývá, že katabolické a anabolické procesy se doplňují, produkty katabolismu jsou využívány v anabolických procesech, naopak produkty anabolických procesů mohou být substrátem pro katabolismus.

Tabulka 3: Porovnání katabolismu a anabolismu.

Charakteristika	Katabolismus	Anabolismus
Látková přeměna	degradace (rozklad)	syntéza (tvorba)
Chemická povaha	oxidace	redukce
Energetický charakter	uvolňování energie	spotřeba energie
Látkové spektrum	široké	úzké (specifické prekurzory)
Výsledné produkty	chemicky jednoduché látky	chemicky složité látky

Vodrážka, 1996 (upraveno)



Obrázek 1: Principy mikrobiálních přeměn organických látek

Jak naznačuje Obr. 1, anabolizmus a katabolizmus jsou propojeny adenzin trifosfátem (ATP). V katabolických procesech se adenzin trifosfát (ATP) vytváří z adenzin difosfátu (ADP), který slouží jako zdroj energie pro procesy anabolické. Katabolickým procesům podléhají různé organické látky, jako jsou polysacharidy, proteiny, tuky a aminokyseliny. Jsou zdrojem energie využívaným buď oxidativně (dýchání, respirace) nebo fermentací (kvašení). Konečnými produkty aerobního využití substrátu jsou CO₂, H₂O a energie. Produktem fermentace jsou především organické kyseliny a alkoholy. Fermentací získává mikrobiální buňka méně energie, část zůstává vázána v konečných produktech (Tab. 4).

Tabulka 4: Charakteristika katabolických procesů

Proces	Terminální akceptor elektronů	Účinnost uvolnění energie	Příklady (organizmy, tkáně)
Aerobní respirace (aerobní dýchání)	O ₂	vysoká	živočišné, aerobní mikroorganizmy, nefotosyntetizující rostlinné buňky
Anaerobní respirace	NO ₃ ⁻ , SO ₄ ²⁻ , CO ₂	nízká	fakultativně anaerobní mikroorganizmy
Fermentace (kvašení)	organické mezi - produkty metabolismu (pyruvát, acetaldehyd, butyrát, sukcinát aj.)	velmi nízká	anaerobní mikroorganizmy, svalové buňky živočichů při velké námaze

Podstatou respiračních procesů je biologická oxidace, která spočívá v přenosu H⁺ z jedné sloučeniny na druhou, přenašečem H⁺ jsou např. flavoproteiny, cytochromy, nukleotidy. Terminálním akceptorem H⁺ jsou při fermentaci organické sloučeniny. Při aerobní respiraci je akceptorem H⁺ molekulový vzdušný O₂, při anaerobní respiraci je to kyslík vázaný v některých anorganických sloučeninách jako jsou NO₃⁻, SO₄²⁻, uhličitany, CO₂ aj.

Katabolické procesy jsou základem koloběhu látek v přírodě, avšak využívá se jich i při zpracování organických odpadů. Mikrobiálním rozkladem přirozených biopolymerů jsou zpět do koloběhu uváděny makrobiogenní a mikrobiogenní prvky. Tab. 5 shrnuje výskyt nejdůležitějších biopolymerů a charakteristiku jejich mikrobiálního rozkladu.

Tabulka 5: Přírodní organické látky – jejich složení, výskyt a rozklad

Látka	Chemické složení	Výskyt	Rozklad; zúčastněné organizmy
Škrob	řetězce poly – α – - D - glukózy	zásobní látka v semenech, hlízách a kořenech rostlin	velmi rychlý; aerobní i anaerobní mikroorganizmy
Pektin	polysacharid na bázi kyseliny galakturonové	lamely mezi buněčnými stěnami mladých rostlin	snadný; mikromycety a bakterie
Proteiny	makromolekuly na bázi aminokyselin	součást buněčné plazmy	poměrně rychlý; aerobní i anaerobní mikromycety a bakterie
Hemicelulózy	polymery tvořené hexózami, pentózami a uronovými kyselinami	strukturní součástí buněčných stěn	snadný až obtížný; aerobní i anaerobní aktinomycety i mikromycety
Tuky a vosky	Tuky: glycerinestery vyšších mastných kyselin Vosky: mastné kyseliny	součástí rostlinných a živočišných tkání	tuky: bakterie, mikromycety, aktinomycety vosky: anaerobní bakterie

Chitin	polymer z N - acetyl-glukozaminu	podpůrné tkáně (u hmyzu)	pomalý; bakterie, mikromycety
Celulóza	řetězce β - 1,4 - D - glukózy	nejvýznamnější polysacharid; buněčné stěny vyšších rostlin	obtížný; (zejména při nízkém pH a inkrustaci ligninem)
Lignin	aromatický polymer koniferylalkoholu a jeho derivátů	spolu s celulózou a hemicelulózami kvantitativně nejvýznamnější strukturní součást rostlin	velmi obtížný

Katabolické a anabolické procesy se uplatňují při postupných biologických přeměnách rostlinných zbytků, jejichž produktem mohou být humusové látky vytvářené jak v přírodním prostředí (půda, voda), tak i v odpadech rostlinného původu.

Tvorba humusových látek zahrnuje rozklad, biochemické modifikace a transformace stavebních složek rostlinné biomasy, především ligninu, vosků, fenolových kyselin. Druhou možností je syntéza humusových látek polykondenzací řady molekul odštěpených z prekurzorů rostlinného původu (např. kys. ferulové, syringové, kávové, protokatechové, z pyrogalolu, konyferyl – alkoholu, katecholu, aj.).

Hlavní rozdíl mezi těmito dvěma cestami je v tom, že první je založena na postupné oxidaci a degradaci existujících rostlinných polymerů, zatímco druhá zahrnuje tvorbu nových makromolekul. Humusové látky však mohou vznikat i mikrobiální syntézou. Řada mikroskopických hub má schopnost tvorby tmavě zbarvených pigmentů, které se po rozkladu biomasy stávají součástí humusu. V závislosti na podmínkách prostředí mohou různé procesy vzniku humusových látek probíhat souběžně.

Konečným produktem uvedených procesů je několik skupin makromolekul, které se liší molekulovou hmotností a rozpustností (Tab. 6). Hymatomelanové kyseliny jsou produktem polykondenzace s napojenými alifatickými molekulami, jako jsou např. bitumeny. Vyskytují se především v surovém humusu a v rašelině. Žlutě zbarvené fulvokyseliny mají dlouhé alifatické nebo peptidové boční řetězce napojené na aromatické jádro. Na fulvokyseliny se aktivně navazuje řada kationtů. Huminové kyseliny se od fulvokyselin liší především velkým počtem aromatických struktur a kratšími alifatickými řetězci. Nejstabilnější frakcí humusových látek jsou huminy, jejichž organické složky jsou v půdě a kompostech obvykle vázány na jílové minerály.

Tabulka 6: Charakteristika makromolekul vznikajících humifikací (Gobat et al., 2004).

Typ makromolekul	Molekulová hmotnost (Da)	Rozpustnost			
		voda	alkohol	alkálie	kyseliny
Hymatomelanové kyseliny	500-900	ne	ano	ano	ne
Fulvokyseliny	900-2·10 ³	ano	ano	ano	ano
Humínové kyseliny					
šedé	2·10 ³ - 5·10 ⁴	ne	ne	ano	ne
hnědé	5·10 ⁴ - 10 ⁵	ne	ne	ano	ne
Huminy	10 ⁵ - 5·10 ⁵	ne	ne	ne	ne

Intenzivní metabolismus mikrobiálních buněk je umožněn jejich specifickými vlastnostmi, mezi něž patří:

- Příjem živin a výdej zplodin metabolismu celým povrchem buňky. Hodnota poměru mezi povrchem mikrobiálních buněk k jejich objemu (tj. specifický povrch), je vysoká. Např. mikrokoky s průměrem buněk 0,5 μm vykazují specifický povrch 120000, zatímco prvoci s průměrnou velikostí 150 μm mají specifický povrch cca 400. Srovnatelné hodnoty čeho?? slepičího vejce činí 1,5 a člověka 0,3 (Stárka, 1959).
- Bohatý enzymatický aparát: udává se, že v jedné bakteriální buňce může být kolem 2000 enzymů (Maier et al., 2000). Jde o enzymy konstitutivní, které jsou stálou součástí buňky (např. enzymy katalyzující využití hexoz) a enzymy inducibilní (adaptivní), které buňka syntetizuje jen tehdy, je-li v prostředí látka, pro jejíž přeměnu je nový enzym nezbytný (např. induktorem enzymů dýchacího řetězce je O₂). Inducibilní enzymy mohou podléhat represí (např. přítomnost celulózy indukuje syntézu celuláz; je-li ale v prostředí vedle induktoru – celulózy snadněji využitelný substrát např. glukóza, mikrobiální buňka syntézu celuláz zastaví). Díky specifickým vazbám mezi substrátem a enzymy může být rychlost enzymaticky katalyzovaných reakcí 108 až 1020 násobně vyšší než srovnatelných ryze chemických reakcí (Lehninger, 1975).
- Schopnost velmi rychle syntetizovat bílkoviny díky obrovskému počtu ribozomů v mikrobiálních buňkách. Ribozomy spolu s RNA tvoří až 40 % sušiny bakteriálních buněk.

1.4 Ekologie mikroorganismů

Růst, množení a metabolismus mikroorganismů jsou výrazně ovlivňovány faktory vnějšího prostředí, a to jak abiotickými (teplota, dostupnost vody, pH, obsah kyslíku, záření, aj.), tak

biotickými (jiné mikroorganismy, rostliny, živočichové). Mikroorganismy se přizpůsobují změnám vnějšího prostředí mnohem lépe a rychleji než jiné organismy a mnohé zůstávají aktivní nebo alespoň přežívají v podmínkách, za kterých jiné organismy hynou.

Abiotické faktory

Teplotní rozmezí, ve kterém se mikroorganismy mohou množit a být metabolicky aktivní je velmi široké (Tab. 7). Rozeznáváme tři skupiny mikroorganismů lišících se svými teplotními nároky.

Tabulka 7: Členění mikroorganismů podle nároků na teplotu prostředí

Mikroorganismy	Teplota [°C]		
	minimum	optimum	maximum
psychrofilní	-8 až 0	10 až 20	21 až 30
mezofilní	10 až 15	25 až 35	35 až 45
termofilní	25 až 40	50 až 60	70 až 90

Psychrofilní mikroorganismy se vyznačují pomalým metabolismem i množením, s klesající teplotou se rychlost rozmnožování i intenzita metabolismu postupně snižují. Některé z nich, např. řada mikromycet, rostou i při teplotách nižších než -10 °C, což je umožněno vysokým osmotickým tlakem uvnitř buněk i vyšším obsahem tuků. Mezofilní mikroorganismy, mezi něž patří většina dnes známých mikroorganismů, snáší dobře i nízké teploty, při nichž je však jejich metabolismus zpomalen. Při překročení maximálních teplot aktivity mezofilů ustávají; teploty vyšší než 65 °C způsobují - pokud netvoří termorezistentní endospóry – lyzi buněk. Mezi mezofilní mikroorganismy patří většina patogenních mikroorganismů, k jejichž inaktivaci lze vyšších teplot účinně využít (viz kapitola Kompostování).

Termofilní mikroorganismy mohou růst a množit se i při teplotách, při nichž většina jiných organismů včetně rostlin a živočichů hyne. Jsou vybaveny extrémně stabilními proteiny. Termofilní mikroorganismy se vyskytují např. v termálních vodách, v některých odpadních vodách, ve zrajících kompostech a rovněž v chlévském hnoji.

Voda, která tvoří 75 - 90 % hmotnosti mikrobiálních buněk, je nezbytná pro růst a metabolismus mikroorganismů. Podle nároků na dostupnou vodu rozlišujeme mikroorganismy hydrofilní, mezofilní a xerofilní (Tab.8). Hydrofilní mikroorganismy mohou využívat pouze vodu volnou, která není fyzikálně či chemicky vázána. Typickými hydrofilními mikroorganismy jsou bakterie a sinice. Mezofilní a zejména xerofilní mikroorganismy jsou schopny zčásti využívat i vodu částečně fyzikálně či chemicky vázanou. K mezofilům patří kvasinky a většina plísň. Typickými xerofily jsou aktinomycety a mnohé

plísňě. V prostředí bez vody mohou mnohé mikroorganismy přežít ve formě spor (spóry mikromycet a aktinomycet, endospóry bakterií).

Dostupnost vody pro mikroorganismy se posuzuje podle různých parametrů. Nejčastěji se uvádí obsah vody v hmotnostních či objemových procentech; velmi přesné informace poskytují hodnoty pF. Vyjadřují sílu, kterou je voda v prostředí vázána. Čím vyšší hodnoty pF, tím silnější je fyzikální či chemická vazba vody a tím větší energii musí buňka vynaložit, aby ji získala. Hodnoty pF, při kterých se buněčná činnost mikroorganismů a vyšších organismů zastavuje, jsou odlišné. Pro rostliny je hraniční hodnotou pF = 4,2; při vyšších hodnotách již rostliny nejsou schopny vodu z půdy resorbovat a ztrácí svůj turgor. Proto se tato hodnota označuje jako bod trvalého vadnutí. Mikroorganismy při této hodnotě pF rovněž výrazně omezují svůj metabolismus, avšak k jeho úplnému zastavení dochází až při podstatně vyšších hodnotách pF (Tab. 8).

Tabulka 8: Hodnoty pF kritické pro množení a činnost mikroorganismů

Mikroorganismy	Zastavení činnosti (pF)
Hydrofilní	4,85
Mezofilní	4,90-5,48
Xerofilní	5,68

Hodnoty pH velmi významně ovlivňují růst a aktivitu všech mikroorganismů. Podle citlivosti k pH rozdělujeme mikroorganismy na acidofilní, neutrofilní a alkalofilní (syn. bazofilní) - viz Tab. 9. Většina bakterií nesnáší kyselé prostředí; existují však výjimky, např. sírné bakterie rodu *Thiobacillus*, které oxidují síru na kyselinu sírovou dobře rostou při pH = 2 - 3. Kyselé prostředí vyhovuje také mnohým anaerobním bakteriím, u nichž jsou organické kyseliny (např. kyselina mléčná, propionová či máselná) hlavním produktem metabolismu.

Tabulka 9: Členění mikroorganismů podle nároků na pH

Mikroorganismy	Rozmezí hodnot pH
Acidofilní	1-5
Neutrofilní	5-7,5
Alkalofilní (=bazofilní)	>7,5

Většina mikroorganismů se nejlépe rozvíjí v neutrálním až slabě alkalickém prostředí, tj. při pH 6,5 - 8. Výrazné výchylky do kyselé či zásadité oblasti jejich činnost omezují. Z tohoto pravidla se vymykají plísňě, které jsou metabolicky aktivní v širokém rozmezí pH od 2 do 11.

V prostředí silně kyselém či silně zásaditém jsou zbaveny konkurence mnoha jiných mikroorganismů.

Typ mikrobiálního metabolismu je ovlivněn přítomností kyslíku v prostředí. Podle nároků na O_2 lze mikroorganismy rozdělit na několik skupin. Aerobní mikroorganismy vyžadují dostatek volného kyslíku v prostředí. energii získávají aerobní respirací či oxidací anorganických sloučenin. Anaerobní mikroorganismy jsou metabolicky aktivní pouze v prostředí bez vzdušného O_2 ; energii získávají převážně fermentací substrátu. Obě hlavní skupiny zahrnují tzv. striktní (přísné) aeroby či anaeroby. Přechodné skupiny mezi aeroby a anaeroby tvoří fakultativně, tj. příležitostně anaerobní mikroorganismy, které přizpůsobují svůj metabolismus obsahu O_2 v prostředí a mikroaerofilní mikroorganismy, které mají sice anaerobní metabolismus, avšak nízké koncentrace vzdušného O_2 urychlují jejich rozmnožování.

Mikrobiální procesy probíhající v různých prostředích vyžadují odlišné množství dostupného kyslíku. Poměr mezi oxidačními a redukčními procesy, tzv. oxido-redukční potenciál (rH, měrná jednotka mV) má široké rozpětí hodnot. Hodnoty rH vyšší než +100 jsou charakteristické pro aerobní (oxické) prostředí dobře zásobené kyslíkem, který mikroorganismy využívají k oxidaci různých organických či anorganických látek. Hodnoty rH mezi -50 mV až +50 mV ohraničují anoxickou oblast, tj. oblast bez vzdušného kyslíku, avšak s kyslíkem obsaženým v různých anorganických sloučeninách (nitrity, nitráty, uhličitany, sírany, aj.). Kyslíku anorganických sloučenin mikroorganismy využívají k anaerobní respiraci v procesech denitrifikace, desulfurikace apod.

Prostředí s hodnotami rH nižšími než -100 mV (anaerobní) neobsahuje žádný zdroj kyslíku. Za takových podmínek mikroorganismy fermentují organické substráty na organické kyseliny a plyny (CH_4 , CO_2 , H_2S aj.).

Na mikrobiální buňky působí škodlivě záření, které je absorbováno nukleovými kyselinami. Jeho škodlivost vzrůstá s intenzitou nepřímo úměrnou vlnové délce, tj. čím větší vlnová délka, tím nižší vliv má záření na mikroorganismy. Viditelné záření o vlnové délce 380 - 760 nm i část infračerveného záření (800 - 900 nm) je zdrojem energie pro fototrofní mikroorganismy; činnost chemotrofnů spíše brzdí. Chemotrofní mikroorganismy se intenzivněji množí a jsou metabolicky aktivnější za nepřístupu světla. Existují však výjimky; např. některé mikromycety tvoří spóry pouze za světla. UV-záření o vlnové délce 260 - 270 nm je absorbováno DNA a má mutagenní nebo letální účinky. UV záření lze využít k dekontaminaci vzduchu a povrchu předmětů. Gama-záření (vlnová délka 10nm) vyvolává rychlý rozklad (lyzi) mikrobiálních buněk.

Mnohé chemické sloučeniny a přípravky zastavují rozmnožování mikroorganismů (mikrobistatika), příp. vyvolávají lyzi jejich buněk (mikrocidní sloučeniny).

Mechanismus jejich účinku na mikroorganismy je v podstatě trojího typu:

- a) Poškozují strukturu buněk mikroorganismů, např. buněčnou stěnu (antibiotika) či buněčné membrány, ribozomy apod. (látky rozpouštějící tuky nebo anionaktivní tenzidy).
- b) Narušují činnost enzymů. Jde o různá oxidační činidla a ionty těžkých kovů, příp. nenasycené sloučeniny (kyselina sorbová).
- c) Poškozují DNA. Jedná se např. o sloučeniny s mutagenním účinkem jako jsou deaminační činidla (HNO_2) nebo silná činidla alkylační.

Biotické faktory

Při biologickém zpracování odpadů se uplatňují jak vztahy mezi různými mikroorganismy, tak i vztahy mezi mikroorganismy a bezobratlými živočichy.

Největší význam má komenzalismus („spolustolovnictví“), kdy mikroorganismy mění svou činností prostředí a umožňují tak rozvoj jiných organismů, jimž změna prostředí vyhovuje. Nejrozšířenějším typem komenzalismu je metabióza, tj. vztah, ve kterém jsou metabolické produkty jedné mikroorganismy využívány jinými mikroorganismy. Tento vztah zajišťuje koloběh látek a je v přírodě velmi rozšířen. Jeho podstatou je sukcese procesů při transformacích různých typů organických látek. Metabíózy se využívá při kompostování, čištění odpadních vod, či při anaerobním zpracování odpadů.

Poměrně častým vztahem mezi mikroorganismy je synergismus. Je to vzájemně prospěšný vztah mezi dvěma druhy mikroorganismů nebo i skupinami mikroorganismů, který jim umožňuje uskutečňovat procesy, jichž by samostatně nebyly schopny. Např. v půdě či kompostovaném materiálu se může ustavit synergický vztah mezi celulolytickými mikroorganismy a volně žijícími fixátory molekulového dusíku (N_2). Celulolytické mikroorganismy štěpí makromolekuly celulózy a poskytují tak zdroje energie fixátorům N_2 . Poutaný dusík může být využit pro výživu a činnost celulolytických mikroorganismů. Obě skupiny mikroorganismů však na sebe nejsou striktně vázány – potřebnou energii či dusík mohou získávat i z jiných zdrojů.

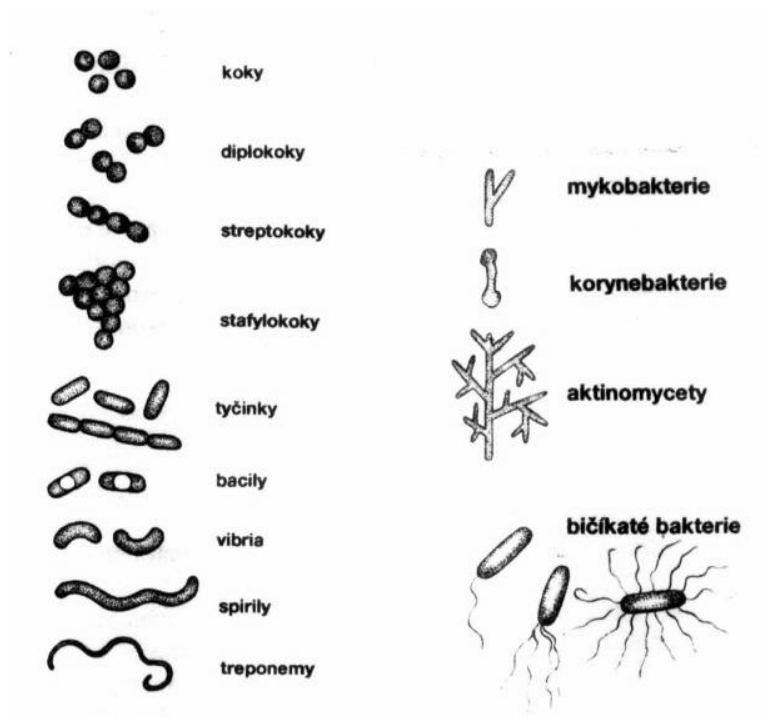
Opakem synergismu je antagonismus, kdy určitá mikrobiální populace mění svou činností prostředí natolik, že zabraňuje růstu jiných populací (změna pH, oxidačně-redukčního potenciálu, nahromadění produktů metabolismu aj.).

Synergické vztahy mezi mikroorganismy a bezobratlými živočichy se uplatňují mj. při procesu kompostování. Význam bezobratlých spočívá v rozmělnění a fragmentaci

organických zbytků; zvětšují tak jejich povrch, který pak mikroorganismy rychleji osídlují a přeměňují. Mikroorganismy tím velmi často „zchutňují“ organické zbytky pro živočichy, které lákají produkty svého metabolismu. Bezobratlí živočichové (saprofágové) využívají organických zbytků osídlených mikroorganismy ve svém metabolismu. Mikrobiální buňky jsou v trávicím traktu bezobratlých buď rozloženy, nebo jím procházejí a objevují se v exkrementech. Počty a aktivita mikroorganismů se však mohou v trávicím traktu také zvyšovat. Bezobratlí živočichové tak mohou významně ovlivňovat biomasu mikroorganismů a strukturu i aktivitu jejich společenstev, což se následně projeví ve způsobech a rychlosti přeměn organických zbytků (viz kap. Vermikomposty).

1.5 Charakteristika jednotlivých skupin mikroorganismů

Bakterie jsou jednobuněčné, morfologicky i fyziologicky velmi rozmanité prokaryotní mikroorganismy. Odlišnou stavbu mají archae (často postrádají buněčnou stěnu), které jsou patrně nejstaršími organismy na naší planetě. Bakterie mají většinou tvar tyčinek nebo kuliček (koků), které se vyskytují buď samostatně, nebo se sdružují do různých seskupení – do dvojic, řetězků či balíčků.



Obrázek 2: Tvary bakterií, Rosypal (1994), upraveno

Průměrná velikost koků se pohybuje mezi 0,5 - 1,5 μm , délka tyčinek 1 – 7 μm , jejich tloušťka 0,5 - 2,0 μm . Aktinomycety se větví do vláken (hyf) o průměru asi 1 μm jejichž délka může dosáhnout několika mm. Většina bakterií se rozmnožuje příčným dělením, kterému

předchází replikace DNA. Rozmnožování probíhá velmi rychle; generační doba, tj. doba za níž dojde k rozdělení buněk, se v optimálních podmínkách pohybuje mezi 15 až 300 minutami. Aktinomycety se nejčastěji rozmnožují pomocí spor nebo členěním vláknitých buněk.

Svou fyziologickou rozmanitostí předčí bakterie ostatní mikroorganismy; najdeme mezi nimi zástupce fototrofů i chemotrofů, heterotrofů i autotrofů, aerobů, anaerobů, fakultativních anaerobů i mikroaerofilů.

