



VŠB TECHNICKÁ
UNIVERZITA
OSTRAVA

Biovodík z temné fermentace produkovaný v bioplynových a biometanových stanicích?

Jiří Rusín

Výzkumné energetické centrum, CEET, VŠB – Technická univerzita Ostrava

28th edition of the annual INTERNATIONAL ENERGY AND ENVIRONMENT CONFERENCE (IEEC)
8. – 10. September 2025, Sepetná hotel, Ostravice, Czech Republic

Zemědělská bioplynová stanice (BPS)





Kogenerační zpracování bioplynu na elektrickou a tepelnou energii



Odpadová bioplynová stanice



Upgrading bioplynu na biomethan



Aktuální stav využívání bioplynu a biometanu ve světě

Mezinárodní energetická agentura (IEA):

- Celosvětová produkce **bioplynu** by mohla uspokojit téměř **20 %** celosvětové poptávky po plynu, pokud by byl plně využit jeho udržitelný potenciál.

Světová bioplynová asociace (WBA):

- Na světě je v provozu nepočitatelné množství bioplynových stanic,
- jen v Německu je jich přibližně **10 000**.
- Na světě je více než **1000** zařízení pro upgrading **bioplynu** na **biometan**,
- z toho přibližně **300** stanic je v Německu.
- Odhaduje se, že 20-30 % potenciálu CH_4 je ve stanicích stále ztráceno emisemi do ovzduší.

Stav využívání bioplynu v ČR

(prosinec 2024)

Počet bioplynových stanic

Instalovaný výkon

540

379

MW

Výroba elektrické energie ze všech zdrojů (roční)

68,70

TWh

Výroba el. energie ze všech OZE

11,67

TWh

Výroba el. energie z bioplynu

2,56

TWh

Podíl OZE na výrobě el. energie

17,0

%

Podíl bioplynu na výrobě el. energie

3,7

%

Podíl bioplynu na OZE

22

%

Počet biometanových stanic

Výroba biomethanu (roční)

11

30,17

GWh



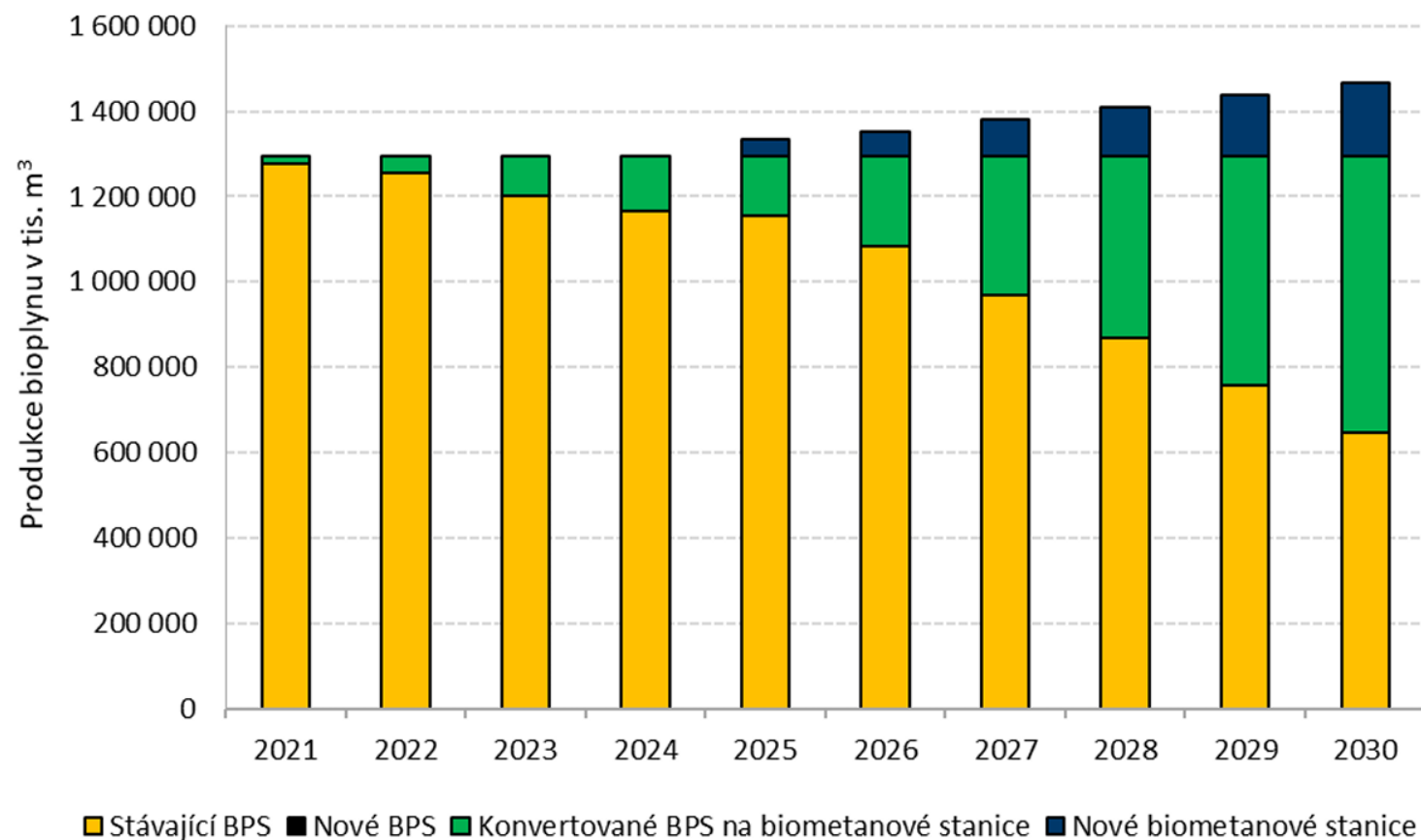
Zdroj:

Energetický regulační úřad, ČTVRTLETNÍ ZPRÁVA O PROVOZU ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVY ČESKÉ REPUBLIKY, IV. ČTVRTLETÍ 2024.

Česká bioplynová asociace z.s.: Hodnocení výroby elektřiny z bioplynu v roce 2024. <https://www.czba.cz/aktuality/hodnoceni-vyroby-elektriny-z-bioplynu-v-roce-2024.html>

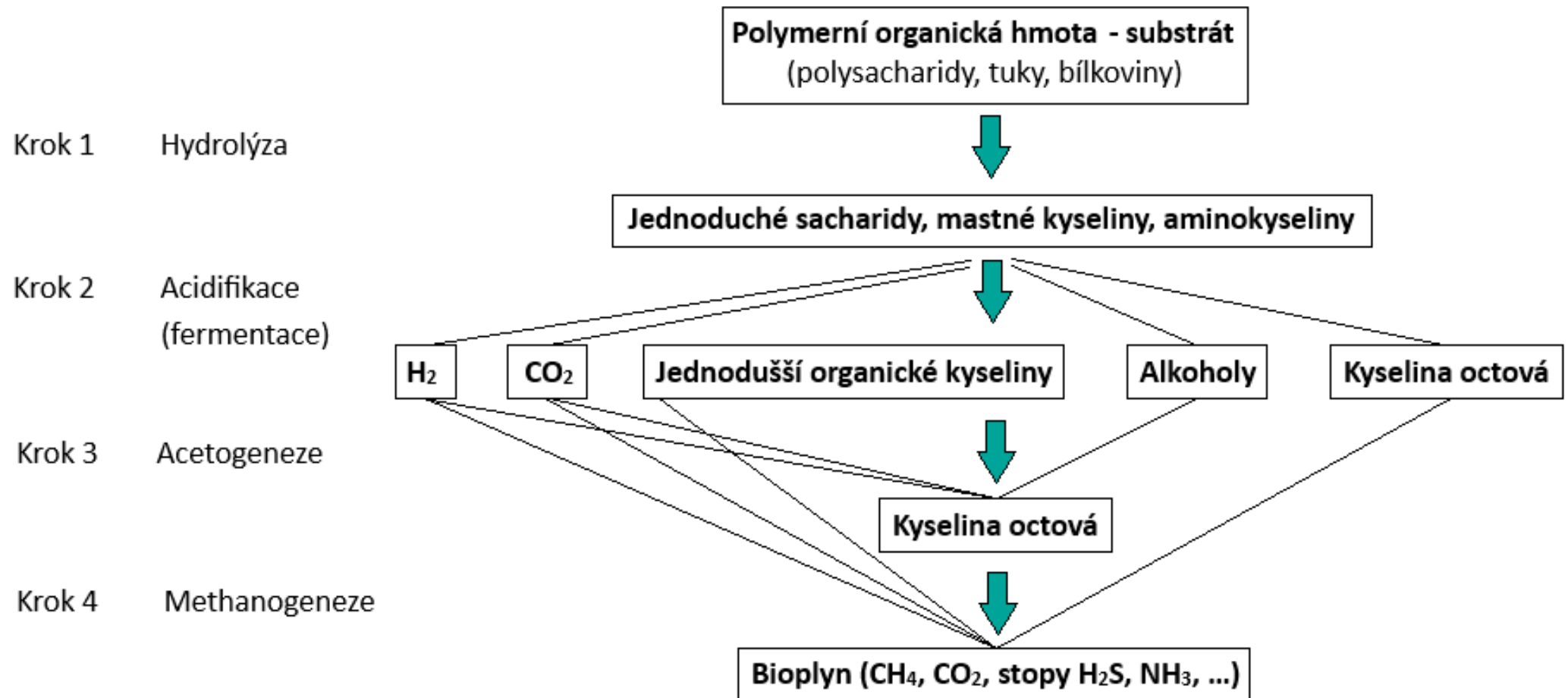
- ✓ **Akční plán podpory rozvoje využívání biometanu**, Ministerstvo životního prostředí ve spolupráci s Ministerstvem průmyslu a obchodu, Ministerstvem zemědělství a Ministerstvem dopravy, červenec 2025.
- ✓ **Vnitrostátní plán České republiky v oblasti energetiky a klimatu**, Ministerstvo průmyslu a obchodu, prosinec 2024.