Bakterie se velmi dobře přizpůsobují měnícím se podmínkám vnějšího prostředí a mohou přežít v podmínkách, za kterých jiné organismy odumírají (vysoké teploty, extrémní hodnoty pH, sucho aj). Adaptabilitu bakterií podmiňuje bohatý enzymatický aparát, přežívání extrémních podmínek pak u některých z nich endospóry, tj. specifické útvary vznikající uvnitř buněk.

Schopnost tvořit endospóry mají bakterie rodů *Bacillus*, *Clostridium* nebo *Desulfotomaculum*. V průběhu tvorby endospór (sporulace) se syntetizují základní stavební složky nové buňky, které jsou pak v klidovém stavu chráněny několikvrstevným obalem. Jedna buňka tvoří vždy jednu spóru. V příznivých podmínkách spóra vyklíčí a přemění se v obvyklou mikrobiální vegetativní buňku. Ve formě endospór mohou bakterie přetrvat po desetiletí i déle až do doby, kdy nepříznivé podmínky pominou.

Sinice jsou jednobuněčné prokaryotní fotoautotrofní mikroorganismy, které se velmi často sdružují do vláken či kolonií. Jsou větší než bakterie – průměr buněk je zhruba 3 - 5 μm . Sinice se většinou rozmnožují příčným dělením, některé též pomocí spor. Vláknité sinice (např. rod *Anabaena*) obsahují heterocysty s enzymem nitrogenáza (umožňuje poutání vzdušného N_2). Sinice jsou velmi odolné vůči podmínkám vnějšího prostředí.

Mikromycety (mikroskopické houby) jsou eukaryotní mikroorganismy, zahrnující kvasinky a vícebuněčné vláknité houby. Mikromycety patří k chemoheterotrofům; organické látky jim slouží jako zdroj uhlíku a energie. Zatímco kvasinky využívají především jednoduchých cukrů, vláknité houby jsou vybaveny enzymy, které jim umožňují využívat různé polysacharidy, lignin i některá xenobiotika. Většina vláknitých hub patří k aerobům, kvasinky jsou fakultativně anaerobní.

Kvasinky mají nejčastěji elipsovité či kulovité tvar, velikost buněk dosahuje v průměru 4 - 8 μm . Je pro ně typický vysoký obsah proteinů v sušině (až 50 %) a dále přítomnost vitaminů skupiny B ($\text{B}_1, \text{B}_2, \text{B}_6$) a ergosterolu (provitaminu vitamínu D). Většina kvasinek se rozmnožuje nepohlavně a to především pučením, mnohé také pohlavně vzniklými spórami.

Mikromycety jsou tvořeny souborem vláken (hyf), tj. myceliem. Mycelium může vzniknout vyklíčením jedné spóry nebo se rozvíjí z fragmentů hyf. Mycelium vývojově jednodušších mikromycet (Zygomycotina) je většinou jednobuněčné s mnoha jádry a s přepážkami. Většina mikromycet má však mycelium vícebuněčné. Rozmnožování mikromycet zajišťují hlavně nepohlavní spóry, které se tvoří na vzdušném myceliu uvnitř či vně specifických útvarů

Viry, organizmy bez buněčné struktury, jsou submikroskopické částice o velikosti 15 - 390 nm. Jsou tvořeny nukleovou kyselinou (buď DNA nebo RNA), která je chráněna proteinovým pláštěm (kapsidem). Tzv. obalené viry mají na povrchu ještě vrstvu bohatou na lipidy. Viry jsou vnitrobuněční paraziti; nemají vlastní metabolismus a mohou se reprodukovat pouze v hostitelských buňkách (rostlinných, živočišných či mikrobiálních).

2. TECHNIKA PRO BIOPLYNOVÉ TRANSFORMACE

Pro bioenergetické transformace na bioplyn lze v zemědělství a potravinářství použít všechny organické látky. Z naznačených důvodů se tato kapitola orientuje na bioenergetické transformace odpadů organického charakteru, jehož kvantum produkce je v zemědělství značné. Jedná se o tekutý hnůj prasat a chlév-skou mrvu skotu. Jejich produkce neoddelitelně doprovází zemědělskou prvovýrobu a bioenergetické využití se přímo nabízí. Přitom nedochází ke snížení hnojivé hodnoty slámatého hnoje a u tekutého hnoje se řeší jeho využití vůbec. Bioenergetická transformace směřuje k výrobě bioplynu a elektrické energie. Bioplyn může být transformován dále na energii tepelnou i na mechanickou energii např. ve spalovacích motorech, sušárnách píce, vytápění objektů zemědělských i vlastních bioreaktorů apod. Na začátku obou těchto transformací energie z organických odpadů, je sluneční energie s fotosyntetickou látkovou transformací, tj. s tvorbou biomasy, která se stává následně předmětem bioenergetických transformací jak základních (bioplyn), tak vyšších, kterými jsou následné transformace ušlechtilých energií krmiv a potravin. Z naznačeného vyplývá stěžejní úloha sluneční energie v základních i vyšších energetických transformacích, z nichž většina jsou bioenergetické transformace. Proto také je v úvodní kapitole obsáhleji analyzována sluneční energie.

2.1 Bioplynové transformace

Bioplynovými transformacemi rozumíme proces anaerobní fermentace, což je historicky jedna z nejstarších zpracovatelských technologií používaných lidstvem. Do 30. let dvacátého století byla tato technologie běžně využívána zejména na čistírnách odpadních vod ke

zpracování, stabilizaci čistírenských kalů, které obsahovaly velké množství organických látek za vzniku bioplynu, který byl nazýván kalový plyn a byl následně využíván pro ohřev vody, případně vytápění objektů na čistírně odpadních vod. Od 30. let dvacátého století začíná intenzivní výzkum procesu anaerobní fermentace. Díky vědeckotechnickému pokroku v oblasti anaerobních technologií spojených s výrobou a využitím bioplynu se začaly používat k jeho výrobě mimo čistírenských kalů například i odpady ze zemědělství a potravinářství. Od 70. let 20. století se technologie anaerobní fermentace neomezuje pouze na zpracování odpadů, ale jsou již využívány také cíleně pěstované energetické plodiny (Straka *et al.*, 2006). Je nutné si uvědomit, že výroba bioplynu je klíčovou technologií pro udržitelné využívání zemědělské biomasy jako obnovitelného zdroje energie a zpracování biologicky rozložitelných odpadů.

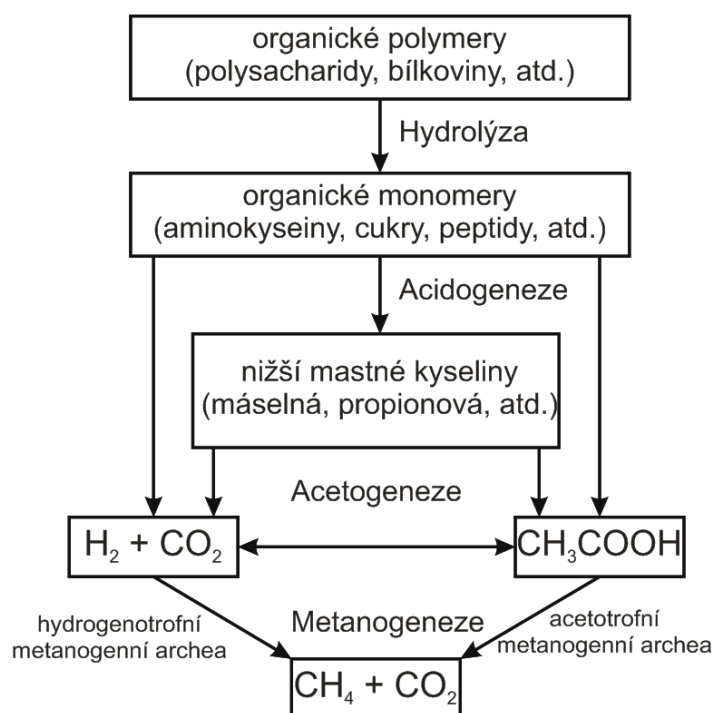
Bioplynové stanice (BPS) jsou dnes rozšířenou biotechnologií využívající procesu anaerobní fermentace pro řízenou konverzi organického uhlíku obsaženého v biologicky rozložitelných materiálech za nepřístupu vzduchu (anaerobní podmínky) na finální produkty, kterými jsou bioplyn a fermentační zbytek.

2.2 Proces anaerobní fermentace

Proces anaerobní fermentace je složitý biochemický proces, při kterém dochází v několika na sebe navazujících krocích, hydrolýze, acidogenezi, acetogenezi a metanogenezi díky činnosti mikroorganismů k rozkladu organických látek obsažených ve vstupních surovinách (Stams *et al.*, 2003). Meziprodukty jednotlivých skupin mikroorganismů v jednotlivých krocích jsou spotřebovávány v dalších krocích vzniku bioplynu mikroorganismy jinými. Absence jedné skupiny mikroorganismů může mít negativní dopad na průběh procesu jako celku (Lee *et al.*, 2009; Weiland, 2010).

Mikrobiální diverzita v bioplynových fermentorech je stejně rozsáhlá jako mikrobiální diverzita v trávicím traktu přežvýkavců, kde bylo identifikováno sedmnáct základních kmenů anaerobních mikroorganismů. Tyto mikroorganismy hrají zásadní roli při výrobě bioplynu (Stieb a Schink, 1987). Důležitou roli v tom, které z kmenů anaerobních mikroorganismů budou přítomny ve fermentoru, samozřejmě sehrává povaha vstupního materiálu, který má být zpracováván v bioplynové stanici (Hattori *et al.*, 2001). Druh vstupního materiálu určuje, zdali budou ve fermentoru převládat proteolytické mikroorganismy nebo amylolytické mikroorganismy. Mezi nejčastěji se vyskytující se druhy anaerobních mikroorganismů ve fermentorech bioplynových stanic patří *Bacteroides succinogens*, *Butyrivibrio fibrisolvens*, *Clostridium cellobioparum*, *Ruminococcus albus*, *Ruminococcus flavefaciens*, *Eubacterium*

cellulosolvens, *Clostridium cellulosolvens*, *Clostridium cellulovorans*, *Clostridium thermocellum*, *Bacteroides cellulosolvens* a *Acetivibrio cellulolyticus* (Stieb a Schink, 1987). Je nutné si uvědomit, že existuje jasný rozdíl v druzích celulolytických mikroorganismů přítomných v trávicím traktu přežvýkavců a v bioplynové stanici. Zatímco v trávicím traktu přežvýkavců představovali zástupci rodu *Ruminococcus* sp. 60 % z celkového počtu kolonií, ve fermentoru bioplynové stanice převládaly rody *Bacteroides* a *Clostridium* (Switzenbaum *et al.*, 1990). Zjednodušené schéma průběhu anaerobního rozkladu biologicky rozložitelných materiálů je znázorněno na obrázku 3 (Pohland a Gosh, 1971).

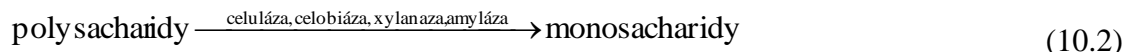


Obrázek 3: Znázornění rozkladu organického materiálu na bioplyn

Hydrolýza

Hydrolýza je prvním krokem v procesu anaerobní fermentace, během které jsou složité organické látky (polymery) štěpeny na jednodušší organické látky (mono a oligomery). V průběhu hydrolýzy, jsou polymery jako sacharidy, lipidy, nukleové kyseliny a proteinů, štěpeny hydrolytickými enzymy produkovanými hydrolytickými mikroorganismy na glukózu, glycerol, purin a pyridin. Štěpení polymerů na monomery enzymy je možno znázornit pomocí následujících rovnic.





Produkty hydrolýzy jsou rozkládány dalšími mikroorganismy, které je využívají pro své metabolické procesy.

Acidogeneze

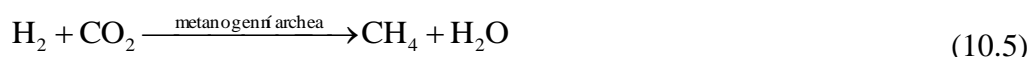
Během acidogeneze jsou produkty hydrolýzy štěpeny acidogenními mikroorganismy na produkty využitelné metanogenními mikroorganismy. Moosacharidy, aminokyseliny a mastné kyseliny jsou štěpeny na acetát, oxid uhličitý a vodík (70 %), jakož i na těkavé mastné kyseliny a alkoholy (30 %).

Acetogeneze

Produkty acidogeneze, které nemohou být přímo transformovány metanogenními archea na metan, jsou štěpeny na tyto produkty v průběhu acetogeneze. Těkavé mastné kyseliny a alkoholy jsou oxidovány do produktů využitelných při metanogenezi. Těmito produkty jsou acetát, vodík a oxid uhličitý. Těkavé mastné kyseliny s uhlíkovými řetězci delšími než dva a alkoholy s uhlíkovými řetězci déle než jeden, jsou oxidovány na acetát a vodík. Produkce vodíku zvyšuje parciální tlak vodíku, což může mít negativní dopad na acetogenezi. Vysoká koncentrací vodíku inhibuje metabolismus acetogenních mikroorganismů, naopak metanogenními archea je vodík transformován na metan. Acetogeneze a metanogeneze musí probíhat paralelně, jako symbióza dvou skupin mikroorganismů.

Metanogeneze

Produkce bioplynu (metanu a oxidu uhličitého) z meziproduktů předcházejících fází anaerobní fermentace probíhá díky činnosti metanogenních archea. Sedmdesát procent vyprodukovaného metanu je produkováno přeměnou kyseliny octové (CH_3COOH), zbývajících třicet procent je vyrobeno z přeměny vodíku (H_2) a oxidu uhličitého (CO_2). Metanogenezi můžeme popsat následujícími rovnicemi.



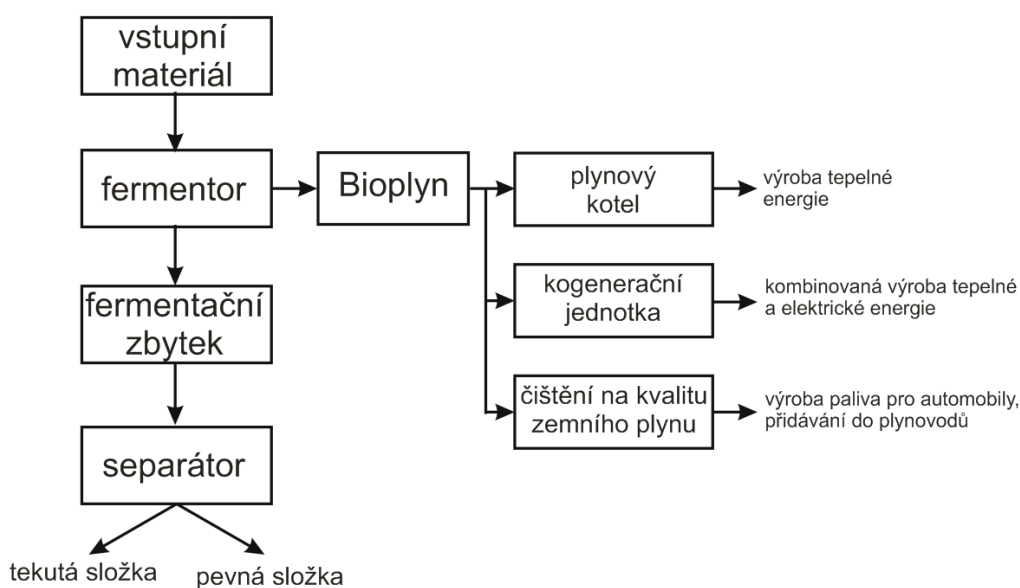
Metanogeneze je nejdůležitým krokem v celém procesu anaerobní fermentace, z biochemického hlediska se jedná o nepomalejší fázi silně ovlivněnou provozními

podmínkami. Významný vliv na proces metanogeneze má složení vstupní suroviny, dávkování vstupní suroviny, teplota a pH.

2.3 Bioplynové stanice

Bioplynové stanice můžeme považovat za biotechnologii, ve které je proces výroby bioplynu závislý na interakci mezi různými druhy mikroorganismů. K tomu, aby bylo dosaženo funkčního a stabilního procesu s co nejvyšší produkcí metanu, je důležité vytvořit a udržovat vhodné prostředí pro činnost mikroorganismů (Amon *et al.*, 2006). K tomu právě slouží technologie bioplynových stanic. Díky vhodně nastavené a zvolené technologii bioplynové stanice můžeme maximalizovat výrobu bioplynu jako konečného produktu procesu anaerobní fermentace. V praxi je používáno mnoho technologií pro výrobu bioplynu, v České republice jsou to desítky technologií pro anaerobní zpracování různých druhů materiálů. Tyto systémy se liší zejména v provozních parametrech, přičemž použitá technologie a konstrukce fermentoru závisí primárně na vstupní surovině, která má být zpracována.

Obecně lze říci, že se technologie bioplynových stanic skládá z několika na sebe navazujících technologických celků. Obecné schéma bioplynové stanice je znázorněno na obrázku 4.



Obrázek 4: Obecné schéma bioplynové stanice (zdroj: Hobson *et al.*, 1981, upraveno)

Rozdělení bioplynových stanic

Kategorizace bioplynových stanic je prováděna podle celé řady faktorů a parametrů. V následujícím přehledu jsou vybrány ty nejzásadnější z nich.

Podle druhu zpracovávaného materiálu

Bioplynové stanice dělíme podle druhu zpracovávaného materiálu a v souladu s metodickým pokynem Ministerstva životního prostředí, k podmínkám schvalování bioplynových stanic před uvedením do provozu na:

- zemědělské bioplynové stanice,
- čistírenské bioplynové stanice,
- ostatní bioplynové stanice.

Zemědělské bioplynové stanice

Tyto BPS zpracovávají materiály rostlinného charakteru a statkových hnojiv, resp. podestýlky. Na těchto bioplynových stanicích není možné zpracovávat odpady podle zákona č. 185/2001 Sb., o odpadech, ani jiné materiály, které spadají pod Nařízení Evropského parlamentu a Rady (ES) č. 1069/2009 o hygienických pravidlech pro vedlejší produkty živočišného původu a získané produkty, které nejsou určeny k lidské spotřebě.

Na zemědělských bioplynových stanicích je možno zpracovávat zejména následující materiály:

Suroviny živočišného původu

- kejda prasat
- hnůj prasat se stelivem
- kejda skotu
- hnůj skotu se stelivem
- hnůj a stelivo z chovu koní, koz, králíků
- drůbeží exkrementy, včetně steliva

Suroviny rostlinného původu

- sláma všech typů obilovin i olejnin
- plevy a odpad z čištění obilovin
- bramborová nat' i slupky z brambor
- řepná nat' z krmné i cukrové řepy
- kukuřičná sláma i jádro kukuřice
- travní biomasa nebo seno (senáže)
- nezkrmitelné rostlinné materiály (siláže, obiloviny, kukuřice)

Cíleně pěstovaná biomasa

- obiloviny v mléčné zralosti (celé rostliny) čerstvé i silážované

- kukuřice ve voskové zralosti (celé rostliny) čerstvá i silážovaná
- kukuřice vyzrálá (celé rostliny) čerstvá i silážovaná
- krmná kapusta (celé rostliny) čerstvá i silážovaná
- dřevní biomasa (štěpky anebo řezanka z listnatých dřevin z rychloobrátkových kultur anebo z průklestů)

Čistírenské bioplynové stanice

Tyto BPS pracovávají pouze kaly z čistíren odpadních vod a jsou nedílnou součástí čistírny odpadních vod (ČOV). Technologie anaerobní fermentace je využívána za účelem anaerobní stabilizace kalu vznikajícího na čistírnách odpadních vod. Tyto technologie nejsou určeny ke zpracování biologicky rozložitelných odpadů a k nakládání s odpady, ale slouží pouze jako součást kalového hospodářství ČOV jako celku. Do tohoto zařízení nevstupují jiné materiály než kaly z ČOV, žump a septiků a odpadní voda. V případě, že jsou do těchto nádrží na anaerobní fermentaci přidávány jiné odpady podle zákona o odpadech, jedná se o ostatní bioplynové stanice. Na tato zařízení se pak vztahují všechny požadavky zákona o odpadech a jeho prováděcích předpisů.

U bioplynových stanic pracujících pouze v režimu ČOV nejsou požadovány zásobní nádrže na anaerobně stabilizovaný kal. Tyto technologie pracují v režimu čistíren odpadních vod, které mají ve svém provozním řádu zpracovány podmínky nakládání s aktivovaným kalem a anaerobně stabilizovaným kalem.

Ostatní bioplynové stanice

Bioplynové stanice, zpracovávající ostatní vstupy, mohou zpracovávat bioodpady podle podínek a požadavků vyhlášky 341/2008 Sb., o podrobnostech nakládání s biologicky rozložitelnými odpady, v platném znění a dále odpady uvedené v tab. 3 v příloze 2., případně substráty uvedené v odstavci 4.1., 4.2. a 4.3. metodického pokynu Ministerstva životního prostředí k podmínkám schvalování bioplynových stanic před uvedením do provozu. Pokud BPS zpracovávají vedlejší živočišné produkty (VŽP), spadají pod Nařízení Evropského parlamentu a Rady (ES) č. 1069/2009 a musí plnit podmínky v něm stanovené, jako je např. hygienizace suroviny/odpadů (pasterace, vysokoteplotní hygienizace, apod.).

Podle obsahu sušiny zpracovávaného materiálu

Bioplynové stanice, kde jsou zpracovávány materiály s obsahem sušiny na vstupu nižším než 15 %, označujeme jako bioplynové stanice zpracovávající tekuté substráty. Tyto stanice využívají disperze vstupního materiálu v roztoku se snahou o co největší styčnou plochu zpracovávaného materiálu s mikroorganismy, které jsou přítomny ve fermentoru. Tato

technologie představuje v současnosti 98 % ze všech instalovaných bioplynových stanic v České republice.

Naopak bioplynové stanice, kde je obsah sušiny vstupního materiálu vyšší než 15 %, obvykle 30-45 %, označujeme jako bioplynové stanice zpracovávající netekuté substráty. Tyto stanice využívají procesní tekutinu (perkolát) jako inokulum pro postřik materiálu, který je naskladněn do fermentoru. Tato technologie představuje pouhé 2 % ze všech instalovaných bioplynových stanic v České republice.

Podle provozní teploty ve fermentoru

Podle provozní teploty ve fermentoru můžeme bioplynové stanice dělit z hlediska mikrobiologického v zásadě do třech skupin, tabulka 10. Bioplynové stanice pracující s provozní teplotou $< 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, to znamená v psychrofilním teplotním režimu, bioplynové stanice pracující s provozní teplotou v rozmezí $30\text{-}45\text{ }^{\circ}\text{C}$, to znamená v mezofilním teplotním režimu a na bioplynové stanice pracující s provozní teplotou v rozmezí $50\text{-}60\text{ }^{\circ}\text{C}$, to znamená v termofilním teplotním režimu (Sánchez *et al.*, 2001).

Dnes používané technologie bioplynových stanic využívají v drtivé většině mezofilní teplotní režim $30\text{-}45\text{ }^{\circ}\text{C}$. A to i přes skutečnost, že termofilní teplotní oblast nabízí vyšší reakční rychlosti, vyšší produkce bioplynu a vyšší účinnost při eliminaci patogenních mikroorganismů obsažených ve zpracovávaném materiálu ve srovnání s mezofilním teplotním režimem. Termofilní proces je však více citlivý na změny životního prostředí ve fermentoru než proces mezofilní (Ahn a Forster, 2002; Hamed *et al.*, 2003; Kim *et al.*, 2002).

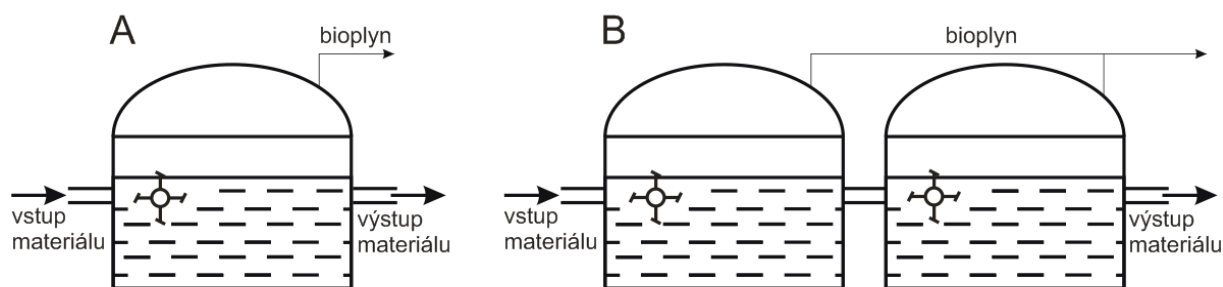
Tabulka 10: Dělení anaerobního procesu podle teplot, při kterých probíhá

	Rozmezí teplot	Minimální doba zdržení
psychrofilní	$< 20\text{ }^{\circ}\text{C}$	70-80 dnů
mezofilní	$30 - 45\text{ }^{\circ}\text{C}$	30-40 dnů
termofilní	$45 - 60\text{ }^{\circ}\text{C}$	15-20 dnů

Podle počtu fermentorů zařazených v sérii

Technicky nejjednodušší bioplynové stanice používají pro výrobu bioplynu pouze jeden fermentor pro celý proces anaerobní fermentace, jedná se o jednostupňovou fermentaci. U tohoto způsobu konstrukce bioplynové stanice probíhají všechny mikrobiální procesy, hydrolýza, acidogeneze, acetogeneze a metanogeneze, ve stejném čase a na stejném místě. Jedná se o běžný typ fermentoru, ve kterém je zpracovávaný materiál míchán různými druhy míchadel. Tento způsob fermentace je často využíván pro zpracování kalů, potravinářských odpadů, zemědělských odpadů apod.