Předpokládaná produkce bioplynu v rozdělení na stávající, konvertované a nové stanice



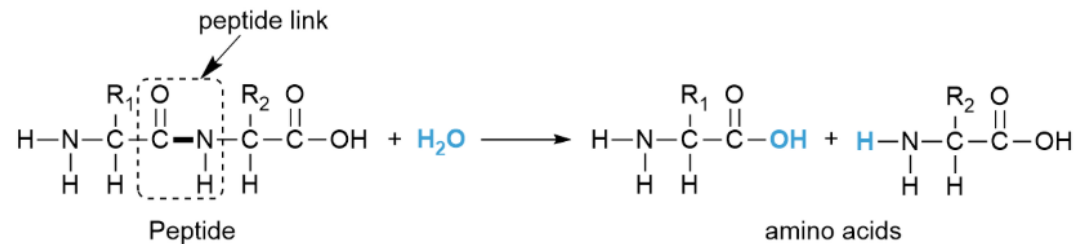
Biochemický proces anaerobní digesce (AD)

Jde o kontrolovanou **mikrobiální** přeměnu organických látek **bez přístupu vzduchu** za vzniku bioplynu bohatého na **methan**. Druhým produktem je stabilizovaná organo-minerální hmota (digestát). Dílčí kroky jsou katalyzovány mnoha různými enzymy.