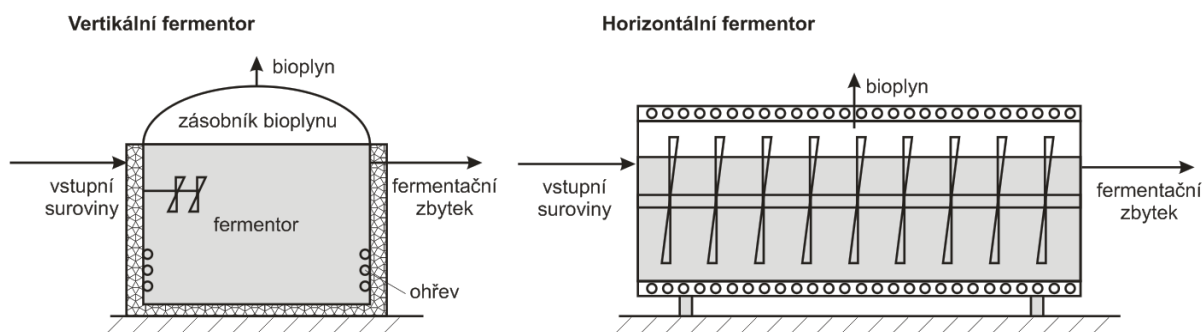
Alternativou k jednostupňovému procesu je proces dvoustupňový, (případně vícestupňový). Při dvoustupňové fermentaci probíhá odděleně v jedné nádrži hydrolyza a acidogeneze a ve druhé nádrži acetogeneze a metanogeneze (Pohland a Gosh, 1971). I u dvoustupňové fermentace jsou použity běžné typy fermentorů, ve kterých je zpracovávaný materiál míchán různými druhy míchadel. Tento typ procesu může být výhodný, pokud vstupní substrát obsahuje snadno rozložitelné látky (energetické plodiny, rostlinné zbytky). Schematicky jsou zobrazeny možnosti provedení na obrázku 5.



Obrázek 5: Jednostupňová (A) a dvoustupňová (B) bioplynová stanice

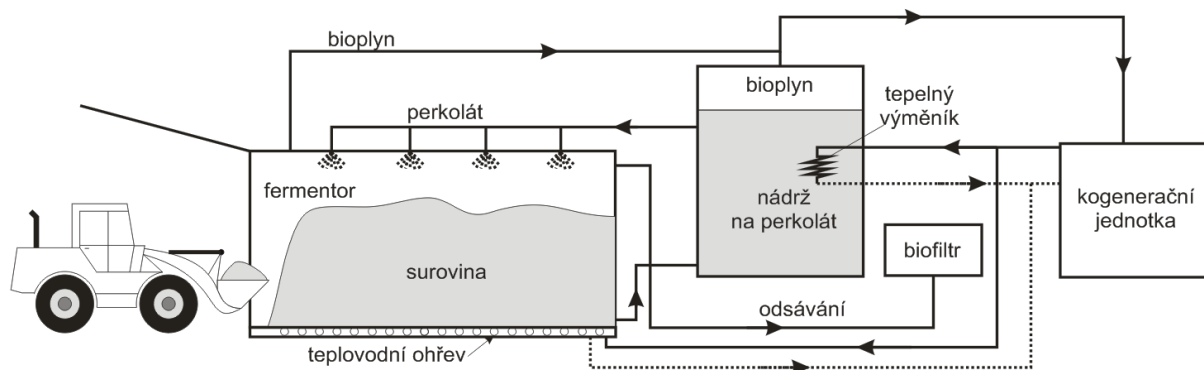
Podle způsobu dávkování vstupního materiálu do fermentoru

Bioplynová stanice, respektive fermentor bioplynové stanice, může být provozován s ohledem na dávkování vstupního materiálu, buď jako kontinuální nebo jako diskontinuální. Způsob provozování závisí na použitém vstupním materiálu (Lettinga, 2005; Sakar *et al.*, 2009). U fermentorů s kontinuálním provozem je vstupní surovina do fermentoru přiváděna a z fermentoru odváděna kontinuálně, resp. v pravidelných intervalech v průběhu dne. Vstupní surovina je do fermentoru nejčastěji dávkována, v závislosti na skupenství, pomocí šnekových dopravníků nebo vřetenových čerpadel. Doba zdržení suroviny ve fermentoru se pohybuje obvykle v rozpětí 30-90 dnů. Materiál je z fermentoru odváděn gravitačně přepady nebo pomocí vřetenových čerpadel. Tyto fermentory jsou vybaveny zařízením pro míchání, obsahu fermentoru, což pozitivně působí na kontakt materiálu s mikroorganismy a na uvolňování bioplynu ze zpracovávaného materiálu. Teplota procesu je řízena prostřednictvím teplovodního ohřevu, který je obvykle řešen jako stěnové vytápění. Z konstrukčního hlediska mohou být fermentory s kontinuálním provozem provedeny jako válcové případně obdelníkové ležaté (horizontální) nebo stojaté (vertikální) nádoby.



Obrázek 6: Kontinuálně provozované fermentory

Diskontinuálně pracující bioplynové stanice jsou tvořeny betonovými fermentory ve tvaru kvádrů umístěnými vedle sebe (obrázek 7). Zhomogenizovaná vstupní surovina je do fermentoru navedena kolovým nakladačem. Doba zdržení suroviny ve fermentoru se pohybuje obvykle v rozpětí 14-21 dnů, po této době je fermentor odvětrán, odsávaný plyn je do ovzduší vypouštěn přes biofiltr. Materiál po fermentaci je kolovým nakladačem vyvezen mimo fermentor na manipulační plochu. Obvykle 30 % materiálu je převezeno k uskladnění pro pozdější využití (hnojivo), zbylých 70 % je smícháno s 30 % čerstvé vstupní suroviny a opět navedeno kolovým nakladačem do fermentoru, proces se opakuje. K inokulaci materiálu mikroorganismy je použit uzavřený koloběh procesní tekutiny (perkolátu), který je v různých intervalech a v různé intenzitě rozstříkovan tryskami umístěnými u stropu fermentoru po povrchu zpracovávané suroviny. Perkolát protéká mezerami v surovině a odtéká potrubím umístěným v komoře fermentoru do vyhřívané nádrže perkolátu odkud je opět čerpán čerpadlem k tryskám umístěným u stropu fermentoru. Tyto fermentory nejsou obvykle vybaveny zařízením pro míchání, převrstvování materiálu, což negativně ovlivňuje rozklad suroviny. Teplota procesu je řízena prostřednictvím podlahového ohřevu fermentoru.



Obrázek 7: Diskontinuálně provozovaný fermentor

V České republice je většina bioplynových stanic provozována v kontinuálním režimu dávkování čerstvého materiálu do fermentoru. Výjimku tvoří některé bioplynové stanice zpracovávající zemědělské odpady s vysokou sušinou a biologicky rozložitelný komunální odpad.

Je-li substrát pro proces anaerobní fermentace homogenní směs dvou nebo více druhů surovin (např. kejdy a organických odpadů z potravinářského průmyslu), nazýváme proces kofermentací. Tento proces je dnes využíván u většiny provozovaných bioplynových stanic.

2.4 Vstupní suroviny pro bioplynové stanice

Jako vstupní surovina může být v procesu anaerobní fermentace použita široká škála typů biomasy. Nejčastěji používané materiály můžeme zahrnout do těchto skupin:

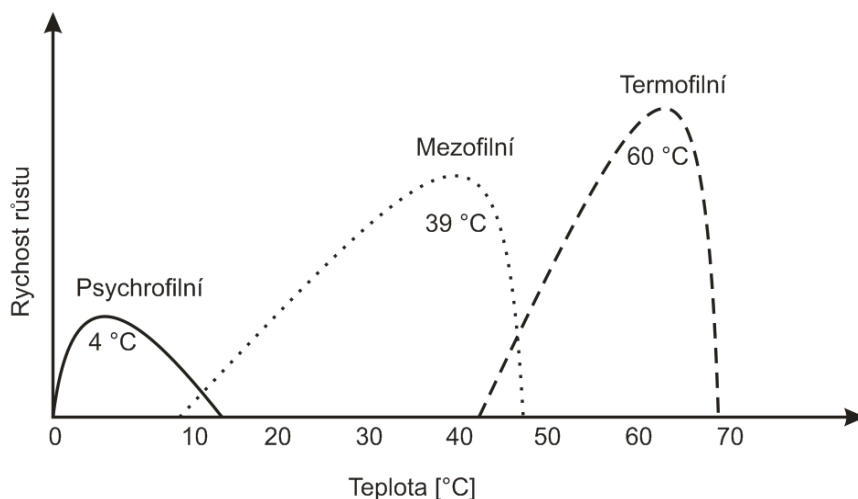
- cíleně pěstované energetické plodiny (např. kukuřice, čirok),
- hnůj a kejda,
- zemědělské odpady a vedlejší produkty,
- biologicky rozložitelné odpady z potravinářských a zemědělských odvětví (rostlinného i živočišného původu),
- biologicky rozložitelné frakce komunálního odpadu a odpadu ze stravování (rostlinného a živočišného původu),
- kaly z čistíren odpadních vod.

V posledních letech je zřejmé převaha zejména bioplynových stanic zpracovávající cíleně pěstované energetické plodiny a odpady ze zemědělství a potravinářství. Vstupní suroviny lze klasifikovat podle mnoha kritérií, původ, obsah sušiny, produkce metanu apod. Volba typu a množství vstupních surovin pro bioplynovou stanici obvykle závisí na obsahu sušiny, jakož i na obsahu cukrů, lipidů a proteinů.

2.5 Provozní parametry bioplynových stanic

Teplota

Optimální teplota, tj. teplota, při které mikroorganismus roste nejrychleji a energeticky nejefektivněji, je různá pro různé druhy mikroorganismů, obrázek 8.



Obrázek 8: Rychlost růstu mikroorganismů v různých teplotních režimech

Mikroorganismy můžeme dělit do různých skupin, v závislosti na teplotě, která je pro jejich život nejpříznivější. Jedná se v zásadě o tři teplotní režimy.

- psychrofilní, v rozpětí teplot od 5 °C do 25 °C,
- mezofilní, v rozpětí teplot od 30 °C do 45 °C,
- termofilní, v rozpětí teplot od 50 °C do 60 °C.

Dnes provozované bioplynové stanice pracují obvykle při teplotách v rozmezí 30 – 45 °C nebo 50 – 60 °C. Výroba bioplynu je možná i v psychrofilním teplotním režimu, produkce a kinetika tvorby bioplynu bude však mnohem nižší a ekonomicky nezajímavá. V případě vysokých teplot jsou známy příklady metanogenních archea, které jsou schopny pracovat i při teplotách 110 °C. Stabilní bioplynové technologie provozované v praxi však nepřesahují teplotní hranici 60 – 70 °C. Při teplotách nad 60 °C je činnost metanogenních archea snížena natolik, že nejsou schopny zpracovávat produkty předchozích stupňů, což má za následek hromadění mastných kyselin ve fermentoru a kolaps procesu.

Vůbec nejběžněji používaným teplotním režimem v bioplynových stanicích u nás i v zahraničí je mezofilní teplotní režim. Pro bezproblémový provoz bioplynové stanice je nutné udržovat stálou teplotu ve fermentoru. Jakýkoli výrazný výkyv v teplotě ve fermentoru může způsobit kolaps systému. Bioplynové stanice provozované v termofilním režimu jsou na změny teplot náchylnější než bioplynové stanice provozované v mezofilním teplotním režimu.

Hodnota pH

Po produkci bioplynu je hodnota pH zpracovávaného materiálu nejlepším indikátorem stability procesu. Různé fáze procesu výroby bioplynu požadují různé optimální hodnoty pH.

Velmi významně jsou na pH citlivé metanogenní archea. Prostředí s nižší hodnotou pH působí na metanogenní archea inhibičně, čímž dojde k negativnímu ovlivnění produkce bioplynu.

Vznik organických kyselin během acidogeneze může způsobit snížení pH pod hodnotu 5, což je limitní koncentrace pro přežití metanogenních archea a způsobit tak pokles počtu metanogenních archea. Na druhé straně nadměrný nárůst počtu metanogenních archea může vést k vyšší koncentraci amoniaku a tím zvýšení pH nad 8, což je naopak inhibiční pro acidogenezi.

Bylo prokázáno, že optimální rozpětí pH při procesu anaerobní fermentace se pohybuje v rozmezí od 6,5 do 7,5. Tento rozsah je poměrně široký, optimální hodnota pH vždy závisí na zpracovávaném materiálu a použité technologii. Hodnota pH je funkcí koncentrace těkavých mastných kyselin, hydrogenuhličitanů a alkality systému. Aby bylo možné udržet konstantní hodnoty pH, je důležité upravit vztah mezi koncentrací těkavých mastných kyselin a hydrogenuhličitanů.

Zatížení fermentoru organickými látkami

Zatížení fermentoru organickými látkami popisuje množství organického materiálu (vyjádřeno jako chemická spotřeba kyslíku nebo ztráta žíháním), které je denně přivedeno na jednotku užitečného objemu fermentoru.

Obvyklé zatížení fermentoru, který je provozován v mezofilním teplotním režimu, se pohybuje od 0,5 kg do 3 kg organické sušiny vstupního materiálu na m³ objemu fermentoru a den. Maximální hranice zatížení fermentoru organickými látkami je uváděna 5 kg organické sušiny vstupního materiálu na m³ objemu fermentoru a den. Vysoké zatížení fermentoru organickými látkami způsobuje zvyšování koncentrace mastných kyselin, což v dlouhodobém provozu působí inhibičně na metanogenní archea. Aby nedošlo k nadměrnému zatěžování fermentoru, je třeba zajistit rovnoměrný přísun vstupního materiálu během dne.

Doba zdržení

Doba zdržení nám udává čas, po který je elementární částice zpracovávaného materiálu v kontaktu se substrátem ve fermentoru. Dobu zdržení lze vypočítat podle následující rovnice:

$$\tau = \frac{V}{Q} [s] \quad (10.6)$$

kde:

τ - doba zdržení [s]

V - objem reaktoru [m³]

Q - průtok fermentorem [m³·s⁻¹]

Rovnice je odvozená z průměrné doby potřebné k rozkladu organického materiálu, vyjádřená jako chemická spotřeba kyslíku (CHSK) a biochemická spotřeba kyslíku (BSK) na vstupu a výstupu materiálu do fermentoru. Obecně lze konstatovat, že delší doba zdržení materiálu ve fermentoru znamená jeho účinnější rozklad. Na druhé straně je třeba konstatovat, že množství vznikajícího bioplynu klesá s delší dobou zdržení. Optimální doba zdržení vychází z ekonomicko provozních propočtů. Doba zdržení je závislá na druhu zpracovávaného materiálu a zamýšleném použití zpracovaného materiálu po fermentaci. Dále doba zdržení materiálu v anaerobním fermentoru závisí na provozní teplotě ve fermentoru a sušíně zpracovávaného materiálu. Obecně platí, že fermentory provozované v mezofilním režimu mají delší dobu zdržení, stejně tak jako fermentory zpracovávající materiály s vysokým obsahem sušiny. Ke zkrácení doby zdržení materiálu ve fermentoru je využíváno míchání zpracovávaných materiálů. Doba zdržení také ovlivňuje skladbu mikrobiálních společenstev ve fermentoru.

Míchání obsahu fermentoru

Míchání materiálu ve fermentoru významně ovlivňuje proces anaerobní fermentace a to zejména díky rovnoměrné distribuci živin a mikroorganismů ve zpracovávaném materiálu a teplotní homogenitě v celém objemu fermentoru. Mezi jednoznačné výhody míchání patří eliminace tvorby sedimentu ve fermentoru, eliminace teplotní stratifikace ve fermentoru, udržování chemické a fyzikální jednotnosti ve fermentoru, rychlé rozptýlení metabolických meziproduktů vznikajících během rozkladu vstupních materiálů, rychlé rozptýlení všech toxických látek ve fermentoru (minimalizace toxicity).

Metanogenní archea rostou v symbióze s acetogenními a hydrogenními mikroorganismy, což vyžaduje přímý kontakt mezi oběma druhy, který zabezpečuje míchání. Hydrolytické a acidogenní mikroorganismy rozkládají organický materiál efektivněji díky většímu povrchu, který mají k dispozici v suspenzi, která se vytvoří v průběhu míchání materiálu ve fermentoru.

Poměr C:N

Uhlík a dusík jsou základními živinami anaerobních mikroorganismů. Pro efektivní provoz bioplynové stanice by se měl poměr C:N pohybovat v optimálním rozsahu

25 - 30 : 1, neboť významně ovlivňuje růst a činnost mikroorganismů. Každý jednotlivý vstupní materiál tedy může být omezující vzhledem k jeho obsahu živin. Z tohoto pohledu se jeví jako optimální kofermentace různých vstupních materiálů, kdy je možno smíchat vstupní materiály s různými obsahy C a N za účelem dosažení požadovaného poměru C:N.

Obsah stopových prvků

Zemědělské bioplynové stanice pracující s energetickými plodinami mohou za jistých podmínek čelit poklesu produkce bioplynu bez jakéhokoli zjevného důvodu. Základním vodítkem by měla být koncentrace nižších mastných kyselin. Pokud se pohybuje na úrovni 3 – 5 g·m⁻³, může to indikovat nedostatek nebo nedostupnost stopových prvků. Optimální provoz bioplynové stanice, respektive anaerobního procesu ve fermentoru bioplynové stanice, je závislý na dostupnosti a optimálním přísunu organické hmoty. Dalším důležitým faktorem je obsah stopových prvků, který může velmi významně ovlivňovat proces anaerobní fermentace. Potřeba železa (Fe), niklu (Ni), kobaltu (Co), molybdenu (Mo), selenu (Se) a wolframu (W) pro různé metanogenní archea (*Methanosarcina barkeri*, *Methanospirillum hungatii*, *Methanocorpusculum parvum*, *Methanobacterium thermoautotrophicum*, *Methanobacterium wolfei*, *Methanococcus voltae*, *Methanococcus vanielli* a *Methanococcoides methylutens*) byla již potvrzena mnoha autory. Dále byly mnoha autory potvrzeny účinky stopových prvků Fe, Ni, Co, Zn, Mo a Cu na průběh anaerobní fermentace různých typů odpadů z průmyslových výrobníků.

Bioplynové stanice pro zpracování tekutých substrátů

Bioplynové stanice, kde jsou zpracovávány materiály s obsahem sušiny na vstupu nižším než 15 %, označujeme jako bioplynové stanice zpracovávající tekuté substráty. Tyto stanice využívají disperze vstupního materiálu v roztoku se snahou o co největší styčnou plochu zpracovávaného materiálu s mikroorganismy, které jsou přítomny ve fermentoru. Tato technologie představuje v současnosti 98 % ze všech instalovaných bioplynových stanic v České republice.

Bioplynové stanice pro zpracování netekutých substrátů

Bioplynové stanice, kde je obsah sušiny vstupního materiálu vyšší než 15 %, obvykle 30 – 45 %, označujeme jako bioplynové stanice zpracovávající netekuté substráty. Tyto stanice využívají procesní tekutinu (perkolát) jako inokulum pro postříkání materiálu, který je naskladněn do fermentoru. Tato technologie představuje pouhé 2 % ze všech instalovaných bioplynových stanic v České republice.

2.6 Bioplyn

Primárním výstupním produktem anaerobního rozkladu biologicky rozložitelných materiálů je bioplyn. Bioplyn můžeme považovat za celosvětově uznávaný obnovitelný zdroj energie získaný z biologicky rozložitelných materiálů. Bioplyn je považován za jednu z nejlepších alternativ k fosilním palivům. Bioplyn je bezbarvý, hořlavý plyn, který vzniká biochemickými procesy při anaerobní fermentaci biologicky rozložitelných materiálů (živočišného,

rostlinného nebo průmyslového původu). Jeho majoritní složky tvoří metan 50 – 70 % objemových a oxid uhličitý 30 – 50 % objemových. Kromě majoritních složek obsahuje bioplyn také sirovodík, vodík, vodní páru, siloxany, aromatické a halogenové sloučeniny (tabulka 11). Obsah minoritních složek v bioplynu, z nichž některé můžeme považovat za rizikové, je významně ovlivněn druhem zpracovávaného vstupního materiálu. V plynu vznikajícím na skládkách odpadů byly například diagnostikovány aromatické heterocyklické sloučeniny, ketony alifatických sloučenin, terpeny, alkoholy, halogenované alifatické sloučeniny (Allen et al., 1997; Eklund et al., 1998; Shin et al., 2002). Odpad z domácností a průmyslu, který může obsahovat čisticí prostředky, pesticidy, farmaceutika, plasty, syntetické textilie, nátěrové hmoty apod., velmi negativně ovlivňuje koncentraci rizikových sloučenin v bioplynu. Naopak bioplyn vyráběný ze zemědělsky cíleně produkovaných plodin obsahuje nejmenší množství potenciálně rizikových sloučenin (Reinhart, 1993).

Tabulka 11: Složení bioplynu

Sloučenina	Chemický vzorec	Koncentrace
Metan	CH ₄	55 - 70 [%obj.]
Oxid uhličitý	CO ₂	30 - 45 [%obj.]
Dusík	N ₂	0 - 5 [%obj.]
Kyslík	O ₂	<1 [%obj.]
Uhlovodíky	C _n H _{2n+2}	<1 [%obj.]
Sirovodík	H ₂ S	0 - 0,5 [%obj.]
Amoniak	NH ₃	0 - 0,05 [%obj.]
Vodní pára	H ₂ O	1 - 5 [%obj.]
Siloxany	C _n H _{2n+1} SiO	0 - 50 mg·m ⁻³

(zdroj: Reinhart, 1993, upraveno)

Základní fyzikální vlastnosti bioplynu jsou uvedeny v tabulce 12.

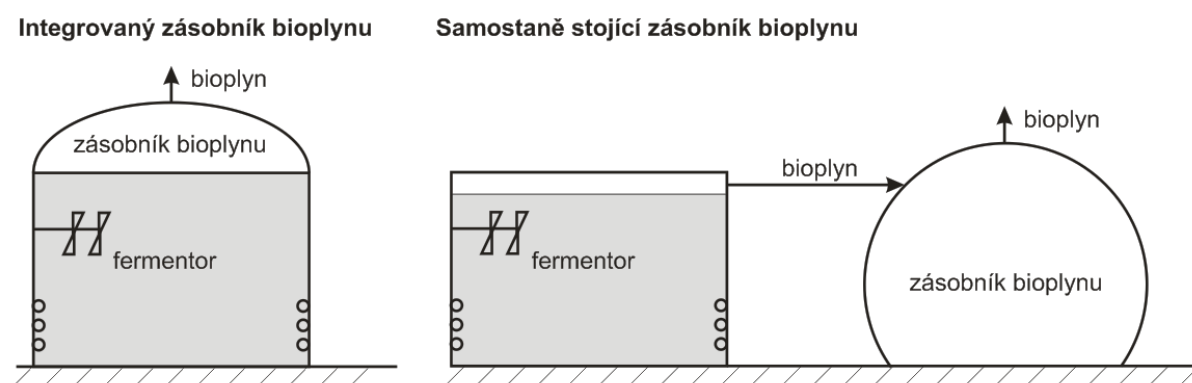
Tabulka 12: Základní fyzikální vlastnosti bioplynu a jeho hlavních složek

Parametr	jednotka	bioplyn	metan	oxid uhličitý	vodík	sirovodík
Výhřevnost	[MJ·m ⁻³]	18 - 25	33 - 35	-	10 - 11	11 - 12
Práh vzplanutí	[%obj.]	6 - 12	5 - 15	-	4 - 80	4 - 45
Zápalná teplota	[°C]	650-750	650-750	-	585	270
Kritický tlak	[MPa]	4,7	4,7	7,4	1,3	8,9
Kritická teplota	[°C]	-82,5	-82,5	31	-239,9	100,4
Měrná hmotnost	[kg·m ⁻³]	1,2	0,714	1,977	0,09	1,536

(zdroj: Hobson et al., 1981, upraveno)

Skladování bioplynu

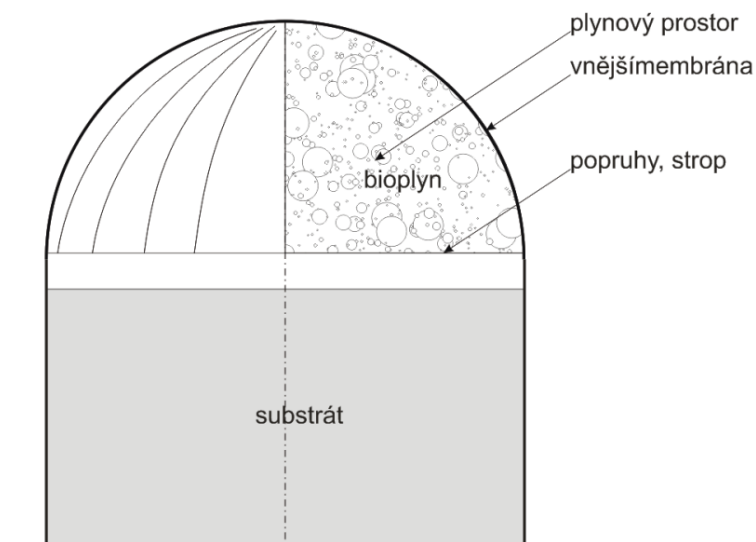
Primárním výstupním produktem anaerobního rozkladu biologicky rozložitelných surovin je bioplyn. Produkce a spotřeba bioplynu může být v průběhu časového úseku proměnlivá. Ke kompenzaci těchto výkyvů jsou na bioplynových stanicích instalovány zásobníky bioplynu (plynojemy), jejichž úkolem je kompenzovat výkyvy ve výrobě a spotřebě bioplynu stejně jako změny objemu v důsledku změny teploty bioplynu. K dispozici jsou dnes různé typy zásobníků bioplynu, přičemž správný výběr a dimenzování systému zásobníku bioplynu významně přispívá k účinnosti a bezpečnosti zařízení. Mezi rozhodující kritéria pro volbu zásobníku bioplynu patří pracovní tlak, skladovací objem, vnější zatížení, počet a velikost nádrží. Zásobníky bioplynu mohou být provozovány jako nízkotlaké (přetlak do 5 kPa) nebo vysokotlaké (přetlak 5-400 kPa). Zásobníky bioplynu musí být plynotěsné, odolné vůči UV záření, teplotním změnám a vlivu počasí. Zásobník bioplynu, by měl být schopen uchovat jedno až dvoudenní produkci bioplynu. V zásadě jsou dnes využívány dvě konstrukční řešení, integrovaný zásobník bioplynu umístěný na fermentoru nebo samostatně stojící zásobník bioplynu obrázek 9.



Obrázek 9: Možnosti umístění zásobníku bioplynu

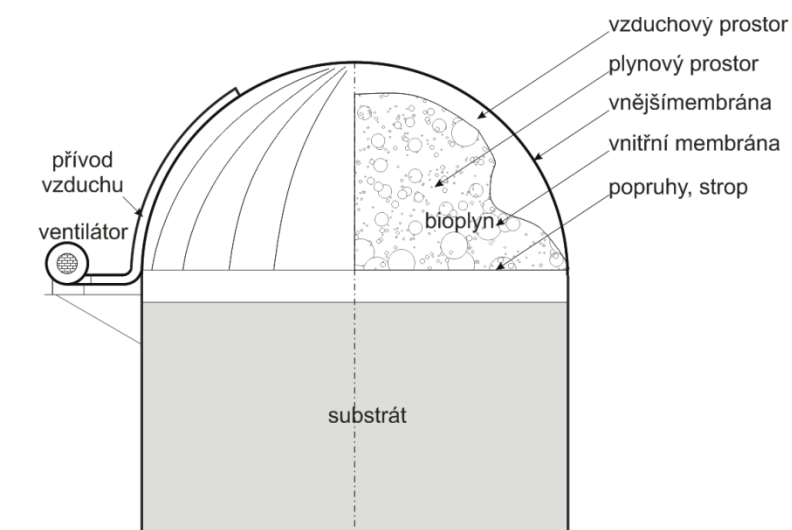
Integrovaný zásobník bioplynu je nejjednodušším a velmi rozšířeným řešením. Zásobník bioplynu je umístěn na vrcholu fermentoru. K akumulaci bioplynu slouží plynotěsná membrána vyrobená z různých druhů materiálu (EPDM kaučuková fólie, polyesterová tkanina potažená PVC), která je umístěna na vrcholu fermentoru. Použitý materiál musí být odolný vůči UV záření a musí vykazovat zvýšenou požární odolnost. Technicky jsou tyto systémy provedeny jako jedno nebo dvoumembránové.

U jednomembránového systému je vznikající bioplyn jímán v prostoru nad hladinou suroviny ve fermentoru pomocí membrány – vaku, které zároveň slouží jako kryt fermentoru, obrázek 10. Membrána je chráněná proti pádu do substrátu pomocí popruhů nebo dřevěného stropu, které jsou umístěny nad hladinou substrátu ve fermentoru. Před nadměrným přetlakem je zásobník bioplynu chráněn kapalinovou pojistkou



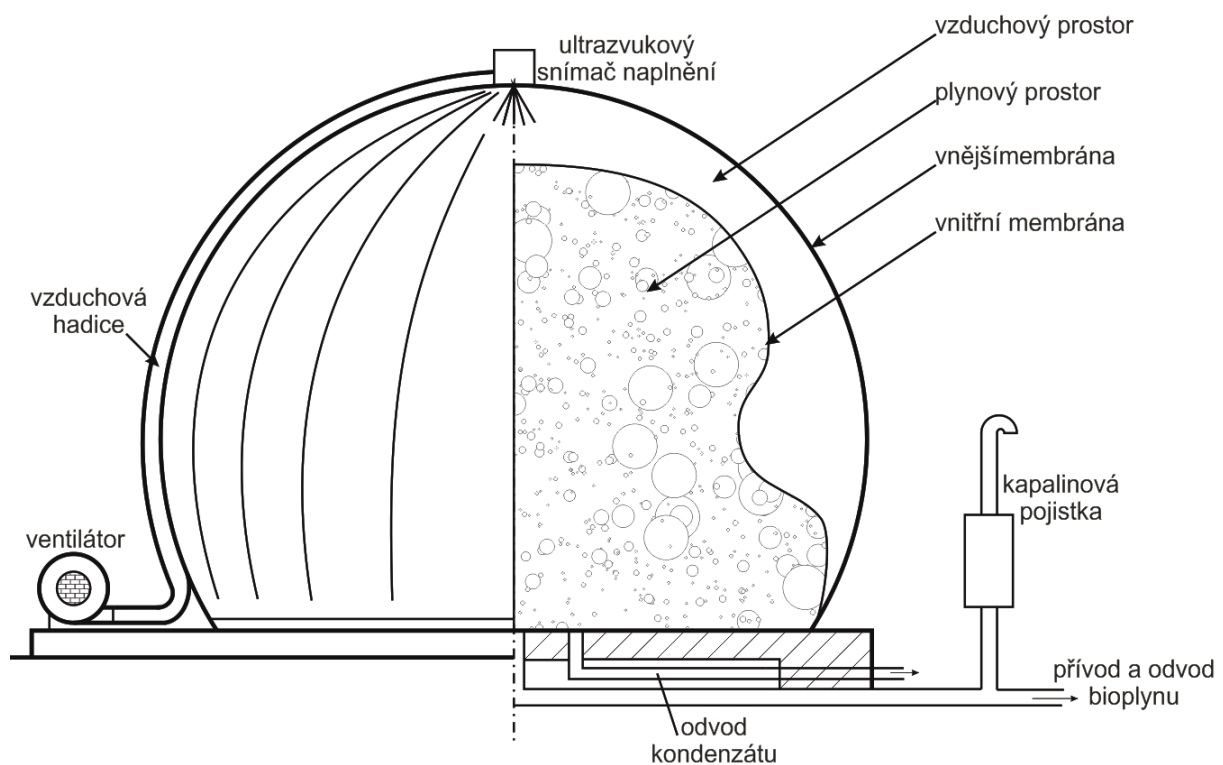
Obrázek 10: Integrovaný jednomembránový zásobník bioplynu

Dvoumembránový zásobník bioplynu je tvořen dvěma membránami, vnější ochranné a vnitřní, která slouží jako kryt fermentoru, obrázek 11. Tlak bioplynu v zásobníku je regulován pomocí vzduchu, který je vhánán mezi membrány vzduchovým ventilátorem. Vzduch vháněný mezi membrány plní dvě funkce, udržuje přetlak bioplynu a zároveň udržuje neměnný tvar vnější membrány. Neměnný tvar membrány významně přispívá ke snížení komplikací v případě nepříznivých povětrnostních podmínek (sníh a vítr). Vnitřní membrána je chráněná proti pádu do substrátu pomocí nosných pásů, které jsou umístěny nad hladinou substrátu ve fermentoru. Měření hladiny naplnění zásobníku bioplynu je zabezpečeno ultrazvukovým snímačem, který je umístěn na vrcholu vzduchového prostoru zásobníku bioplynu. Před nadměrným přetlakem je plynojem chráněn kapalinovou pojistkou.



Obrázek 11: Integrovaný dvoumembránový zásobník bioplynu

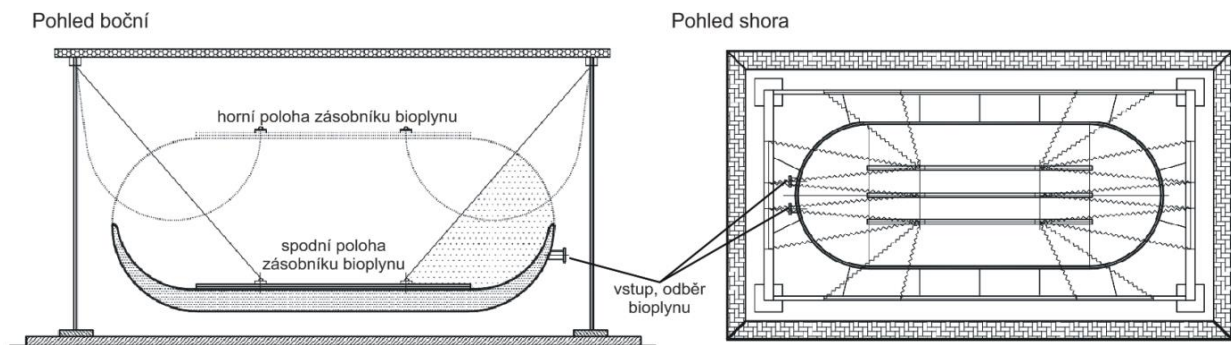
Samostatně stojící kulové zásobníky bioplynu jsou tvořeny vnější, vnitřní a podlahovou membránou. Membrány jsou upevněny k železobetonové základové desce pomocí kotevního prstence. Podlahová membrána utěsňuje plynový prostor vůči železobetonovému základu. Vnější membrána má tvar kulového vrchlíku a je napínána přetlakem vzduchu z podpůrného ventilátoru. Pohyblivá vnitřní membrána vytváří s podlahovou membránou proměnný plynový prostor a společně s napnutou vnější membránou tlakový regulační prostor. Podpůrný ventilátor, připojený vzduchovou hadicí k vnější membráně, vytváří tlakem vzduchu na vnitřní membránu potřebný přetlak bioplynu. Před nadměrným přetlakem je zásobník bioplynu chráněn kapalinovou pojistkou. Je-li produkce plynu vyšší než spotřeba, zvětšuje se objem plynového prostoru na úkor tlakového regulačního prostoru a naopak. Přetlak v plynové soustavě je dán tlakem, který vytváří podpůrný ventilátor. Pro kontrolu naplnění zásobníku bioplynu slouží ultrazvukový snímač polohy vnitřní membrány.



Obrázek 12: Samostatně stojící kulový zásobník bioplynu

Další možností jsou samostatně stojící zásobníky bioplynu tvořeny plynotěsným vakem zhotoveným z membrány o vysoké pevnosti, která je zavěšena na ocelové konstrukci, obrázek 12 a 13. V čelní stěně vaku jsou připojena potrubí pro přívod a odvod bioplynu. V nejnižším místě vaku je vývod kondenzátu. Na horní části vaku jsou umístěna vhodná závaží napomáhající jeho vyprazdňování. Pro ochranu plynojemu před nepřipustným přetlakem,

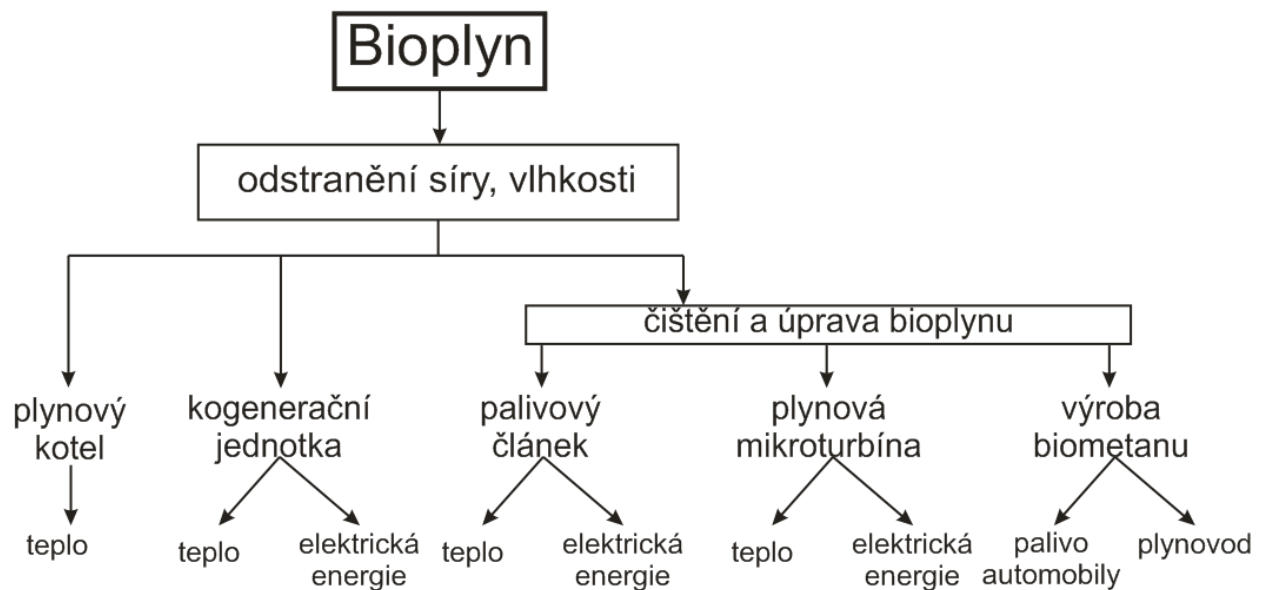
musí být na přívodním potrubí umístěna kapalinová pojistka. Vakový plynojem se umísťuje do přístřešku, který ho chrání před povětrností a mechanickým poškozením. Membrána zásobníku bioplynu je zhotovena z vysoce kvalitní polyesterové tkaniny povrstvené PVC.



Obrázek 13: Samostatně stojící zásobník bioplynu, vak

Využití bioplynu

Způsoby využití bioplynu je možno znázornit na následujícím obrázku 14.



Obrázek 14: Způsoby využití bioplynu, (zdroj: Reinhart, 1993, upraveno)

Přímé využití plynu s využitím tepelné energie

Nejjednodušším způsobem využití bioplynu je přímé spalování bioplynu v kotlích. K produkci tepelné energie lze bioplyn spalovat buď přímo na místě jeho vzniku, nebo může být přepravován potrubím ke koncovým uživatelům. Pro účely výroby tepelné energie není nutné bioplyn nijak upravovat, aby dosáhl emisních limitů srovnatelných s jinými podobnými palivy. Nicméně, z bioplynu musí být odstraněna vodní pára a musí být komprimován.

Kombinovaná výroba tepelné a elektrické energie

Kombinovaná výroba tepelné a elektrické energie, kogenerace, je standardním způsobem využití bioplynu vyprodukovaného na bioplynových stanicích. Tato technologie je považována za velmi efektivní využití energie vázané v bioplynu, s dosahovanou účinností kogeneračních jednotek často přesahují 90 %. Bioplyn je nutno pře konverzí v kogenerační jednotce zbavit tuhých částic a vlhkosti, to zejména z důvodu, že většina kogeneračních jednotek má výrobcem stanoveny maximální limity pro obsah sirovodíku, halogenovaných uhlovodíků a dalších příměsí v použitém bioplynu.

Mezi nejčastější uspořádání kogeneračních jednotek patří spojení čtyřdobého spalovacího motoru s generátorem. Generátory pracují obvykle s konstantními otáčkami 1500 otáček za minutu, kvůli souladu s frekvencí v elektrické přenosové soustavě. Čtyřdobé spalovací motory mohou pracovat s Ottovým cyklem (zážehový motor), Dieslovým cyklem (vznětový motor). Oba, zmíněné motory pracují bez přístřiku pomocného paliva (zapalovacího oleje), zásadní rozdíl mezi těmito motory vychází z jejich principu a je zejména ve velikosti komprese. Dalšími technologickými celky používanými k využití energie získané z bioplynu jsou spalovací motory s přístřikem pomocného paliva, mikro plynové turbíny, Stirlingův motor a palivové články.

Elektrická energie vyrobená transformací energie vázané v bioplynu může být použita jako procesní pro elektrická zařízení instalované na bioplynové stanici, jako jsou čerpadla, řídicí systémy a míchací zařízení. V mnoha zemích se zavedenými výkupními cenami pro elektřinu z obnovitelných zdrojů je tato energie prodávána do rozvodné sítě.

Důležitou podmínkou pro energetickou a ekonomickou efektivnost bioplynové stanice je využití vyrobené tepelné energie. Část tepla je spotřebována pro ohřev fermentoru, nicméně přibližně 2/3 vyrobené tepelné energie mohou být využity pro externí potřeby. I proto je dnes kladen obrovský důraz a dochází k úpravám legislativy, která by měla podpořit využití tepelné energie produkované při konverzi bioplynu v kogeneračních jednotkách.

Plynové spalovací motory

Tyto motory pracující na principu Ottova cyklu a byly vyvinuty speciálně pro konverzi bioplynu. Tyto motory jsou vybaveny zapalovacími svíčkami a jsou provozovány s přebytkem vzduchu, aby byly minimalizovány emise oxidu uhelnatého. To vede ke snížení spotřeby bioplynu a snížení výkonu motoru, což bývá kompenzováno pomocí turbodmychadel umístěvaných do spalinových cest. Tyto motory jsou schopny spalovat bioplyn s minimálním obsah metanu 45 %. Plynové motory lze provozovat na bioplyn nebo zemní plyn, čehož bývá někdy využíváno při náběhu bioplynové stanice, kdy se teplo používá

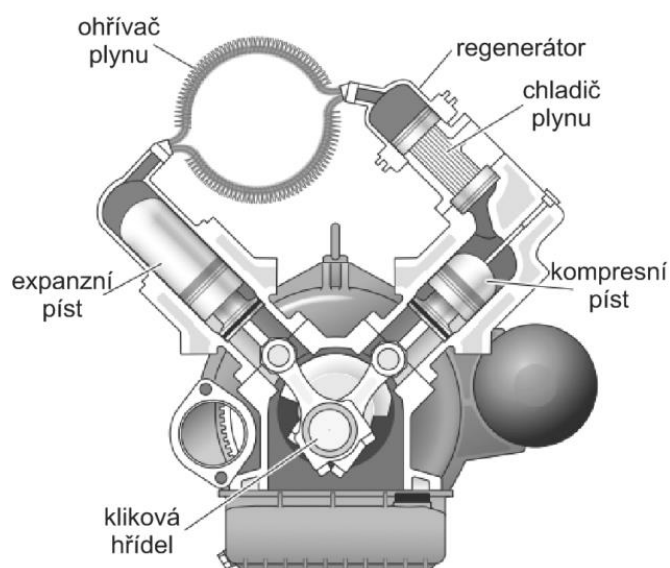
k ohřevu fermentorů. Elektrická účinnost těchto motorů se pohybuje v rozmezí 40-45 % a tepelná účinnost v rozmezí 35-38 %.

Plynové spalovací motory s přístřikem pomocného paliva

Tyto motory pracující s Dieselovým cyklem (vznětové) běžně používané v užitkových vozidlech bývají používány pro konverzi bioplynu. Bioplyn je mísen se vzduchem a tato směs je následně vstřikována do spalovací komory, kde je zapálena pomocným palivem (olejem). Tyto motory jsou provozovány s vysokým přebytkem vzduchu, v případě přerušení dodávky bioplynu mohou tyto motory pracovat bez jakéhokoli problému s topným olejem nebo naftou. Tyto motory dosahují podobné účinnosti jako plynové spalovací motory.

Stirlingův motor

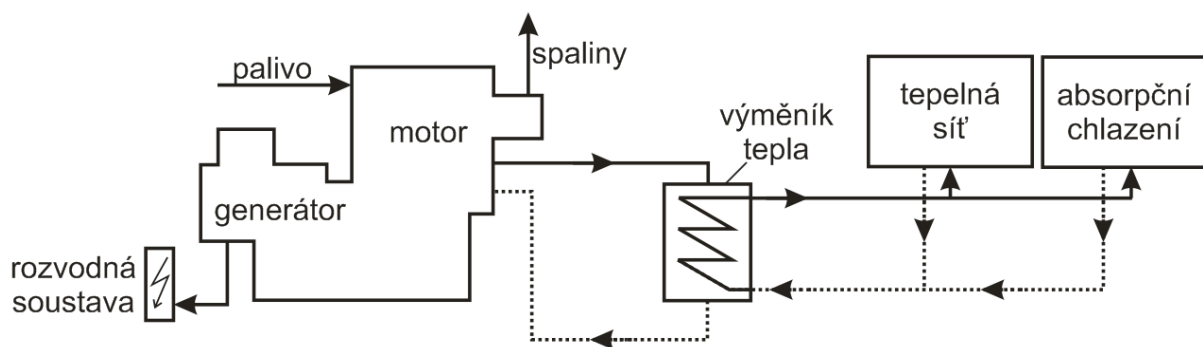
Stirlingův motor, obr. 15, pracuje bez vnitřního spalování, jeho princip je založen na základních principech termomechaniky. Pracovní plyn, uzavřený ve Stirlingově motoru je střídavě ohříván a ochlazován, což má za následek změny jeho teploty a objemu. Po zahřátí ohříváčem plynu se pracovní plyn rozpíná a tlačí na píst v expanzním válci. Rozpínající se horký plyn poté proudí přes regenerátor a chladič, kde regenerátor uchovává tepelnou energii před ochlazením. Kompresní píst tlačí ochlazený pracovní plyn zpět do horké oblasti, kde je plyn znovu ohříván, rozpíná se a začíná nový cyklus. Teplo potřebné pro provoz motoru může být generováno z různých zdrojů, jako je například plynový kotel spalující bioplyn, což umožňuje spalovat bioplyn s nižším obsahem metanu. Elektrická účinnost Stirlingova motoru se pohybuje v rozmezí 24-28 % a tepelná účinnost v rozmezí 38-40 %.



Obrázek 15: Stirlingův motor

Trigenerace

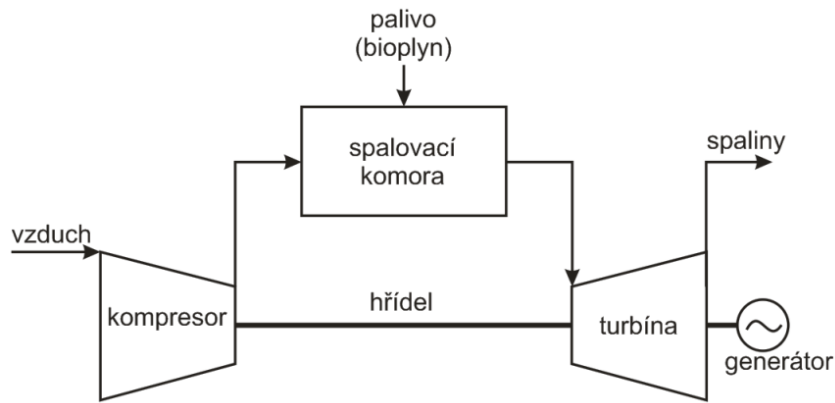
Trigenerace je forma výroby energie (elektrické a tepelné), která se stává běžnou v mnoha zemích situovaných v teplejších klimatických pásmech. V těchto zemích je mimo potřeby elektrické energie poptávka po tepelné energii, v zimním období pro vytápění, naopak v letním období pro chlazení. Trigenerační systém může produkovat současně tepelnou energii (pro vytápění i chlazení) a elektrickou energii v závislosti na aktuálních potřebách. Technologicky jde o spojení kogenerační technologie s absorpční chladicí jednotkou. Toto spojení je pro obě zařízení vysoce nezávislé a fyzické propojení je realizováno pouze v místech tepelných výměníků napojením proudů médií z kogenerační technologie a absorpční jednotky. Z pohledu provozu kogenerační technologie je toto řešení výhodné, neboť absorpční oběh využívá tepelnou energii produkovanou kogeneračním zdrojem v letních měsících, čímž je možno dosáhnout vyššího ročního využití kogenerační jednotky.