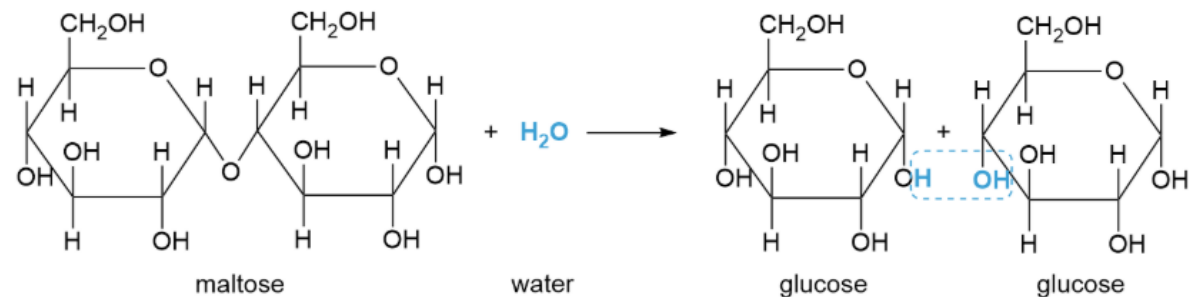


Hydrolýza

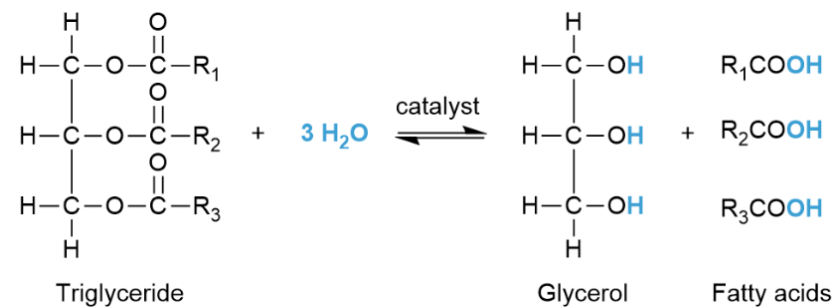
Hydrolýza bílkovin na aminokyseliny



Hydrolýza složitějších sacharidů na glukózu



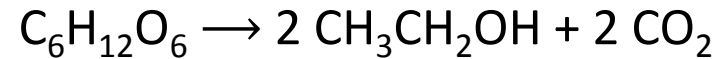
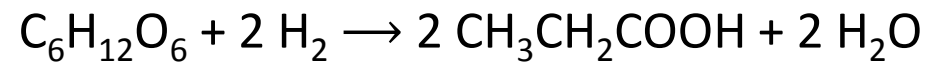
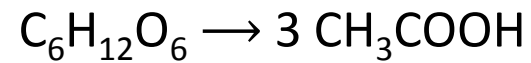
Hydrolýza tuků na mastné kyseliny