Obrázek 16: Schéma trigenerační jednotky

Mikroturbíny

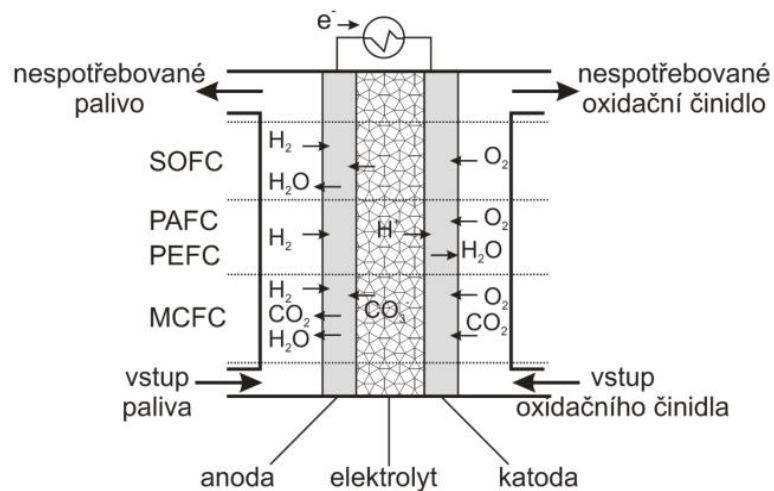
Princip funkce mikroturbíny (obrázek 17) vychází z otevřeného cyklu plynové turbíny (Braytonův cyklus), u kterého jsou modifikovány některé provozní parametry. V tomto cyklu je vzduch stlačený kompresorem, vháněn do spalovací komory, kde získává energii z paliva (bioplynu), tím dochází ke zvýšení jeho teploty. Horké plyny vstupují do turbíny a expanzí plynu (spalin) v turbíně dochází k zisku výkonu na hřídeli. Část výkonu turbíny je použita k pohonu kompresoru, který stlačuje vstupující médium (vzduch), zbylá energie je určena k pohonu elektrického generátoru. Elektrický instalovaný výkon se pohybuje obvykle pod 300 kWe. Otáčky hřídele dosahují rozmezí 90 000 - 120 000 za minutu. Elektrická účinnost mikroturbín se pohybuje v rozmezí 15-30 % a tepelná účinnost v rozmezí 40-55 %. Vyšší účinnosti dosahují mikroturbíny s rekuperací tepelné energie, tedy s předehřevem vstupujícího vzduchu.



Obrázek 17: Schéma funkce mikroturbíny

Palivové články

Palivové články jsou elektrochemická zařízení, která přeměňují chemickou energii reakce přímo na energii elektrickou. Základní fyzikální struktura palivových článků je tvořena vrstvou elektrolytu, která je v kontaktu s porézní anodou a katodou na obou stranách (obrázek 18). V typickém palivovém článku, jsou plynná paliva (bioplyn) kontinuálně přiváděna k anodě, oxidační činidlo (vzduch, kyslík) je přiváděn kontinuálně ke katodě.



Obrázek 18: Schéma funkce palivového článku

Existují různé druhy palivových vhodné pro zpracování bioplynu, názvy těchto palivových článků jsou odvozeny podle použitého elektrolytu. Volba typu palivového článku závisí na použitém palivu a způsobu využití tepelná energie.

Palivové články s polymerní iontoměničovou membránou

Z anglického názvu *Polymer-Electrolyte-Membrane fuel cell* (PEMFC). Tento palivový článek můžeme označit jako nízkoteplotní. Základní článek se skládá z hydratované

protonově vodivé membrány (elektrolytu), jako je například perfluorovaný polymer kyseliny sulfonové, vložený mezi dvě porézní elektrody impregnované platinou. Typ použitého elektrolytu má rozhodujícím vliv na životnost membrány, která je velmi citlivá na nečistoty v palivu, včetně oxidu uhličitého. Z tohoto důvodu, musí být bioplyn před použitím v těchto palivových článcích čištěn. Druhá strana elektrod je vodou nesmáčivá, což je zajištěno vrstvou vhodné látky, např. teflonu. V PEMFC není voda produkována ve formě páry, ale jako kapalina. Důležitým požadavkem těchto typů článků je zajistit vysoký obsah vody v elektrolytu z důvodu iontové vodivosti. Iontová vodivost elektrolytu je vyšší, když je membrána plně nasycena, což znamená nižší elektrický odpor a vyšší účinnost. Provozovat PEMFC při teplotách přesahujících 100°C je možné pouze při vyšších tlacích, což je dáno požadavkem na kapalný stav vody, zároveň tím však dochází ke snížení životnosti článku. Elektrická účinnost PEMFC se pohybuje v rozmezí 45-50 %.

Palivové články s kyselinou fosforečnou

Z anglického názvu *Phosphoric Acid Fuel Cell* (PAFC). Tento palivový článek můžeme označit jako středněteplotní. Pracovní teplota se pohybuje v rozmezí 160 - 220 °C a jako elektrolyt je použita koncentrovaná kyselina fosforečná (H_3PO_4), při nižších teplotách ztrácí kyselina fosforečná iontovou vodivost a tuhne v krystalické podobě. Teplota těchto článků proto nesmí klesnout pod 45 °C. Elektrody jsou tvořeny grafitem s příměsí platiny. Ve srovnání s jinými palivovými články dosahují nižší elektrické účinnosti 40-45 %, výhodou je však menší citlivost na přítomnost oxidu uhličitého a oxidu uhelnatého v palivu, kterým je vodík vyráběný z uhlíkatých paliv (zemní plyn, bioplyn). U PAFC musí být zajištěn odvod tepla. Chladivo, které může být buď kapalné (voda) nebo plynné (vzduch), je vedeno chladicími kanály umístěnými v článku. Tyto palivové články jsou dosud jediným komerčně využívaným typem palivových článků.

Palivové články s uhličitanovou taveninou

Z anglického názvu *Molten Carbonate Fuel Cell* (MCFC). Tento palivový článek můžeme označit jako vysokoteplotní. Pracovní teplota se pohybuje v rozmezí 600 - 700 °C. Jako elektrolyt se používá roztavená směs alkalických uhličitanů. Zpravidla se jedná o směs uhličitanů lithia, draslíku a sodíku, která je umístěna v tuhé porézní keramické matici na bázi $Li_2OAl_2O_3$. Při pracovní teplotě článku tvoří směs uhličitanů vysoce vodivou taveninu, ve které je uhličitanovým aniontem CO_3^{2-} umožněna iontová vodivost. Anoda bývá tvořena slitinami niklu (obvykle s Cr nebo Al) a katoda jeho oxidy (NiO s příměsí lithia). Výhodou tohoto typu palivového článku je rychlá kinetika elektrodových reakcí a vzhledem k vysoké teplotě i možnost přímé konverze palivy (zemní plynu, bioplynu) či jiných druhů uhlíkatých paliv.

Dále není tento typ palivových článků citlivý na obsah oxid uhličitý, je možno použít bioplyn s obsahem CO₂ až 40%. Účinnost PEMFC se pohybuje v rozmezí 50 - 55 %.

Palivové články s pevným elektrolytem

Z anglického názvu *Solid Oxide Fuel Cell* (SOFC) je dalším typem vysokoteplotního palivový článek. Pracovní teplota se pohybuje v rozmezí 750 - 1000 °C. Jako elektrolyt je použit iontově vodivý keramický materiál. Zpravidla se jedná o oxid zirkoničitý ZrO₂ stabilizovaný oxidy yttria Y₂O₃. Ten se v rozsahu pracovních teplot článku stává vodivým pro ionty kyslíku, kterým umožňuje transport od katody k anodě. Iontová vodivost je při teplotě kolem 1000 °C srovnatelná s vodivostí kapalných elektrolytů. Jako materiál pro anody se používají směsné keramicko-kovové sintrované materiály na bázi Ni, které se zpravidla stabilizují přísádkem ZrO₂. Jako katodové materiály se zpravidla rovněž používají vysoce porézní struktury na bázi LaMnO₃ obohacené stronciem. Jako palivo je možné používat H₂, CO nebo produkty katalytického reformování uhlíkatých paliv (zemního plynu, bioplynu). Elektrická účinnost SOFC se pohybuje v rozmezí 55-60 %.

Hořák zbytkového plynu

Mohou nastat situace, kdy máme k dispozici bioplyn, který není možno využít pro výrobu energie. To se může stát v důsledku mimořádných situací jako je třeba porucha nebo servis kogenerační jednotky. V takových případech obvykle není možné najít náhradní řešení pro využití bioplynu anebo jsou tato řešení ekonomicky nevýhodná. Vypouštění bioplynu do atmosféry není s ohledem na složení bioplynu vhodným řešením, navíc se provozovatel bioplynové stanice vystavuje riziku sankcí ze strany kontrolních orgánů. Skladování bioplynu v plynojemu bez jeho spotřeby je možné pouze krátkodobě, v řádech hodin. Z tohoto důvodu, bývají bioplynové stanice, které nejsou osazeny více spotřebiči bioplynu (kotle, kogenerační jednotky, mikroturbíny, atd.) vybaveny hořákem zbytkového plynu. Spalování bioplynu je regulováno s ohledem na emisní standardy.

Úprava bioplynu

Bioplyn může být distribuován prostřednictvím stávajících plynovodů pro přepravu zemního plynu a použit pro stejné účely jako zemní plyn nebo může být komprimován a použit jako palivo pro vozidla. Před distribucí do stávajících plynovodů nebo před použitím bioplynu jako paliva v automobilech musí být zbaven přísádky, zejména vodní páry, oxidu uhličitýho, sirovodíku, kyslíku, dusíku, vyšších uhlovodíků, halogenderivátů uhlovodíků a křemíku resp. organokřemičitých sloučenin. Obsah metanu v bioplynu lze zvýšit z obvyklých 50-75 % na více než 95 %. Takovýto plyn bývá nazýván jako biometan. Pro odstranění nečistot z bioplynu mohou být použity různé technologie. Odstranění oxidu uhličitýho se provádí tak,

aby bylo dosaženo požadovaného Wobbého indexu biometanu. Požadavky na kvalitu biometanu pro možnost jeho dodávky do plynárenských sítí v ČR uvádí tabulka 13.

Tabulka 13: Požadavky na kvalitu biometanu pro možnost jeho dodávky do plynárenských sítí v ČR

Parametr	Hodnota
Obsah metanu	min. 95,0 % mol.
Obsah vody	max. $-10\text{ }^{\circ}\text{C}^{1)}$
Obsah kyslíku	max. 0,5 % mol.
Obsah oxidu uhličitého	max. 5,0 % mol.
Obsah dusíku	max. 2,0 % mol.
Obsah vodíku	max. 0,2 % mol.
Celkový obsah síry (bez odorantů)	max. $30\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3\ 2)}$
Obsah merkaptanové síry (bez odorantů)	max. $5\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3\ 2)}$
Obsah sulfanu (bez odorantů)	max. $7\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3\ 2)}$
Obsah amoniaku	nepřítomen ³⁾
Halogenované sloučeniny	max. $1,5\text{ mg (Cl+F) v m}^3\ 2)$
Organické sloučeniny křemíku	max. $6\text{ mg (Si) v m}^3\ 2)$
Mlha, prach, kondenzáty	nepřítomny ³⁾

¹⁾ vyjádřený jako teplota rosného bodu vody při předávacím tlaku, předávacím tlakem se rozumí minimální požadovaný tlak v místě napojení výrobního plynu na plynárenskou soustavu, který je dohodnutý ve smlouvě o připojení (musí být specifikováno, zda se jedná o přetlak, nebo absolutní tlak).

²⁾ Referenční podmínky $T_v = 288,15\text{ K}$, $p_v = 101,325\text{ kPa}$.

³⁾ Pod pojmem nepřítomen/nepřítomny se rozumí odstranění nečistot do té míry, aby byl zabezpečen bezproblémový transport plynu v distribuční soustavě a bezproblémový provoz plynových spotřebičů a zařízení.

Metody úpravy bioplynu

Úprava bioplynu představuje proces odstranění nežádoucích příměsí z bioplynu. Za hlavní nežádoucí příměsi jsou považovány oxid uhličitý, sirovodík a voda. Tyto složky jsou z bioplynu odstraňovány za účelem zvýšení podílu energeticky hodnotného metanu, jehož zastoupení se následně pohybuje kolem 96 % obj. V současné technické praxi je známa celá řada technologií umožňujících odstranění nežádoucích příměsí z bioplynu. Jednotlivé technologie se liší v principu separace, komplexnosti (některé odstraňují jen některé nežádoucí složky v bioplynu), velikosti zařízení a provozními náklady. Technologie se můžou

kombinovat pro dosažení lepších výsledků čistoty biometanu. Metody čištění bioplynu lze rozdělit do čtyř hlavních skupin podle typu separace.

a) *Adsorpce* - metoda střídání tlaků

b) *Absorpce*

- fyzikální, tlaková vodní vypírka

- chemická vypírka

- nízkotlaká absorpce

c) *Membránová separace*

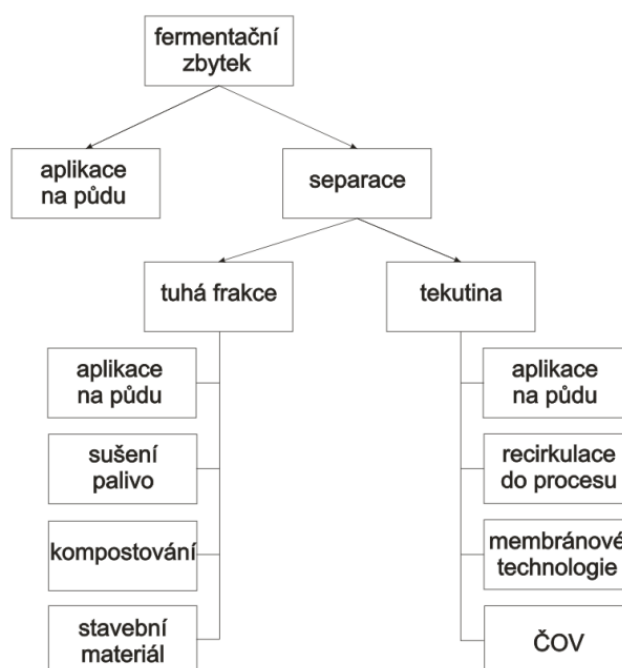
d) *Nízkoteplotní (kryogenní) rektifikace*, vymrazování CO₂.

Největšího uplatnění v reálném provozu doposud doznaly s jistými modifikacemi v zásadě dvě technologie, proces tlakové adsorpce a membránová separace.

2.7 Fermentační zbytek

Sekundárním výstupním produktem anaerobního rozkladu biologicky rozložitelných materiálů je fermentační zbytek. Fermentační zbytek, pokud splňuje podmínky pro aplikaci na zemědělskou půdu, bývá velmi často aplikován na pozemky jako hnojivo. Pokud fermentační zbytek nesplňuje požadavky legislativy, může být používán dále jako vstupní materiál v kompostárnách, rekultivační materiál mimo zemědělskou a lesní půdu nebo po vysušení jako palivo. Kvalita a nutriční obsah fermentačního zbytku jsou ovlivněny několika faktory, kromě druhu zpracovávaných vstupních materiálů se jedná o způsob předúpravy vstupních materiálů, procesní podmínky (provozní teplota ve fermentoru, doba zdržení, obsah sušiny, apod.), způsob a doba skladování. Kapalný fermentační zbytek obsahuje obvykle 5–12 % celkové sušiny, netekutý fermentační zbytek potom 33–40 % celkové sušiny (Marcato et al., 2008). Fermentační zbytek obsahuje vysoké koncentrace celkového dusíku, z čehož 60–80 % představuje dusík amoniakální, dále pak fosfor a draslík, což má bezesporu kladný vliv při aplikaci fermentačního zbytku na zemědělskou půdu. Obsah organické hmoty a organického uhlíku ve fermentačním zbytku je snížen o podíl snadno odbouratelných sloučenin uhlíku, které jsou transformovány biochemickými procesy na bioplyn v průběhu anaerobní fermentace. Hodnota pH fermentačního zbytku je obvykle uváděna v rozpětí 7,5–8,3. Obvyklá hodnota rozkladu organické hmoty v průběhu anaerobní fermentace se pohybuje mezi 12–53 %. Obsah snadno rozložitelných organických látek závisí zejména na způsobu provozu bioplynové stanice. Čím delší je doba zdržení substrátu v bioplynové stanici, tím méně snadno rozložitelných organických látek bude obsaženo ve fermentačním zbytku. Přítomnost stopových prvků a těžkých kovů může na druhé straně zamezit používání

fermentačního zbytku jako hnojiva na zemědělské půdy. Jedná se zejména o případy, kdy jsou zpracovávány v bioplynových stanicích materiály s vysokými koncentracemi těchto prvků, případně o bioplynové stanice, které používají speciální směsi stopových prvků. Potom může být obsah stopových prvků a těžkých kovů vyšší ve srovnání s minerálními hnojivy. Způsob nakládání s fermentačním zbytkem je ovlivněn zejména jeho výslednou kvalitou, tedy vstupy do bioplynové stanice a konkrétní situaci každá bioplynová stanice, respektive provozovatele. Možné způsoby nakládání s fermentačním zbytkem jsou uvedeny na obrázku 19.



Obrázek 19: Způsoby nakládání s fermentačním zbytkem.

Separace fermentačního zbytku

Separace fermentačního zbytku je prováděna s cílem oddělit tekutou a pevnou část obsaženou ve zpracovávaném materiálu. Tato zařízení tedy najdou své uplatnění u bioplynových stanic, které pracují s nízkým obsahem sušiny. Dnes je nejčastěji používaný šnekový separátor. Zařízení se skládá z podávacího zásobníku, do kterého je přiváděn fermentační zbytek, který následně vstupuje do tubusu separátoru ve kterém je uložena šnekovice kolem které je válcové síto. Při posunu fermentačního zbytku tubusem dochází k odvádění vody přes perforované válcové síto. Odvodněný fermentační zbytek je dopravován k výstupu ze separátoru, který je uzavírán klapkou. Při stlačení fermentačního zbytku a překonání odporu klapky je odvodněný fermentační zbytek vytlačen z tubusu separátoru. Odseparovaná kapalina je aplikována na pozemky jako hnojivo a částečně vracena do fermentoru. Pevný

podíl je aplikován na pozemky jako hnojivo, případně využit jako stelivo, palivo, stavební materiál.

Skladování fermentačního zbytku

Fermentační zbytek je čerpán z fermentoru do skladovací nádrže, kde je skladován před tím, než je použit jako hnojivo. Skladovací nádrž pro tekutý fermentační zbytek je nejčastěji provedena jako betonová kruhová otevřená podzemní nebo nadzemní nádrž s mícháním. Objem skladovací nádrže musí být dostatečný k uskladnění fermentačního zbytku po dobu několik měsíců. Právní předpisy vyžadují navrhnout objem skladovací nádrže na tři až devíti měsíční dobu skladování s cílem zajistit optimální a hospodárné využití fermentačního zbytku jako hnojiva a vyhnout se použití v zimním období. Tuhý fermentační zbytek musí být skladován ve stavbách zabezpečených stejným způsobem, jako stavby pro skladování tuhých statkových hnojiv s vyloučením přítoku povrchových nebo srážkových vod. Součástí skladu na tuhý fermentační zbytek je sběrná jímka na srážkové vody.

3. KOMPOSTÁRNY

Technologie kompostování napodobuje a urychluje přeměny organických látek na základě biochemických procesů tím, že upravuje podmínky pro činnost zúčastněných organismů a bezobratlých živočichů. V této kapitole jsou shrnuty základní informace o průběhu a principu biodegradace organické hmoty kompostováním, o metodách kompostování, vhodných odpadech pro kompostování a jejich úpravě.

Kompostování by mohlo v našem životním prostředí řešit řadu důležitých problémů, z nichž některé bychom mohli zařadit až na úroveň pověstných globálních problémů lidstva. Z hlediska ekologie představuje kompostování:

- zpracování odpadů, které nevyžaduje žádnou další přídavnou energii,
- uzavření koloběhu prvků v přírodě,
- možnost doplnění nezastupitelného humusu do půdy.

Můžeme říci, že kompostování je člověkem záměrně vyvolaná a řízená intenzivní biodegradace organických odpadů. Při tomto procesu jsou organické látky postupně rozkládány do forem vhodných pro přímou aplikaci do půdy jako zdroj hmoty a energie pro růst nových rostlin. Jde o stejný proces, který spontánně probíhá se všemi organickými materiály vyskytujícími se v přírodě. Tento proces je možné využít také pro zpracování odpadů. Co se týče koloběhu prvků v přírodě, je snad význam uzavření cyklu evidentní. Člověk systematicky degraduje suroviny na odpady a tím dostává životně důležité prvky do

stále méně využitelných forem. Tím vlastně vyvolává sekundární a dnes již nemalý tok energie a hmoty, konkurující přirozeným primárním tokům. Na rozdíl od přirozených primárních toků jsou tyto sekundární toky vyvolané antropogenním faktorem zpravidla nevratné a použité prvky se obvykle nevrací zpět do životního prostředí.

Jasně to vidíme na příkladu intenzivního zemědělství. Při tomto způsobu hospodaření je půda systematicky připravována o humus, který v půdě zastává nezastupitelnou roli, kterou nemohou nahradit žádná umělá hnojiva. Optimální množství humusu v půdě je 5 %, přičemž dnes už běžně hospodaříme na půdách s 1 % humusu.

3.1 Proces kompostování

Jde o aerobní proces, jehož výsledkem je zpravidla stabilizovaný kvalitní kompost, schopný dodat půdě nezastupitelný humus. Základem kompostování je biodegradace organické hmoty účinkem aerobních mikroorganismů, kombinovaná s některými dalšími reakcemi jako oxidace, hydrolýza. Zastoupení mikroorganismů není konstantní a závisí jak na složení kompostu, tak na stupni humifikace kompostovaného materiálu. Obecně však platí, že se na humifikačním procesu zúčastňují hlavně heterotrofní mikroorganismy, tj. mikroorganismy, které pro svůj růst využívají okolní prostředí jako zdroj uhlíku a kyslíku. Mikroorganismy tohoto typu odbourávají organické látky a část z nich oxiduje až na konečné produkty s nízkým obsahem energie, tj. CO_2 a H_2O . Štěpením vazeb získávají mikroorganismy zdroj energie pro svůj metabolismus a zároveň zdroj biogenních prvků pro svůj růst a vývoj. Biodegradaci podléhají nejprve jednoduché organické látky jako sacharidy, organické kyseliny a bílkoviny. Degradace polysacharidů je pomalejší a začíná nejprve depolymerací. Poměrně stabilní složkou je lignin, který tvoří podstatnou část rostlinných materiálů, a to 15 - 30 %.

Účelem kompostování není úplná biodegradace všech složek. Při kompostování by biodegradace měla proběhnout jen v takovém rozsahu, aby se materiál biologicky stabilizoval. Biologicky stabilizovaným materiálem rozumíme takový materiál, který již nepodléhá prudké biodegradaci a především v něm nemohou začít patogenní procesy jako hniloba a podobně. Dobře biologicky stabilizovaný materiál již neohrožuje žádným způsobem půdu, vodu a ovzduší, nevykazuje známky fytotoxicity a je možno zapravit jej do zemědělsky využívané půdy.

Aby byl proces kompostování efektivní, je třeba zajistit dostatečné provzdušňování kompostovaného materiálu. Přívod vzduchu je základní podmínkou aerobního procesu. Při klasickém kompostování na hromadách se přívod vzduchu zajišťuje občasným převrstvením

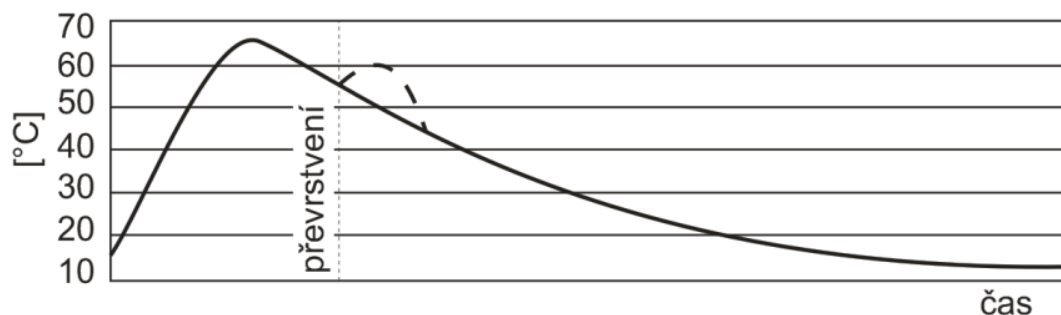
materiálu. Tento způsob se už dnes jeví jako energeticky náročný a málo účinný - proces klasického kompostování je pro zpracování větších množství vstupních surovin pomalý. Z tohoto důvodu se kompostování zefektivňuje výstavbou speciálních zařízení, která slouží především k nepřetržitému a efektivnímu provzdušňování.

Průběh aerobního kompostování

Průběh kompostování je, až na malé odchylky, stejný u všech způsobů aerobního kompostování. Je tedy z hlediska probíhajících dějů lhostejné, zda kompostujeme na hromadách nebo v některých speciálních kompostovacích zařízeních - bioreaktorech (někdy též biofermentorech). Co se liší je pouze rychlost probíhajících dějů. Předpokládejme, že máme připravenou směs optimálního složení a optimální konzistence. O tom, jaké konkrétně má tato směs mít složení a konzistenci, bude rozebráno později, prozatím jen specifikujeme optimální směs jako dobře rozdrčenou, vhodně namíchanou a zhomogenizovanou směs. Přestože je tato směs rozdrčena na částice do několika milimetrů, poznáme jasně u každé částice její původ. Z této směsi založíme kompost buď volně na hromadě, nebo v některém zařízení a sledujeme, jak se směs v průběhu času mění.

Nastartování biodegradace mikroorganismy je zpravidla spontánní. Mikroorganismy jsou běžně přítomny v zakládané směsi a po vytvoření vhodných podmínek se začnou množit. Jen v ojedinělých a speciálních případech se mikroorganismy do kompostu očkují, potom hovoříme o řízeném kompostování. Množení mikroorganismů je za ideálních podmínek exponenciální. V průběhu 24 hodin vznikne $5,62 \cdot 10^{14}$.

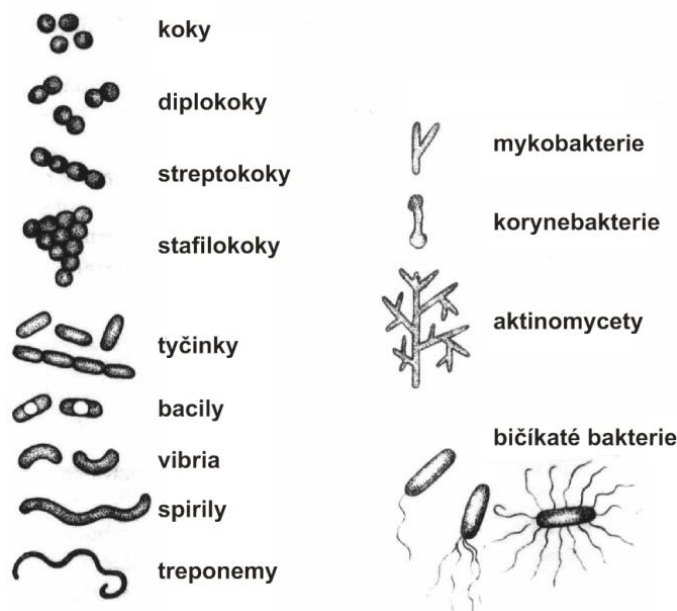
Kompostovací proces má tři základní fáze, které od sebe snadno rozeznáme. Teplota, vzhled, pach a objem substrátu, to jsou základní vlastnosti, odlišující jednotlivé fáze kompostování. Teplotní průběh kompostování je znázorněn na obrázku 20.



Obrázek 20: Teplotní průběh kompostování

První fáze rozkladná - mineralizace

Vyznačuje se rychlým nárůstem teploty, následovaném relativně rychlým poklesem. V jádru kompostované hmoty dosáhne teplota nejprve hodnoty přes 60 °C a po krátké prodlevě na tomto maximu začne teplota relativně rychle klesat. Tato fáze patří termofilním mikroorganismům. Na dalším obrázku 21 jsou uvedeny mikroorganismy, které se v této fázi nejčastěji v kompostu vyskytují.

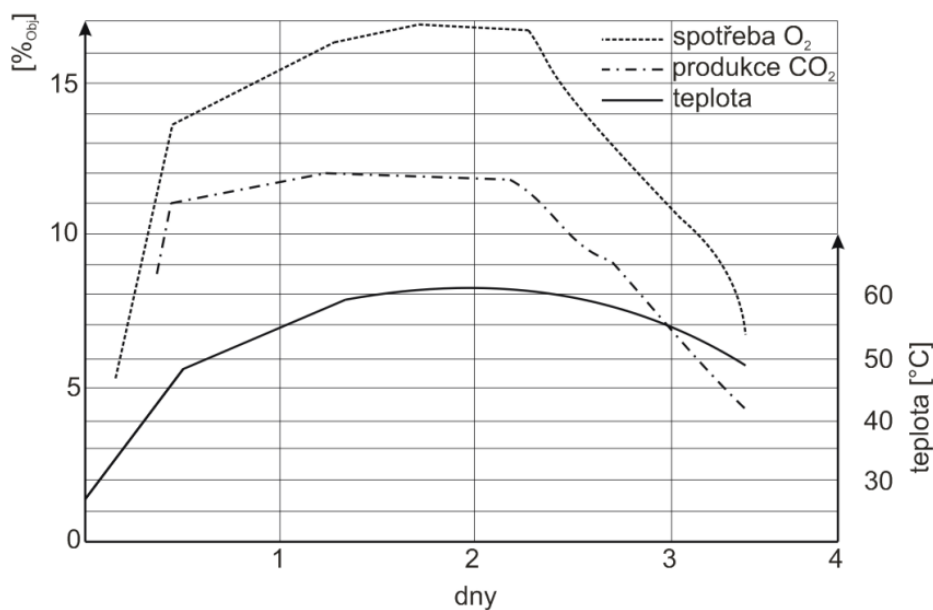


Obrázek 21: Mikroorganismy v kompostu

Tyto mikroorganismy rozkládají složité organické sloučeniny na jednodušší sloučeniny anorganického charakteru. Spolu s touto biodegradací probíhají rovněž chemické degradační reakce. Na počátku se odbourávají cukry, škroby a bílkoviny, v pozdější fázi též celulosa a další součásti dřevní hmoty. Konečné produkty rozkladu jsou voda, kysličník uhličitý a nitrátový iont NO_3^- . Při přebytku dusíku ve směsi se může dusík uvolňovat ve formě amoniaku. Proto se tato fáze také nazývá mineralizace.

Mikroorganismy berou kyslík převážně ze vzduchu, energie pak ze štěpení chemických vazeb kompostované hmoty. Na obrázku 22 jsou graficky znázorněny výsledky analýzy vzduchu, který nuceně prochází kompostovanou vrstvou. Vidíme zde značnou spotřebu kyslíku a vývin kysličníku uhličitého. Objem směsi relativně rychle klesá. Nejde přitom pouze o sedání a hutnění materiálu a o odpařování vody, ale přímo bilanční pokles celkové hmotnosti, vyplývající z produkce oxidu uhličitého a dalších plynných produktů metabolismu činnosti mikroorganismů. Celkový pokles hmotnosti je až 30 % původního množství. Mikroorganismy nejsou zavedeny na organické kyseliny. Důsledkem je, že relativní zastoupení těchto kyselin roste a dochází k poklesu pH. Vzhled směsi se prozatím příliš

nemění, pach směsi je stejný jako na počátku procesu, později můžeme cítit i amoniak i když toho by nemělo příliš mnoho unikat. Kompost v této fázi nemá vlastnosti humusu a není schopen aplikace do půdy. V některých případech může dokonce vykazovat známky fytotoxicity. Důležité je, že v této fázi dochází k hygienizaci kompostu. Teplota hubí jednak hnilobné a další patogenní bakterie, jednak likviduje klíčivost semen plevelů.



Obrázek 22: Spotřeba kyslíku a produkce oxidu uhličitého

Druhá fáze - přeměnná

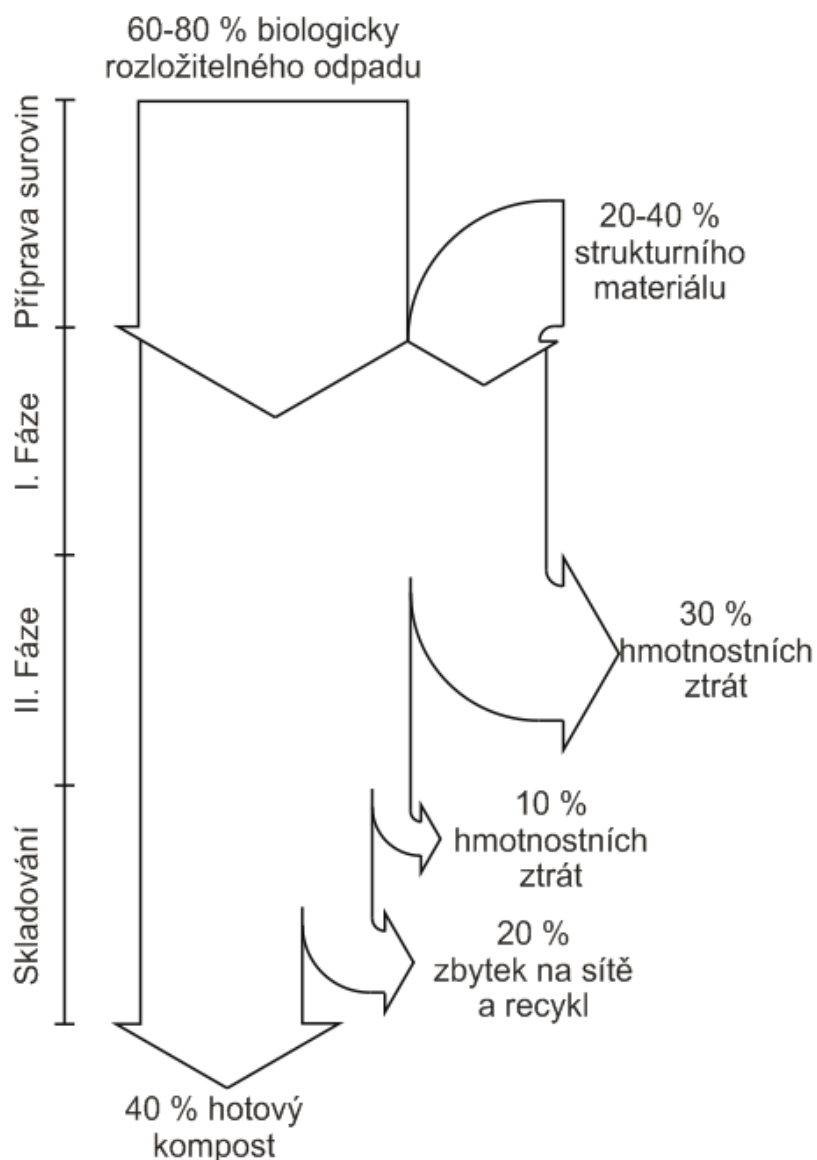
Vyznačuje se pozvolným poklesem teploty ze 40 °C na 25 °C. Termofilní bakterie nahradí jiná skupina mikroorganismů a plísní. V této fázi se mohou už objevovat i nenáročný hmyz. Na spodní části obrázku 21 vidíme příklady organismů, které se v této fázi mohou v kompostu vyskytnout. Původní vzhled, struktura a pach hmoty se ztrácí. Kompost dostává hnědou barvu, jednotlivé částice se dále rozpadají. V pozdější době už ze směsi cítíme příjemnou zemitou houbovou vůni. Pokračuje další pokles hmoty a objemu, i když již podstatně pomaleji. V této fázi se odbourá dalších 10 % hmoty. Na konci 2. fáze už stěží rozeznáváme původ jednotlivých částic. Mizí fytotoxicita a výluhy kompostu nejsou hygienicky závadné. Ke konci této fáze už lze použít kompost jako hnojivo.

Třetí fáze - dozrávání kompostu

Teplota klesá na hodnotu teploty okolí. Kompost ovládají malí živočichové a hmyz svinky, stonožky, roztoči, žížaly (obrázek 21). Dochází k vytvoření vazeb mezi anorganickými a organickými látkami v kompostu a ke tvorbě kvalitního a stabilního humusu. V této fázi už dochází jen k nepozorovatelnému poklesu hmotnosti.

Celková bilance hmotnosti je patrná z obrázku 23. Jedná se o tak zvaný Sankeyův diagram a tento typ bilancí a hmotnostních toků je v tomto zobrazení velice názorný.

Celkový pokles hmotnosti od začátku kompostování je 50 % (vztaženo na původní hmotnost zakládané hmoty). Pokles objemu je ještě větší, protože dojde ke zhuštění materiálu. Byla-li původní sypná hmotnost zakládaného materiálu $400-600 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, je sypná hmotnost kompostu podle druhu technologie okolo $700 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$.



Obrázek 23: Hmotnostní bilance kompostování

O délce trvání jednotlivých fází kompostování rozhoduje jednak kompostovaný materiál, jednak vlastní podmínky kompostování ale i další faktory, jako třeba roční období.

Důležité je, že proběhnutím 1. fáze kompostování se materiál do určité míry biologicky stabilizuje a směs už nedonutíme k zopakování této fáze.

Konec první fáze a stabilizace kompostu je zpravidla způsobena nedostatkem dusíku a vyčerpáním snadno rozložitelných látek. Tuto fázi bychom iniciovali pouze většími zásahy do kompostu, například dodávkou dalšího dusíku nebo obnovením čerstvého povrchu kompostovaných částic například zopakovaným podrcením. To se také například děje, když kompost v závěru první fáze přeházíme. Po tomto přeházení dojde ke krátkodobému a prudkému nárůstu teploty (čárkovaná čára na obr. 20). Tento nárůst však obvykle nedosáhne původních vysokých teplot a je podstatně kratší.

Zacházení s takto stabilizovaným a hygienizovaným kompostem je mnohem snazší a bezpečnější než s kompostem čerstvě zakládaným. V některých zemích je možno takový kompost skladovat na volné a nedrenážované ploše.

3.2 Vhodné suroviny a odpady pro aerobní kompostování

Kompostováním můžeme zpracovat prakticky všechny materiály, podléhající biologickému rozkladu. Jako možné příklady odpadů zpracovatelných v kompostárně můžeme uvést:

- odpady ze sklizně zeleniny, ovoce, obilí, chmele,
- seno, sláma,
- odpad z údržby zeleně,
- kaly z čistíren odpadních vod,
- potravinářské odpady,
- trus, mrva a kejda,
- kožedělné odpady, vlna, srst,
- třísky, piliny.

Nezanedbatelná je také produkce bioodpadů, které jsou součástí komunálního odpadu nebo jsou odděleně sbírány. Přesnou produkci tohoto druhu odpadu je velmi obtížné stanovit. V České republice je nejčastěji uvažováno s hodnotou, respektive produkcí biologicky rozložitelného odpadu 100 - 150 kg na osobu a rok.

3.3 Zásady při kompostování

Obecně platí, že čím je směs pro kompostování pestřejší, tím je výsledný kompost kvalitnější. Kromě toho je užitečné při zakládání kompostu dodržovat některé další zásady:

Stejná rychlost biodegradace

Vhodné je mísit přednostně ty látky, jejichž rozklad probíhá stejně rychle. Vyvrálost kompostu je potom homogenní.

Vhodné chemické složení

Vhodné chemické složení je nutnou podmínkou úspěšného kompostovacího procesu. V první řadě se jedná o vhodný poměr mezi organickými a anorganickými látkami. Anorganické látky neposkytují živnou půdu pro mikrofloru a jsou z tohoto hlediska balastní složkou. Při velkém přebytku anorganické složky probíhá humifikace organického podílu pomalu. Důležité je, aby organické látky obsahovaly dostatečný podíl lehkou odbouratelných látek, jako jsou cukry a bílkoviny. Jenom v tom případě se kompostování rychle a účinně rozběhne. Při rychlém rozběhu kompostování se nabourají i obtížněji degradovatelné organické látky a jejich rozpad se v dalších fázích kompostování urychlí.

Pokud substrát obsahuje převahu biologicky stabilních látek a těžko degradovatelných surovin, probíhá humifikace velmi pomalu. Příkladem je třeba kompostování dřevěných pilin. Piliny jsou vhodným přídavkem do kompostů, zvláště pro úpravu vlhkosti. Pokud by však tvořily základ substrátu, bude to s kompostováním špatné.

Vhodný poměr C:N

Mikroflora potřebuje pro svůj život vedle zdroje uhlíku i zdroj dusíku, který je nutný pro syntézu bílkovin. Tyto bílkoviny tvoří jednak přímo součást buněk mikroorganismů, jednak se přímo zúčastňují metabolismu mikroorganismů jako enzymy. Pro optimální proces musí být tedy obsah dusíku v rovnováze s obsahem uhlíku.

Při nedostatku dusíku se průběh humifikace výrazně zpomaluje. Naopak přebytek dusíku vede k nadměrné mineralizaci a k úniku dusíku ve formě amoniaku. Vývin amoniaku vede ke zvyšování pH do oblastí nepříznivých pro život mikroorganismů. V důsledku toho se mohou biochemické reakce úplně zastavit. Optimální poměr mezi obsahem uhlíku a dusíku zvaný poměr C:N se pohybuje v rozmezí 40:1 až 25:1. Vhodný poměr C:N je nutné dosáhnout programovým mísením složek. Látky chudé dusíkem jsou ovoce, jehličí, sláma, kůra, papír, dřevo. Látky bohaté na dusík jsou například všechny živočišné exkrmenty, tedy všechny hnoje a močůvka. Relativně bohatá na dusík je rovněž tráva, zeleninové odpady, listí, zvířecí srst, rohovina. Jako krajní možnost dodávky dusíku je možno použít i dávky močoviny. Optimální poměr C:N finálního produktu kompostu by se měl pohybovat v rozmezí 15:1 až 10:1.

Obsah cizorodých látek

Pro naše podmínky je doporučena česká technická norma ČSN 46 5735 „Průmyslové komposty“. Tato norma praví, že na výrobu kompostů se nesmí použít suroviny, které budou

mít po skončení biologického zrání charakter cizorodých látek. Jako cizorodé látky však norma udává pouze obsah těžkých kovů.

Co se týče ostatních cizorodých látek, norma uvádí pouze přípravky na ochranu rostlin a chemikálie, nemající charakter surovin. Likvidace těchto látek kompostováním je podle normy nepřipustná.

Vhodná granulometrie částic a struktura materiálu

Složky kompostu je potřeba dobře podrtit a důkladně promísit. Jako příklad můžeme uvést dřevo a kůru. Jemné piliny jsou ve vhodné směsi přijatelnou složkou kompostu, která se přímo zúčastní kompostovacího procesu. Naopak hobliny prochází kompostovacím procesem bez jakékoliv výrazné směsi. Podobně je tomu se slámou a trávou.

Na druhé straně velmi jemné složky vytváří kompaktní, těžko provzdušnitelnou strukturu a brání tak spontánnímu růstu mikroorganismů. Vhodným přídavkem upravujícím konzistenci směsi je v těchto případech například drcená sláma.

Optimální vlhkost směsi

Kompostovací vlhkost substrátu se pohybuje kolem 40 %. Za těchto podmínek je 70 % pórů materiálu zaplněno vodou. Nedostatek vlhkosti neumožňuje některé důležité hydrolytické reakce, ani život mikroflory. Mohou však probíhat některé chemické nežádoucí reakce. Uvolněným reakčním teplem se může materiál zahřát na takovou teplotu, že může proběhnout až pyrolýza a suchá destilace materiálu. Tyto procesy mohou způsobit až samovznícení materiálu, jak to známe z podobných případů skladování organických materiálů jako například uhlí, sena, pilin. Toto nebezpečí se ještě stupňuje u těch technologií, u kterých se do nehybné vrstvy přivádí vzduch. Pak se může stát, že při vykládání kompostu se nacházejí hnízda, kde došlo k samovznícení.

Z hlediska kvality vyráběného kompostu jsou tyto procesy nežádoucí, protože vedou k nadměrné mineralizaci kompostu na úkor jeho humifikace.

Nadbytek vlhkosti není rovněž žádoucí, protože odpařování vody odvádí formou výparného tepla značnou část energie a kompost se ochlazuje. Za takových podmínek se nerozvine činnost termofilních mikroorganismů a biologické procesy se mohou zvrhnout na kvašení.

Kromě toho se při vysokém obsahu vody může docházet k jejímu vytlačování ze spodních vrstev. Tato voda extrahuje látky ze zpracovávaných materiálů a může působit nepříjemné komplikace svým zápachem. Nicméně je možno konstatovat, že lepší je vyšší než nižší vlhkost. Vyšší vlhkost se časem volným odparem spontánně upraví a kompostovací proces začne při dosažení optimální vlhkosti, i když s určitým zpožděním. Nízká vlhkost materiálu se upravuje snadno, ale ani s vysokou vlhkostí nemusí být problémy. Vhodným přídavným

kompostovacím materiálem absorbujícím značné množství vody jsou dřevěné piliny, dřevěná kůra, sláma. Při nedostatku vhodného materiálu je možno použít i recyklu vyrobeného kompostu. Ten má vždy nižší vlhkost než připravovaný substrát.

Vhodná vlhkost se odhadne po smáčknutí hrstě kompostu v dlani. Z příliš mokrého kompostu vymáčkne vodu, suchý kompost se po zmáčknutí a rozevření dlaně rozsypá, vhodně vlhký kompost má houbovitou strukturu, vymáčkne z něj pár kapek vody a po rozevření dlaně drží pohromadě.

Optimální přívod vzduchu

Kompostování je aerobní proces a organizmy, které se ho zúčastní, vyžadují pro svůj metabolismus dostatek kyslíku. Proto je dokonalé provzdušnění materiálu pro průběh kompostování velice důležité. O způsobu, jakým se provzdušňování provádí, bude pojednáno u popisu jednotlivých kompostovacích technologií.

3.4 Technologie kompostování

Z technologického hlediska můžeme technologie pro kompostování rozdělit do následujících kategorií:

- a) *Kompostování na volné ploše*
 - kompostování v pásových hromadách,
 - kompostování v plošných hromadách,
- b) *intenzivní kompostování*
 - polouzavřené systémy, kompostování v boxech nebo žlabech,
 - uzavřené systémy, kompostování v bioreaktorech,
- c) *kompostování ve vacích (Ag Bag kompostování),*
- d) *vermikompostování.*

3.5 Kompostování na volné ploše

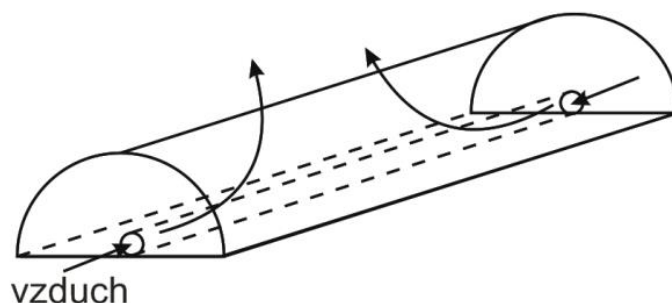
Pásové zakládky mechanicky provzdušňované

Nejjednodušší a stále hojně používané je kompostování v pásových zakládkách. Při tomto způsobu se kompostovaný materiál vrství do lichoběžníkových nebo trojúhelníkových hromad, přičemž šířka zakládky bývá v rozmezí 2-6 m a výška 1,5-3 m. Provzdušňování se zajišťuje tím, že se hromada v pravidelných intervalech překopává. Běžně dostupnou a užívanou mechanizací jsou překopávače kompostu buď nesené, nebo samojízdné. Překopáváním je zajištěna homogenizace materiálu i mechanická destrukce částic, což usnadňuje chemické a biochemické pochody. Provzdušňování při překopávání je málo účinné

a v důsledku toho kompostování trvá dlouho. Tak například první fáze kompostování trvá 1-2 měsíce, druhá fáze kompostování 2-4 měsíce. Kompost je tedy nutno před aplikací do půdy nechat na hromadách alespoň rok. Nedostatečně biologicky degradované sloučeniny představují nebezpečí pro podzemní vody. Z tohoto důvodu se plochy pro kompostování musí budovat s nepropustnou vrstvou a s drenáží a zabránit tak průsaku do spodních vod.

Pásové zakládky s pasivním provzdušňováním

U tohoto způsobu je vzduch do lichoběžníkové nebo trojúhelníkové hromady přiváděn perforovaným potrubím umístěným v každé zakládce (obr. 24). Tímto je eliminována potřeba překopávání kompostu. Vzduch proudí otevřenými konci potrubí materiálem uloženým do zakládky díky komínovému efektu. Komínový efekt vzniká teplotními rozdíly vzduchu v zakládce a okolního vzduchu. Výška zakládky se doporučuje v rozmezí 0,9-1,2 m. Plastové potrubí uložené na dně zakládky je opatřeno řadami otvorů o průměru do 2 cm. Otvory jsou orientovány směrem dolů, aby se minimalizovalo ucpávání a byl umožněn odvod kondenzátu. Před návozem surovin je kolem perforovaného potrubí nebo nad výusti kanálů uložen porézní materiál (štěpka, sláma) a následně kompostovaná surovina. Vzhledem ke skutečnosti, že neprobíhá překopávání kompostovaných surovin, je nutné homogenizovat tyto suroviny při jejich uložení do zakládky.