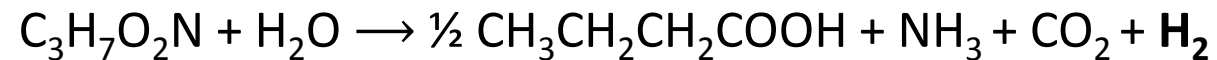
Acidogeneze

Příklady

Acidogeneze z glukózy



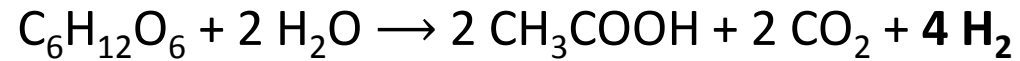
Acidogeneze z L-alaninu



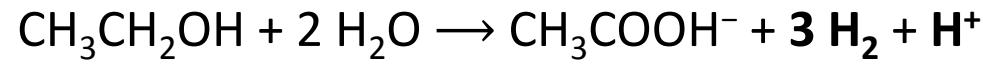
Acetogeneze

Příklady

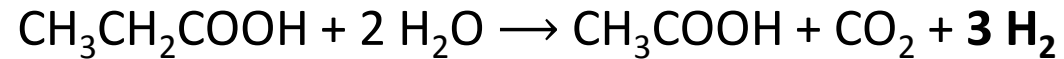
Acetogeneze z glukózy



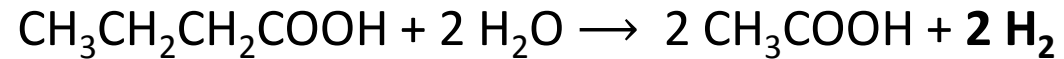
Acetogeneze z ethanolu



Acetogeneze z kyseliny propionové

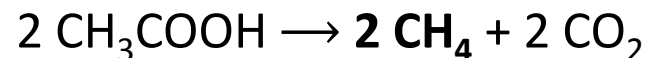


Acetogeneze z kyseliny máselné

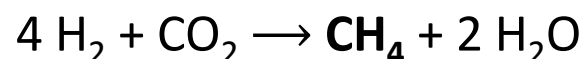


Methanogeneze

Acetiklastická methanogeneze



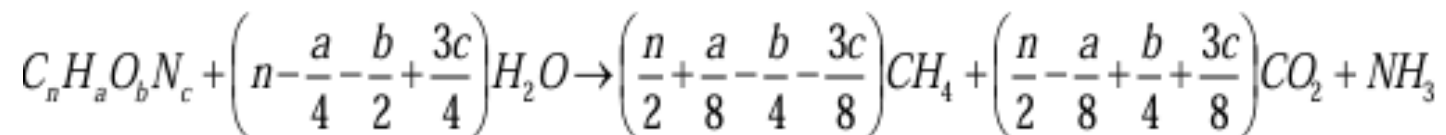
Hydrogenotrofní methanogeneze



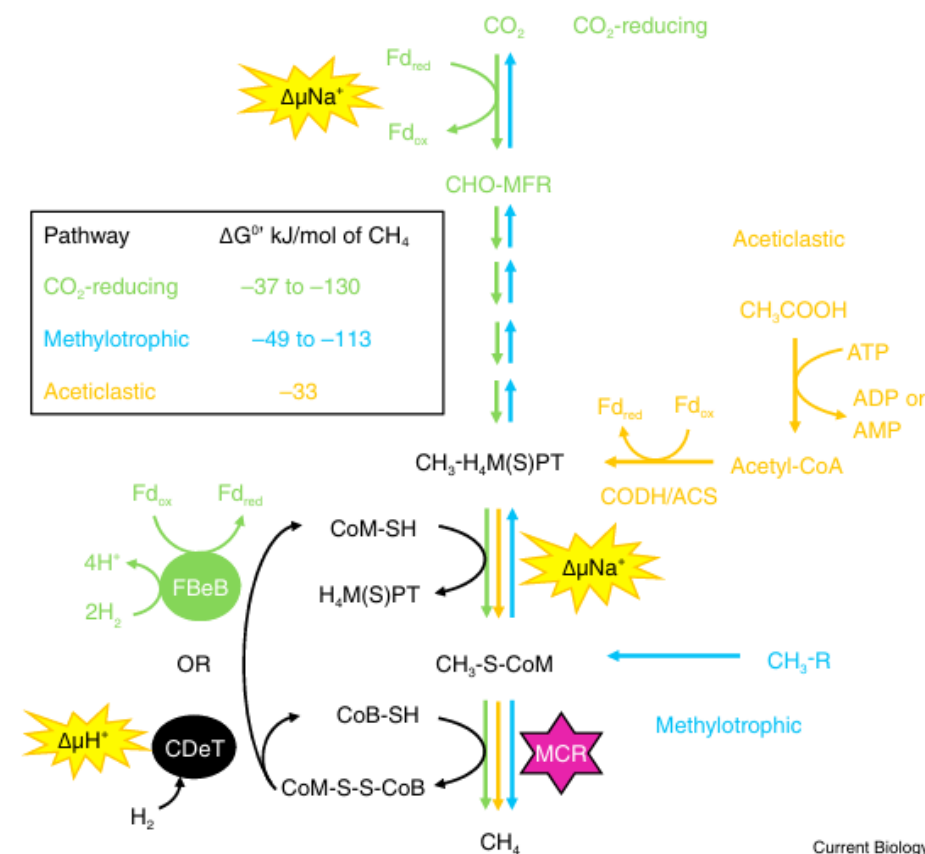
Methylotrofní methanogeneze



Buswellova rovnice shrnující celý proces AD



Souhra enzymů a jejich kofaktorů



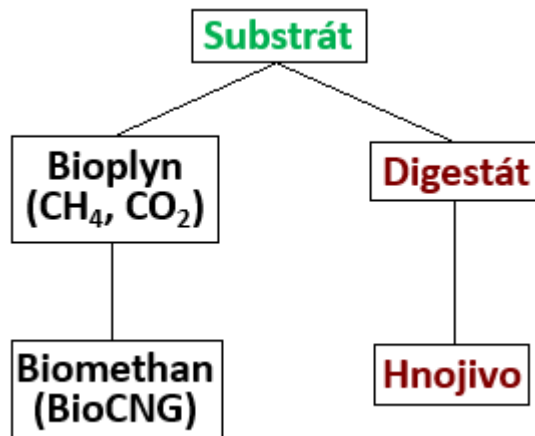
Lyu, Z. et al. Methanogenesis. Current Biology, Volume 28, Issue 13, R727-R732.
Dostupné z: <https://www.cell.com/action/showPdf?pii=S0960-9822%2818%2930623-7>

Temná fermentace (Dark Fermentation)

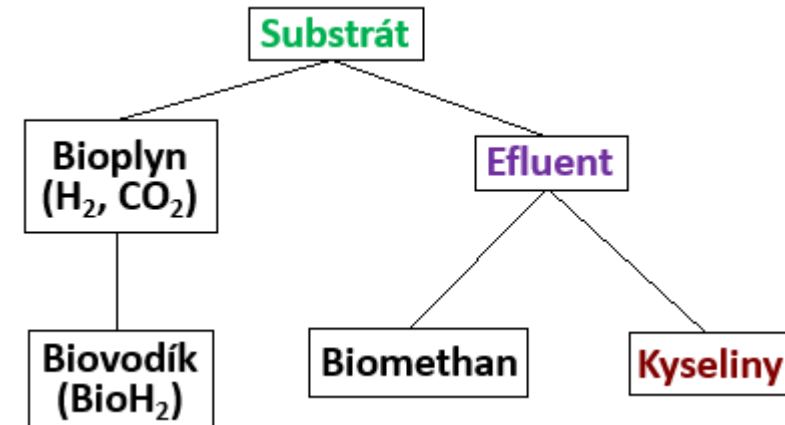
Jaký je rozdíl mezi anaerobní digesí a temnou fermentací?