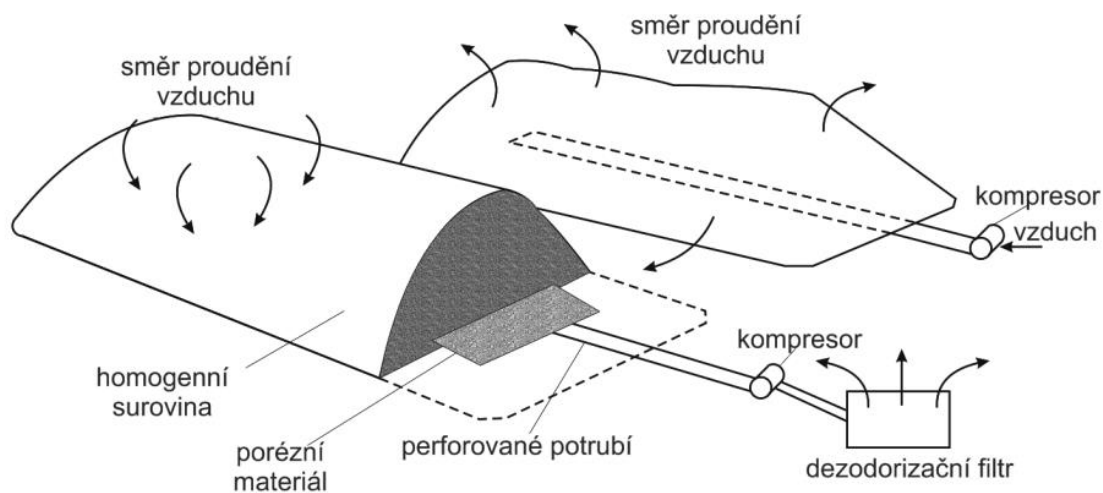


Obrázek 24: Schema funkce pásové zakládky s pasivním provzdušňováním

Pásové zakládky s aktivním provzdušňováním

U tohoto způsobu je vzduch do lichoběžníkové nebo trojúhelníkové hromady nuceně přiváděn perforovaným potrubím umístěným v každé zakládce nebo v kanálech umístěných pod úrovní terénu. Před návozem surovin je kolem perforovaného potrubí nebo nad výstupy kanálů uložen porézní materiál (štěpka, sláma) a následně kompostovaná surovina. Vzhledem ke skutečnosti, že u tohoto systému obvykle nedochází k překopávání kompostovaných surovin, je nutné homogenizovat tyto suroviny při jejich uložení do zakládky. Směr proudění vzduchu závisí na použité technologii, viz obr. 25. Vzduch je do zakládky buď vháněn nebo

nasáván. Výška zakládky se pohybuje v rozmezí 150-245 cm, šířka zakládky se pohybuje v rozmezí 300-490 cm.



Obrázek 25: Schema funkce pásových zakládek s aktivním provzdušňováním

U systémů, kde je vzduch vháněn do pásové zakládky je velmi komplikované kontrolovat průtok vzduchu a tím pádem eliminovat případný zápach. Na kompostárnách, kde je vyžadována kontrola, respektive eliminace zápachu je možno pracovat s většími výškami pásových zakládek nebo změnit systém proudění vzduchu a zařadit dezodorizační filtr.

3.6 Technologie pro intenzivní kompostování

Nevýhody kompostování v pásových zakládkách či na hromadách je možné odstranit využíváním kompostovacích zařízení. V těchto zařízeních probíhá biodegradace v polouzavřených nebo uzavřených prostorách, takže podloží je dokonale chráněné před průsaky kontaminované vody do spodních vod. Provzdušňování se v tomto případě realizuje mechanickým přehazováním nebo přívodem stlačeného vzduchu do objemu kompostované hmoty.

Kompostovací zařízení jsou ve výkladu řazena tak, že postupujeme od systémů podobných kompostovacím hromadám k systémům, které se od této technologie stále více liší. Pro všechny je společné, že intenzifikují zejména první rozkladnou fázi-fázi mineralizace. Intenzifikace provzdušněním vede k dosažení vyšších teplot a tím i ke zkrácení celé fáze. Zařízení jsou investičně náročná, a proto jsou obvykle dimenzována jen na dobu zdržení 1. fáze kompostování. Dozrávání pak proběhne volným ložením kompostu na hromadách.

Během 1. fáze kompostování je kompost zbaven zápachu, změní se jeho vzhled a struktura, dojde k celkové hygienizaci, tedy eliminaci patogenních a hnilobných mikroorganismů a k inaktivaci semen plevelu. Výsledkem je biologicky stabilizovaný kompost, který je možno po zaležení aplikovat do půdy.

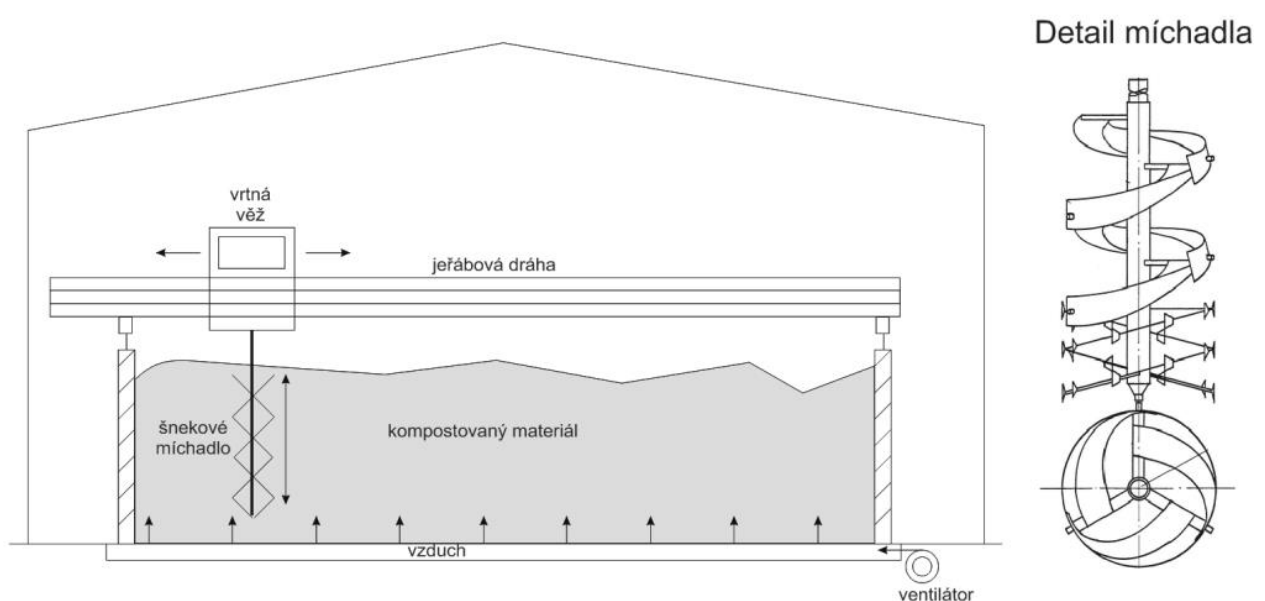
Rozeznáváme dva typy zařízení pro intenzivní kompostování:

- polouzavřená kompostovací zařízení,
- uzavřená kompostovací zařízení, bioreaktory.

Polouzavřená kompostovací zařízení,

Kompostovací systém s vrtnou věží

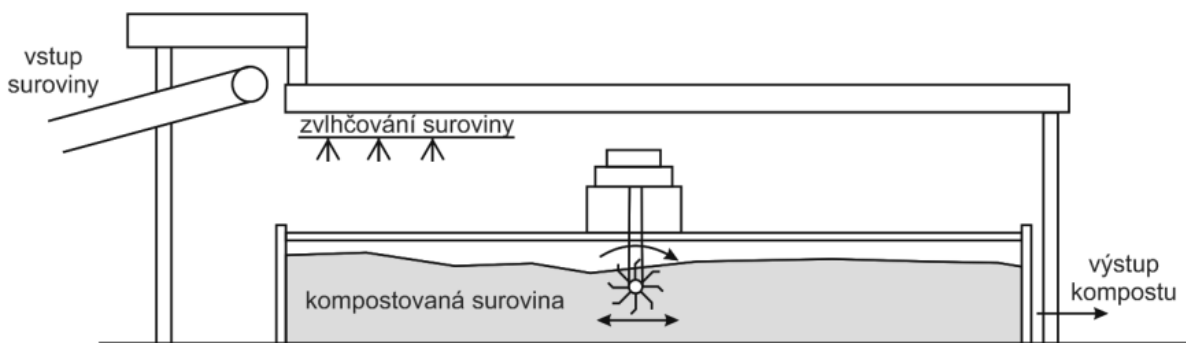
Jedná se o polouzavřené diskontinuální zařízení, zastřešené, vybavené pojezdovou jeřábovou dráhou, na které je umístěna tzv. vrtná věž (obr. 26). Substrát je nahrnut nakladačem do elevátoru a odtud do šnekového dopravníku umístěného rovněž na jeřábové dráze. Z výpustních otvorů, ovládaných hydraulicky, padá substrát do kompostovacích komor. Provzdušňování je zabezpečeno mechanicky míchacím zařízením ve tvaru šnekového míchadla a vzduchem, který je do kompostovaného materiálu vháněn drážkami umístěnými v podlaze každé komory. Pohon míchadla je umístěn ve vrtné věži, umístěné na jeřábovém vedení. Podle navoleného programu se věž pohybuje křížovým pohybem. Optimální vlhkost udržuje zavlažovací zařízení. Po dobu kompostování 3-4 měsíců je substrát uložen v komoře. Po této době se z komory odstraní stěna, komora se tak otevře a mechanickým nakladačem se vyprázdní. Pro roční zpracovávané množství 3000 Mg jsou rozměry zásobníku 64x12 m, výška vrstvy je 2,7 m. Výrobcem je švýcarská firma COMPAG.



Obrázek 26: Kompostovací systém s vrtnou věží a detail šnekového míchadla

Kompostovací žlaby

Jedná se o polouzavřené kontinuální zařízení, kompostovací prostory mají tvar podlouhlých žlabů, zaplněných zpracovávanou surovinou. Nad těmito žlaby se pohybuje překopávací mechanismus umístěný na kolejnicích, které jsou osazeny na stěnách žlabu (obr. 27). Zavážecí zařízení není pojízdné a je umístěno na jednom konci žlabu. Zavážení kompostu se provádí 1 až 2 denně. Nad žlabem se pohybuje mobilní provzdušňovací a homogenizační zařízení. Toto zařízení má tvar rotačního válce opatřeného na obvodě hroty. Obě tato zařízení kompost překopávají a tím materiál mechanicky provzdušňují, homogenizují a posunují směrem k opačnému konci žlabů. Nad žlabem může být umístěno zařízení pro zvlhčování kompostu. Doba zdržení biomasy ve žlabu je přibližně 4 týdny. Za tuto dobu dojde k biochemické degradaci, podporované mechanickou destrukcí materiálu. Zařízení zpracovávající 6-10 000 Mg za rok má délku 107 m a šířku 15,8 m.



Obrázek 27: Kompostovací žlaby s překopávacím zařízením

Bioreaktory

Bioreaktory se od předchozích polouzavřených systémů liší ve dvou základních principech.

- jde o zcela uzavřené systémy kontejnerového typu ve tvaru kvádrů nebo válců, které jsou často tepelně izolované,
- přívod kyslíku se realizuje provzdušňováním kompostované vrstvy od spodu.

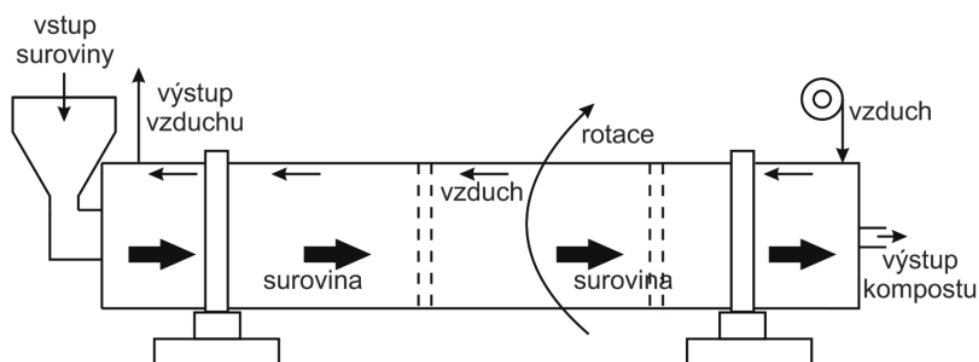
Tyto systémy mohou pracovat buď v režimu diskontinuálním (do bioreaktoru se vhodným mobilním prostředkem naplní kompostovaný materiál, který je provzdušňován) nebo v režimu kontinuálním (kompostovaný materiál se reaktorem posunuje, část materiálu kontinuálně opouští reaktor na výstupním konci a odpovídající část materiálu na vstupním konci se naváží).

Díky intenzivnímu provzdušňování se 1. fáze kompostování zkrátí na několik dnů, podle kompostovaného materiálu.

Rotační bioreaktory

Tento kontinuálně pracující systém používá horizontálně uložený pomalu se otáčející buben k promíchání, zmenšení velikosti, prosévání a provzdušnění kompostovaného materiálu. Je nutno uvést, že rotační bioreaktory jsou obvykle používány ve spojení s jinou metodou kompostování. Rotační bioreaktor (obr. 28) je uložen na ložiscích a poháněn elektromechanickým pohonem. Rychlost otáčení bioreaktoru a sklon osy rotace určuje dobu zdržení kompostovaného materiálu. Vzduch přiváděný do bioreaktoru se pohybuje opačným směrem než kompostovaný materiál a na výstupu z bioreaktoru je využíván na přehřev vstupujícího materiálu. Vzduch je následně odváděn na biofiltr. Kompostovací proces je nastartován velmi rychle a dobře odbouratelné organické látky jsou rozloženy v řádech dnů. Další rozklad kompostovaného materiálu probíhá v jiných technologiích kompostování. V některých komerčně provozovaných systémech je doba zdržení v bioreaktoru menší než jeden den. V tomto případě, slouží rotační bioreaktor spíše jako směšovací zařízení.

Rotační bioreaktor může být proveden jako otevřený nebo jako dělený. Otevřeným bioreaktorem rozumíme stav, kdy veškerý kompostovaný materiál kontinuálně prochází bioreaktorem od vstupu k výstupu. Děleným bioreaktorem rozumíme stav, kdy je buben rozdělen na komory dvěma nebo více přepážkami. Každou komoru je možno uzavřít a uchovat v ní kompostovaný materiál. Na konci každého dne provozu, jsou postupně otevřeny přepážky, čímž dojde k posuvu kompostovaného materiálu v bioreaktoru.

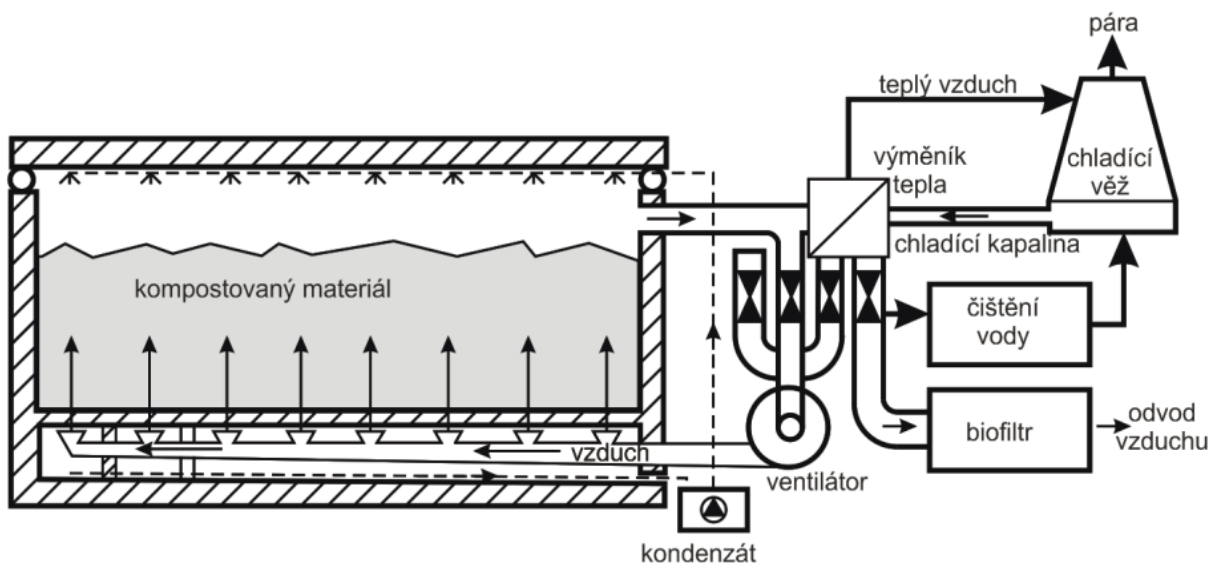


Obrázek 28: Rotační bioreaktor

Kompostovací boxy

Tento diskontinuálně pracující systém používá obdélníkové kovové nebo plastové kompostovací boxy (obr. 29). Někdy mohou být tyto boxy přizpůsobené pro přemísťování manipulační technikou. Tomu také odpovídá velikost boxů. Menší s manipulací jsou asi do 10 m³. Po naplnění se tyto boxy přemístí do obslužného prostoru a zde se napojí na zdroj

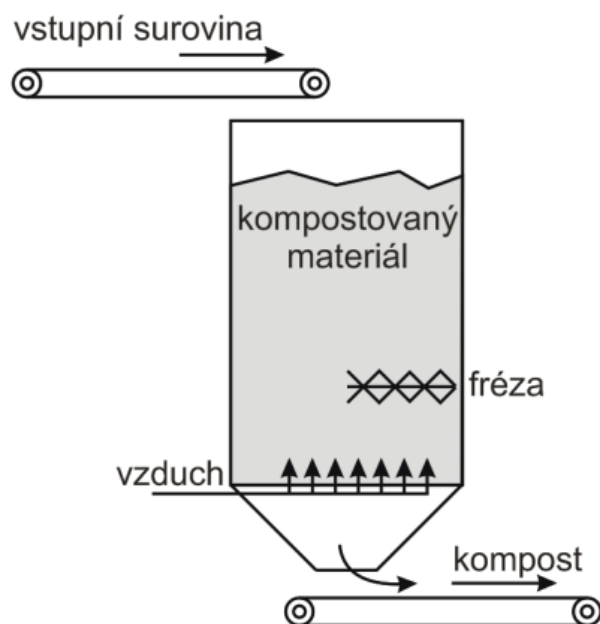
stlačeného vzduchu. Po proběhnutí teplotního maxima se box odpojí a materiál se vyloží na dozrávací plochu. U větších boxů se počítá se stálým uložením a s plněním mechanickou lžicí. Délka stabilně umístěných bioreaktorů může být až 50 m. Tento systém je konstrukčně zdánlivě velmi jednoduchý, ale vyžaduje speciální mechanizaci pro manipulaci. Rovněž prostorové nároky jsou značné, musíme počítat s pohybem boxů nebo mechanizace. Nevýhodou tohoto typu zařízení je, že materiál uvnitř boxu nevykonává žádný pohyb. Vzduch přiváděný dnem boxů může vytvořit zkratové kanály, kterými po celou dobu neefektivně uniká část vzduchu.



Obrázek 29: Kompostovací boxy

Věžové bioreaktory

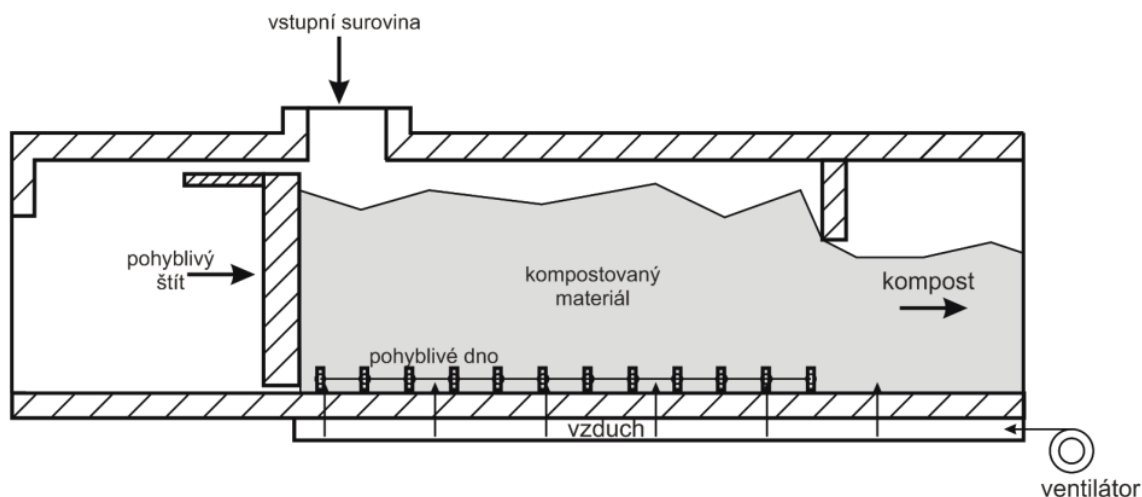
Na obrázku 30 je znázorněn věžový bioreaktor. Tento typ reaktoru sestává z válcové nádoby o průměru 8-10 m a výšky přibližně 7 m. Na dně nádoby je vyprazdňovací a provzdušňovací mechanismus. Vyprazdňovací mechanismus je rotující fréza, otáčející se kolem centrálního otvoru. Tato fréza dopravuje materiál k otvoru, kudy vypadává ven. Bioreaktor je plněn dopravním pásem shora. Zařízení má tedy klasický kontinuální chod a kompostující materiál klesá v průběhu času postupně do nižších vrstev reaktoru. Základní rozdíl oproti kontejnerovým reaktorům spočívá v teplotním průběhu. Zatím co u vsádkového reaktoru celý objem vsádky má v podstatě stejnou teplotu (odhlédneme-li od tepelných ztrát u okrajových vrstev) a stejný stupeň rozkladu, najdeme v horizontálních vrstvách kontinuálního reaktoru jak různou teplotu, tak různý stupeň rozkladu, odpovídající době zdržení příslušné vrstvy. Nevýhodou tohoto zařízení je poměrně komplikovaný mechanismus vyprazdňovacího zařízení. Tento mechanismus je lehký zranitelný a jeho oprava je značně náročná, zpravidla je spojena s ručním vyprázdněním reaktoru.



Obrázek 30: Věžový bioreaktor

Tunelové bioreaktory

Tento typ reaktoru je rovněž provozován v kontinuálním režimu. Reaktory mají obdobný princip jako věžové reaktory, avšak konstruktéři byli vedeni snahou vyhnout se problémům spojených s údržbou věžových reaktorů. Průřez reaktoru je obdélníkový, dno je opatřeno systémem kanálů pro rozvod vzduchu. Posun materiálu reaktorem obstarává pohyblivé dno nebo čelní pohyblivý štít (obrázek 31), oboje poháněné hydraulikou. Posun dna nebo štítu asi o 1/14 délky reaktoru posune materiál v reaktoru o příslušnou délku dopředu. Tím se vytvoří prostor pro novou závažku. Malé kovové reaktory mají objem 10-50 m³, větší jsou betonové a mají objem do 500 m³. Úvahy o produkci kompostu jsou obdobné jako u věžových reaktorů, tzn. při střední době zdržení kompostu v reaktoru 14 dní je denní výrobní kapacita 1/14 objemu reaktoru. Betonové reaktory je možno spojovat do baterií po dvou, které mají společnou strojovnu. Tyto reaktory mají řadu výhod. Především je provzdušnění podstatně rovnoměrnější než u předchozích zařízení a rovněž se minimalizuje nebezpečí zkratových kanálů, kterými by neefektivně přednostně proudil vzduch. Důvodů je několik. Především je vrstva relativně nízká a denně se pohybuje a tím i stlačuje. Tím jsou kanály narušovány. Navíc se posunem dostane nad kanály každý den jiný povrch spodní vrstvy kompostu. Další výhodou je, že veškeré mechanické části jsou snadno přístupné. To umožňuje snadnou údržbu.



Obrázek 31: Tunelový bioreaktor

3.7 Vermikompostování

Vermikompostování lze popsat jako dekompoziční proces, při kterém dochází k oxidaci a stabilizaci organických materiálů spolupůsobením žížal a mikroorganismů. Žížaly požrou kompostovaný materiál a ten projde jejich trávicím traktem, kde jsou přeměněny organické látky v exkrementy. Kompost získaný pomocí žížal dosahuje vyššího stupně přeměny organické hmoty než běžný kompost. Vermikompost taktéž biohumus má po vysušení vzhled jemné lesní půdy. Vermikompost obsahuje vysoký podíl přírodních enzymů, huminových kyselin a růstových regulátorů např. auxinů, giberelinů, cytokininů a dalších.

Technologie vermikompostování

Před samotným začátkem s vermikompostováním je nutné vybrat vhodné stanoviště. Zvolenou plochu je vhodné zpevnit a vyspádovat kvůli odvodu průsakové vody, která se používá při zavlažování (kropení) materiálu v období kultivace. Zpevnění terénu pod kultivační hromadou zabraňuje vniknutí predátorů, především krtků a usnadňuje pohyb mechanizace. Pro zpracování 1 Mg suroviny je zapotřebí 1-2 m² plochy (při vrstvení do výše 60 cm).

3.8 Prosévací a separační zařízení

Prosévací zařízení slouží pro úpravu kompostu s vyšším podílem nerozložitelných částic. Kompostárnu je vhodné vybavit prosévacím zařízením s odpovídajícím výkonem, které umožní třídit hotový kompost na dvě (i více) frakcí určených k expedici nebo dalšímu zpracování v kompostovacím procesu. Mezi základní znaky, podle kterých lze prosévací zařízení rozdělovat, patří hlavně:

- specifikace surovin, které se budou prosévat (velikost částic, objemová hmotnost, vlhkost),
- prostorové nároky (rozměry prosévacího zařízení a navazujících dopravníků),
- technické parametry prosévacích zařízení (velikost otvorů, povrch prosévací plochy, obvodová rychlost bubnu).

K prosévání kompostu se využívají zařízení, která lze rozdělit do následujících skupin:

Vibrační třídíče s rovinným sítem

Principem činnosti je přerušovaný posun materiálu ve směru spádnice po šikmo uloženém rovinném sítu. Výhodou je konstrukční jednoduchost, vysoká životnost a malá energetická náročnost.

Rotační třídíče s válcovým sítem

Principem činnosti je plynulý posun materiálu vnitřním povrchem rotujícího válcového síta. Hlavní výhodou válcových sít je jejich vysoká výkonnost.

Rotační rošty

Jsou tvořeny soustavou horizontálně uložených hřidelí, na kterých jsou v pravidelných roztečích umístěny ocelové nebo pryžové elementy. Hlavní výhodou rotačních roštů je jejich vysoká výkonnost, která je dána dobrou průchodností materiálu přes samočisticí elementy.

Třídící a drticí lopaty

Speciální prosévací zařízení, kterými lze nahradit lopatu u čelních nakladačů. S jejich pomocí je možno současně promíchávat a drtit zpracovávané suroviny, prosévat hotový kompost.

Podle požadavku budoucího uživatele na vlastnosti finálního produktu se používají síta s různými velikostmi ok (6, 12, 20, 40 mm). Pro použití vhodného typu síta (velikosti ok) je rozhodující vedle požadavku zákazníka na jemnost prosátého kompostu i stupeň biodegradace kompostu. Je známo, že se zvyšujícím se stupněm biodegradace stoupá zastoupení jemnějších frakcí v kompostu. Podle stupně biodegradace je možno volit následující typy sít (velikosti ok).

- čerstvý kompost, 0-40/50 mm
- vyzrálý kompost, 0-15/20 mm
- kompost pro výrobu substrátu, 0-10 mm

Na řadě kompostáren se proto po předběžném zetlení nejprve jednou nahrubo prosévá. Prosetá část materiálu se potom prodává jako čerstvý kompost a druhá část se vrací do kompostovacího procesu. Běžnější je však prosévání vyzrálého kompostu, který je možno ihned expedovat, či uskladnit pro další zpracování ve stabilizované formě.

Při jednoduchém prosévání vzniknou dvě frakce – podsítná (finální produkt) a nadsítná, u níž je nutné rozhodnout o dalším využití. Hlavním kritériem pro rozhodnutí je množství biologicky nerozložitelných příměsí.

Pokud nadsítná frakce obsahuje vysoký podíl biologicky nerozložitelných příměsí, musí neprosetý materiál podstoupit další třídění-separaci. Separální zařízení pracující na různých principech popsaných v kapitole 1 se používají zejména při kompostování bioodpadu z odděleného sběru biologicky rozložitelných složek komunálního odpadu. Na separátorech je oddělován kovový odpad, lehké příměsi (plasty), sklo, kameny od biologicky zpracovatelných surovin. Vzhledem k předpokládanému růstu množství tohoto druhu odpadu se dá očekávat nárůst počtu těchto technologií. Separace je prováděna zejména z důvodu možného výskytu příměsí, které se musí oddělit buď před, nebo po procesu kompostování.

4. ČISTÍRNÝ ODPADNÍCH VOD

Základním právním nástrojem v Evropské unii řešícím problematiku čištění odpadních vod je směrnice Rady o čištění městských odpadních vod. Směrnice má za cíl zajistit ochranu povrchových vod před znečišťováním způsobeným vypouštěním komunálních odpadních vod a biologicky odbouratelných průmyslových odpadních vod.

Základním právním nástrojem pro ochranu vod v české republice je Zákon o vodách 254/2001 Sb., ve znění pozdějších předpisů. V § 38 tohoto zákona je stanoveno, že ten, kdo vypouští odpadní vody do vod povrchových, nebo podzemních je povinen zajišťovat jejich zneškodňování v souladu s podmínkami stanovenými v povolení k jejich vypouštění. V tomto povolení stanoví vodoprávní orgán povinnosti a podmínky, za nichž je nakládání s vodami povoleno.

Dalšími vybranými právními předpisy jsou:

Nařízení vlády č. 61/2003 Sb., o ukazatelích a hodnotách přípustného znečištění povrchových vod a odpadních vod, náležitostech povolení k vypouštění odpadních vod do vod povrchových a do kanalizací a o citlivých oblastech, ve znění nařízení vlády č. 229/2007 Sb. a nařízení vlády č. 23/2011 Sb. Toto nařízení vlády č. 61/2003 Sb., mimo jiné stanovuje emisní limity a další ukazatele, které je nutno respektovat při návrhu a provozování čistíren odpadních vod. Emisní standardy sledovaných ukazatelů znečištění na odtoku z ČOV po procesu čištění a požadovaná účinnost jejich odstranění jsou uvedeny v tabulce.

Nařízení vlády č. 419/2010 Sb., o ukazatelích a hodnotách přípustného znečištění odpadních vod a náležitostech povolení k vypouštění odpadních vod do vod podzemních.

Zákon č. 274/2001 Sb., o vodovodech a kanalizacích pro veřejnou potřebu a o změně některých zákonů (zákon o vodovodech a kanalizacích), ve znění zákona č. 320/2002 Sb., zákona č. 274/2003 Sb., zákona č. 20/2004 Sb., zákona č. 167/2004 Sb., zákona č. 127/2005 Sb., zákona č. 76/2006 Sb., zákona č. 186/2006 Sb., zákona č. 222/2006 Sb. a zákona č. 281/2009 Sb.

Kompletní seznam legislativy vztahující se k problematice vodního hospodářství je možno nalézt na portálu Ministerstva životního prostředí.

Státní správu v oblasti nakládání s odpadními vodami vykonávají podle zákona vodoprávní úřady a Česká inspekce životního prostředí. Vodoprávními úřady jsou, obecní úřady, újezdní úřady na území vojenských újezdů, obecní úřady obcí s rozšířenou působností, krajské úřady, ministerstva jako ústřední vodoprávní úřad.

V průmyslu je ustavena ve vodním hospodářství funkce tzv. vodohospodáře a to na všech úrovních od závodu až po rezort.

Ke kontrole dodržování zákonných ustanovení ve vodním hospodářství slouží vrchní vodoprávní dozor. Tím je Ministerstvo zemědělství a Ministerstvo životního prostředí, které dozírají v rámci vrchního vodoprávního dozoru, jak vodoprávní úřady a Česká inspekce životního prostředí provádějí ustanovení vodního zákona a předpisů podle něho vydaných.

Tabulka 14: Emisní standardy a minimální povolená účinnost čištění

Kategorie ČOV (EO)	CHSK _{Cr}			BSK ₅			NL		
	p	m	účinnost	p	m	účinnost	p	m	účinnost
	[mg/l]	[mg/l]	[%]	[mg/l]	[mg/l]	[%]	[mg/l]	[mg/l]	[%]
< 500	150	220	70	40	80	80	50	80	
500 – 2000	125	180	70	30	60	80	40	70	
2001 – 10 000	120	170	75	25	50	85	30	60	
10 001 – 100 000	90	130	75	20	40	85	25	50	
> 100 000	75	125	75	15	30	85	20	40	
Kategorie ČOV (EO)	N-NH ₄ ⁺			N _{celk}			P _{celk}		
	průměr	m	účinnost	průměr	m	účinnost	průměr	m	účinnost
	[mg/l]	[mg/l]	[%]	[mg/l]	[mg/l]	[%]	[mg/l]	[mg/l]	[%]
< 500	-	-		-	-	-	-	-	-
500 – 2000	20	40	50	-	-	-	-	-	-
2001 – 10 000	15	30	60	-	-	-	3	8	70
10 001 – 100 000	-	-	-	15	30	70	2	6	80
> 100 000	-	-	-	10	20	70	1	3	80

p - uváděné přípustné koncentrace

m - uváděné maximální koncentrace, jsou nepřekročitelné

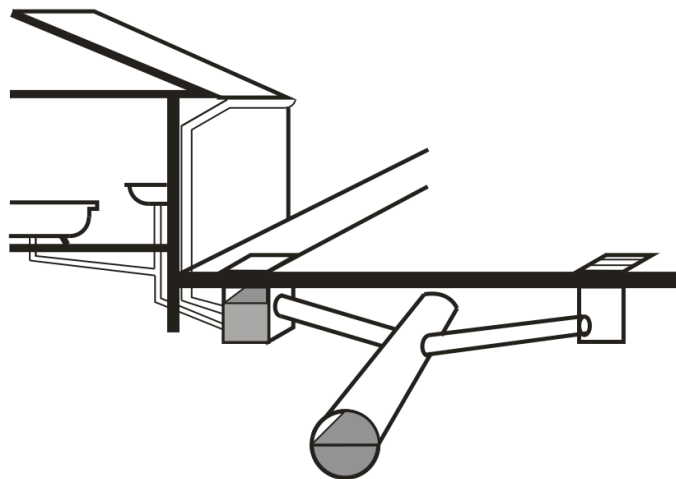
EO - ekvivalentní obyvatel, definovaný produkcí znečištění 60 g BSK₅ za den

4.1 Odvádění odpadních vod

Pro odvádění odpadních vod jsou používány trubní stoky. Účelem stokových sítí a kanalizačních přípojek je spolehlivé, hospodárné a zdravotně neškodné odvádění odpadních vod z určeného území nebo připojené nemovitosti do zařízení na čištění odpadních vod a do recipientu. Stokové sítě dělíme na dvě základní soustavy, jednotnou a oddílnou.

Jednotná stoková soustava

Odvádí srážkové vody a splaškové odpadní vody jednou stokovou soustavou společně, obrázek 32.

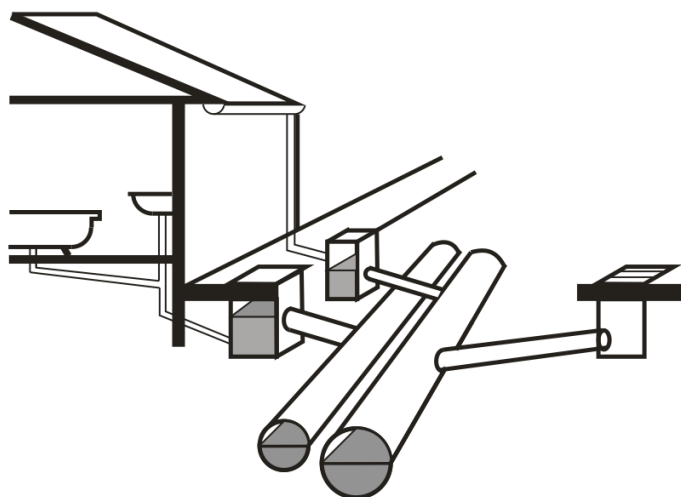


Obrázek 32: Jednotná stoková soustava

Jednotná stoková soustava klade vyšší nároky na dimenzování a skladbu jednotlivých objektů na síti i v technologii čistírny odpadních vod, čímž však zvyšuje bezpečnost ochrany recipientu před znečištěním. Nevýhodou bývá zředování komunálních odpadních vodou při srážkové události, což může mít negativní dopad na kontinuální procesy čištění odpadních vod. V případě srážkových událostí může také docházet k hydraulickému přetížení stokové sítě a ČOV.

Oddílná stoková soustava

Odvádí odděleně srážkové vody a splaškové odpadní vody, obrázek 33. Splaškové odpadní vody jsou přiváděny na ČOV k dalšímu zpracování. Srážkové vody, které mohou v první fázi dešťové události obsahovat vysoké koncentrace znečišťujících látek, jsou bez čištění, nebo pouze po mechanickém čištění odváděny do recipientu.



Obrázek 33: Oddílná stoková soustava

Rozhodujícím kritériem pro řešení stokové soustavy by však jednoznačně měla být její schopnost přivádět do ČOV odpadní vody vhodné pro čistící proces. K jakékoli stokové soustavě totiž nelze vybudovat a úspěšně provozovat ČOV. Máme-li k dispozici nekvalitní stokovou soustavu s velkým množstvím balastních vod, nelze úspěšně provozovat vysoce účinné intenzivní způsoby čištění. Stokovým soustavám je nutno věnovat pozornost, protože ve většině případů převyšují investici do čistící technologie.

Určení množství splaškových odpadních vod

Při určení množství splaškových odpadních vod u nových ČOV nebo u rekonstrukcí, kde dochází k významné změně na kanalizační síti (např. připojení dalších obyvatel) se vychází z fakturované pitné vody odebírané obyvatelstvem. Většina této vody po použití odtéká do kanalizace.

Výše popsaným způsobem získáme hodnotu specifického množství splaškových odpadních vod q_{spec} (tj. množství vody produkované jedním obyvatelem za den). Hodnota q_{spec} se pohybuje podle lokality v rozpětí 80 – 200 dm³ na osobu a den, v praxi se používá mírně nadhodnocená hodnota $q_{\text{spec}} = 150$ dm³ na osobu a den. Zde je však nutné upozornit, že se vzrůstající cenou vodného klesá i spotřeba vody, tabulka 15.

Tabulka 15: Specifické množství vody fakturované pro domácnost

Rok	1989	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
dm ³ na osobu a den	171,0	97,5	98,5	94,2	92,5	89,5	88,6	88,1	87,2

Určení množství průmyslových odpadních vod

Při určení množství průmyslových odpadních vod se obecně vychází z projektových podkladů, ze kterých by měla být patrná potřeba vody pro technologické účely, v případě stávající technologie je možno využít informace o skutečné spotřebě procesní vody. K tomuto množství se následně připočte produkce odpadní vody z dalších podpůrných provozů a odpadní voda vyprodukovaná zaměstnanci. Velmi často je produkce průmyslové odpadní vody vztahovaná na počet výrobků, případně na hmotnostní jednotku vyrobených výrobků.

Určení množství srážkových odpadních vod

Určení množství srážkových vod patří mezi nejsložitější úkoly při návrhu městského odvodnění. Dnes jsou běžně využívány speciální výpočtové metody, které mohou zpracovávat údaje o srážkové aktivitě v řešené oblasti. S využitím těchto informací a mapových podkladů lze v zájmové oblasti určit druhy ploch (propustné a nepropustné) a pomocí modelů vyšetřit množství srážkové vody, která bude odváděna kanalizační soustavou.

4.2 Odpadní vody a jejich znečištění

Definice odpadních vod

Z pohledu legislativy je odpadní vodou voda použitá v obytných, průmyslových, zemědělských, zdravotnických a jiných stavbách, zařízeních nebo dopravních prostředcích, pokud má po použití změněnou jakost (složení nebo teplotu), jakož i jiná voda z těchto staveb, zařízení nebo dopravních prostředků odtékající, pokud může ohrozit jakost povrchových nebo podzemních vod. Odpadní vody jsou i průsakové vody z odkališť, s výjimkou vod, které jsou zpětně využívány pro vlastní potřebu organizace, a vod, které odtékají do vod důlních, a dále jsou odpadními vodami průsakové vody ze skládek odpadu.

Rozdělení odpadních vod

Odpadní vody bývají mnoha autory rozdělovány podle různých parametrů a vlastností do mnoha kategorií. Nařízení vlády však definuje dva základní typy odpadních vod.

- městské odpadní vody,
- průmyslové odpadní vody.

Městské odpadní vody

Jako městské odpadní vody jsou definovány odpadní vody vypouštěné z domácností nebo služeb, vznikající převážně jako produkt lidského metabolismu a činností v domácnostech (splašky), popřípadě jejich směs s průmyslovými odpadními vodami nebo se srážkovými vodami. Do této kategorie spadají i odpadní vody z obecní, resp. městské vybavenosti (školy, úřady, restaurace a hotely apod.), které mají obdobný charakter jako odpadní vody z domácností.

Odpadní vody průmyslové

Jedná se o odpadní vody, které mohou mít, v závislosti na druhu výroby, různou kvalitu a obsahovat specifickou kombinaci znečišťujících látek, tab. 16.

Tabulka 16: Převažující znečišťující látky v odpadních vodách z různých průmyslových odvětví

Odvětví	Znečišťující látky
Výroba železa a oceli	BSK, CHSK, oleje, těžké kovy, kyseliny, fenoly a kyanidy
Textilní a kožedělný průmysl	BSK, nerozpuštěné látky, sulfáty, chrom
Papírenský průmysl	BSK, CHSK, chlorované organické sloučeniny
Petrochemický průmysl	BSK, CHSK, minerální oleje, fenoly, chrom
Chemický průmysl	CHSK, rozpuštěné látky, organické sloučeniny, těžké kovy, kyanid
Těžební průmysl	rozpuštěné látky, kovy, kyseliny, soli
Potravinářský průmysl	BSK, CHSK, rozpuštěné látky, tuky, nutrienty,

Průmyslové odpadní vody by měly být odděleny a čištěny na samostatných průmyslových ČOV. Bohužel v minulosti byly takové vody, často s obsahem toxických látek (např. těžké kovy, pesticidy apod.), běžně vypouštěny do kanalizace, a to často bez ohledu na možnosti koncové ČOV. V současnosti má většina průmyslových podniků vlastní čistírny odpadních vod. Další možností je čištění průmyslových odpadních vod na komunálních čistírnách odpadních vod jako součást městských odpadních vod. Před vypuštěním průmyslových odpadních vod do veřejné kanalizace musejí být tyto vody upraveny tak, aby vyhovovaly provoznímu řádu kanalizace, respektive byly čistitelné technologií komunální ČOV.

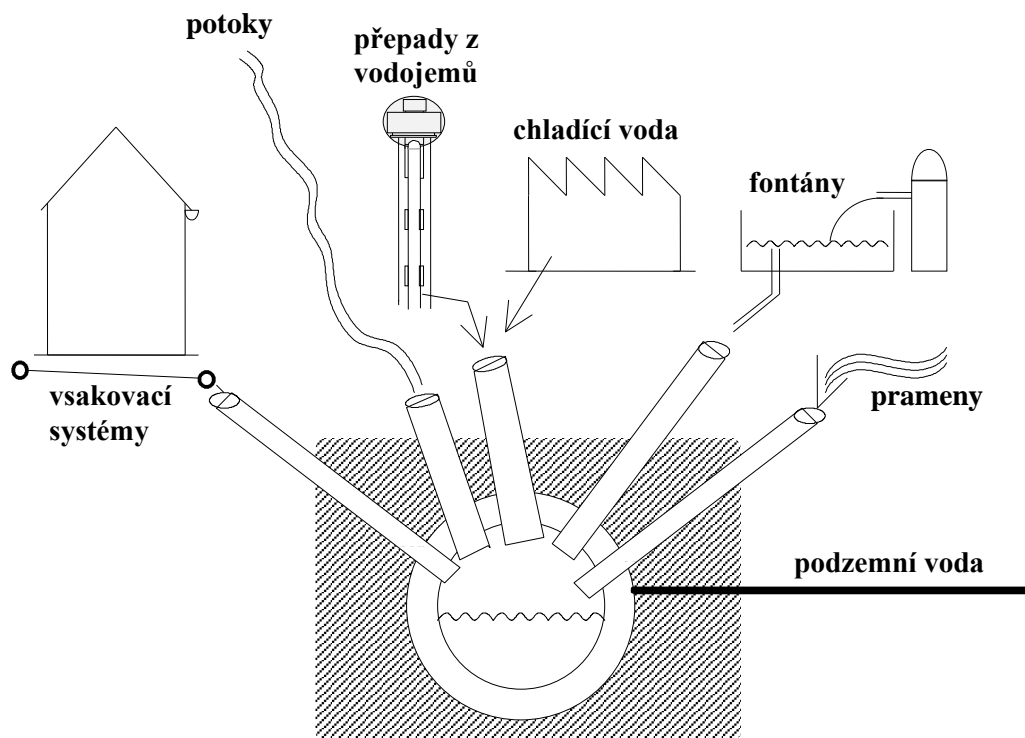
Srážkové vody

Jedná se o vody často odváděné z intravilánu obce nebo z výrobního závodu, komunikací či jiných ploch veřejnou kanalizací. Z pohledu zákona tyto vody nejsou vodami odpadními, byť jsou často odváděny jednotnou kanalizační soustavou na čistírny odpadních vod. Množství a druh znečišťujících látek obsažených ve srážkových vodách závisí na ročním období (posypové materiály v zimním období), materiálu, na který srážkové vody dopadají, kvalitě atmosféry. Znečištění dešťových vod, zejména nerozpustnými látkami, je pak srovnatelné s komunálními odpadními vodami.

Balastní vody

Jedná se o vody, které se dostávají do kanalizační soustavy netěsnostmi nebo nekázní, obrázek 34. Bohužel často se jedná i o povrchové toky zaústěné do kanalizačního systému (v minulosti se běžně vodoteče zaústěovaly do kanalizace bez ohledu na to, že se jedná,

z pohledu látkového znečištění, o neznečištěnou vodu). Balastní vody představují pro bezproblémovou funkci ČOV riziko a to zejména z důvodu, že ředí splašky a ochlazuje odpadní vodu. Balastní vody bohužel představují značné procento celkových odpadních vod, což platí hlavně u starších systémů stavěných často s nedostatečnou projektovou dokumentací.



Obrázek 34: Zdroje balastních vod

Znečištění odpadních vod

Znečištění vody je komplexním pojmem, který lze definovat jako změnu fyzikálních, chemických, biologických a estetických vlastností vody v té míře, že ji nelze použít pro daný účel. Znečišťující látky rozdělujeme na:

a) *rozpuštěné*

- organické

- biologicky rozložitelné (cukry, tuky, bílkoviny)

- biologicky nerozložitelné (azobarviva)

- anorganické (těžké kovy, sulfidy)

b) *nerozpuštěné*, které mohou být usaditelné či neusaditelné (koloidní, plovoucí).

- *organické*

- biologicky rozložitelné
- biologicky nerozložitelné
- usaditelné
- neusaditelné
- koloidní
- plovoucí
- *anorganické*
 - usaditelné (štěrk, písek)
 - neusaditelné (brusný prach)

Definice ekvivalentního obyvatele

Ekvivalentní obyvatel (EO), je zásadním ukazatelem při návrhu čistíren odpadních vod. Ekvivalentní obyvatel je definován produkcí znečišťování 60 g BSK₅ (biochemická spotřeba kyslíku) za den. V případech, kdy je známé množství produkovaného znečištění, je tedy EO počítán vydělením celkové produkce BSK₅ za den hodnotou 60 g BSK₅. Obdobně lze vyjádřit také další sledované ukazatele. Tabulka 17 uvádí průměrné denní množství znečišťujících látek přiváděných na ČOV vyjádřeno v gramech na 1 EO, hodnoty vycházejí z ČSN 75 6401.

Tabulka 17: Průměrné denní koncentrace znečišťujících látek v odpadních vodách

Ukazatel	g na 1 EO
BSK ₅	60
CHSK _{Cr}	120
Nerozpuštěné látky	55
Celkový dusík (N-NH ₄ , N-NO ₃ , N-NO ₂ , N _{org})	11
Celkový fosfor	2,5

Typické složení znečišťujících látek v městských odpadních vodách je uvedeno v tab. 18. Hodnoty jsou uvedeny v g na 1 EO.

Tabulka 18: Denní produkce znečištění v odpadní vodě vztažená na 1 EO

Ukazatel	[g]
BSK ₅	60 – 90
z toho nerozpuštěné látky	30 – 40
- usaditelné	20 – 30
- neusaditelné	10 – 20
z toho rozpuštěné látky	30 – 50
CHSK _{Cr}	110 – 180
C _{org}	35 – 70