Pokud zajistíme, aby ve fermentoru neproběhl poslední krok digesce, tedy methanogeneze, získáme bioplyn tvořený meziprodukty (H_2 , CO_2). A to je temná fermentace.

Anaerobní digesce



Temná fermentace



Temná fermentace (DF)

Jde o kontrolovanou **mikrobiální** přeměnu organických látek **bez přístupu vzduchu** za vzniku bioplynu bohatého na **vodík**. Druhým produktem je roztok nižších mastných kyselin (efluent). Dílčí kroky jsou katalyzovány mnoha různými enzymy, především [Fe]-hydrogenázou.

Proces probíhá **bez přístupu světla**, což ovšem platí i pro anaerobní digesti (AD).

Existuje i proces fotofermentační výroby vodíku, ve kterém je světlo zdrojem energie pro mikroorganismy.

Jaký substrát je vhodný pro temnou fermentační výrobu biovodíku?

Sacharidy po hydrolýze	ano	$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2 \text{CH}_3\text{COOH} + 2 \text{CO}_2 + 4 \text{H}_2$
Bílkoviny po hydrolýze (aminokyseliny)	spíše ano	$\text{C}_4\text{H}_7\text{O}_4\text{N} + 2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_3\text{COOH} + \text{NH}_3 + 2 \text{CO}_2 + 2 \text{H}_2$
Tuky po hydrolýze (mastné kyseliny + glycerol)	spíše ne	β-oxidace mastných kyselin za daných podmínek neprobíhá. $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_3\text{COOH} + \text{CO}_2 + 3 \text{H}_2$

Hlavní reakční dráhou temné fermentace je glykolýza

Substrát, předúprava

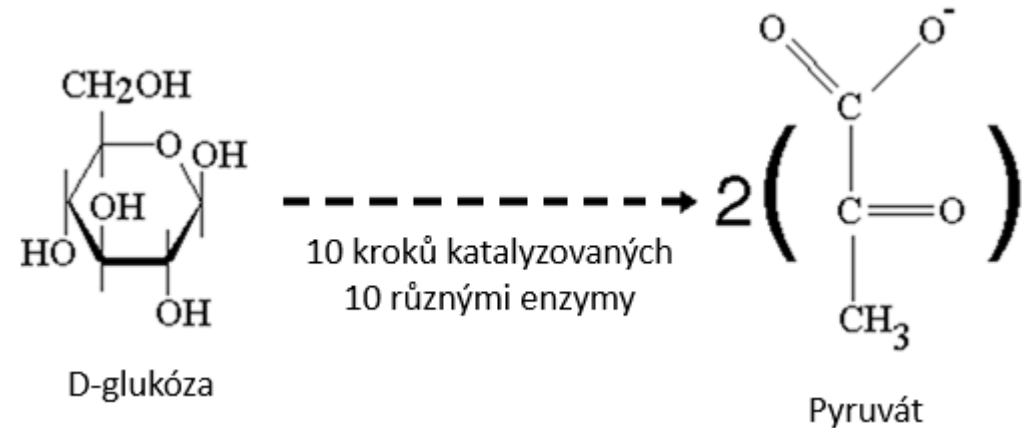
- Výchozí surovinou může být například i zdřevnatělá biomasa. Tu je potřeba zcukernatět předúpravou.
- Nejvhodnějšími substráty jsou cukrové odpadní vody, potravinový odpad, odpadní glycerol apod.

Hydrolýza

Temná fermentace začíná hydrolýzou složitějších sacharidů na **glukózu**.

Glykolýza

Glukóza je přeměněna na pyruvát.



Metabolizace pyruvátu

- přes anion kyseliny mravenčí (formiát)

Vzniká CO_2 a H_2

- přes nikotinamidadenindinukleotid (NADH)

Vzniká kyselina octová,
propionová, máselná, CO_2 a H_2

Dílčí kroky temné fermentace probíhají uvnitř buněk mikroorganismů (intracelulárně) i v prostředí vnějšího roztoku (extracelulárně).

- Univerzálním přenašečem energie v biochemických reakcích je adenosin trifosfát (ATP).
- Využitelnými mikroorganismy jsou především bakterie *Bacillus*, *Clostridium*, *Escherichia coli*, *Bifidobacterium* a další, ať již v přirozené směsi nebo jednodruhové.

Je velmi obtížné dosáhnout toho, aby hlavním produktem byl vodík.

- Vždy vzniká velké množství CO_2 . Ten naštěstí pochází z biomasy.
- Vždy vznikají různé kyseliny (VFA). Ty mohou nakonec být i nejcennějším produktem.
- Dále může vznikat ethanol a řada dalších látek.

Chceme-li produkovat především kyseliny, podpoříme propionovou nebo mléčnou fermentaci.

- Při tvorbě kyseliny propionové nebo mléčné nevzniká H_2 . Vzniká CO_2 .

Alkoholovou fermentaci všichni znají.

- Vzniká hlavně CO_2 , ale může i H_2 .

Temná fermentace

Procesní podmínky

Anaerobní prostředí:	REDOX potenciál optimálně <250 mV
Světlo:	žádné
Tlak:	atmosférický
Teplota:	podobná jako v bioplynovém fermentoru; mezofilní (35-43 °C), termofilní (50-60 °C)
pH:	obecně 4,0 – 7,5, nejčastěji 5,5-6,0
Organické zatížení fermentoru:	různé (~ 2 - 16 kg organických látek / m ³ / den) (velmi závisí na typu substrátu a fermentoru)
Hydraulická doba zdržení:	krátká (hodiny až jednotky dnů) (velmi závisí na typu substrátu a fermentoru)
Koncentrace sušiny v suspenzi:	nízká (1-6 % hm.) - vyvíjen je především mokrá proces
Parciální tlak vodíku v bioplynu:	čím nižší, tím lépe (<5 Pa)
Makronutrienty:	vyvážený poměr C:N:P (velmi závisí na ostatních podmínkách)
Mikronutrienty:	Na, K, Mg, Ca, Fe, Se, Co, Mn, ...

Biovodík z temné fermentace

Principiálně by jej bylo možno označit za zelený vodík, neboť energie pro provedení fermentace pochází z obnovitelného zdroje – z biomasy.

Bohužel, nelze se vyhnout vedlejším reakcím respektive vedlejším produktům. Příklad: **fermentace glycerolu**

- kyselina octová $\text{HO-CH}_2\text{-CH(OH)-CH}_2\text{-OH} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_3\text{-COOH} + \text{CO}_2 + \mathbf{3\ H_2}$
- kyselina máselná $2\ \text{HO-CH}_2\text{-CH(OH)-CH}_2\text{-OH} \rightarrow \text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-COOH} + 2\ \text{CO}_2 + \mathbf{4\ H_2}$
- ethanol $\text{HO-CH}_2\text{-CH(OH)-CH}_2\text{-OH} \rightarrow \text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-OH} + \text{CO}_2 + \mathbf{H_2}$
- butanol $2\ \text{HO-CH}_2\text{-CH(OH)-CH}_2\text{-OH} \rightarrow \text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-OH} + 2\ \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \mathbf{2\ H_2}$

Teoretická produkce vodíku z glycerolu je 1 mol/mol.

Praktické výsledky jsou často jen 0,3-0,5 mol/mol.

Příklad laboratorního experimentu produkce vodíku temnou fermentací

Fermentor: buben s kapalinovým objemem 10 l a plynovým objemem 10 l.

Míchání: kontinuální rotací okolo horizontální hřídele (0,5 ot/min).

Startovní (očkovací) kal: z 1. fermentoru zemědělské BPS Pustějov II.

Předúprava kalu: ohřev v retortě (125 °C, 2,3 bar, 3 hodiny) pro deaktivaci methanogenních mikroorganismů.

Substrát: nejprve odpad z krájení brambor, později digestát z kukuřičné siláže a nakonec roztok glukózy.

Dávkování substrátu: ručně, 1x denně.

Obsah sušiny v suspenzi ve fermentoru: 5-15 % hm.

Teplota fermentace: 40 až 70 °C.

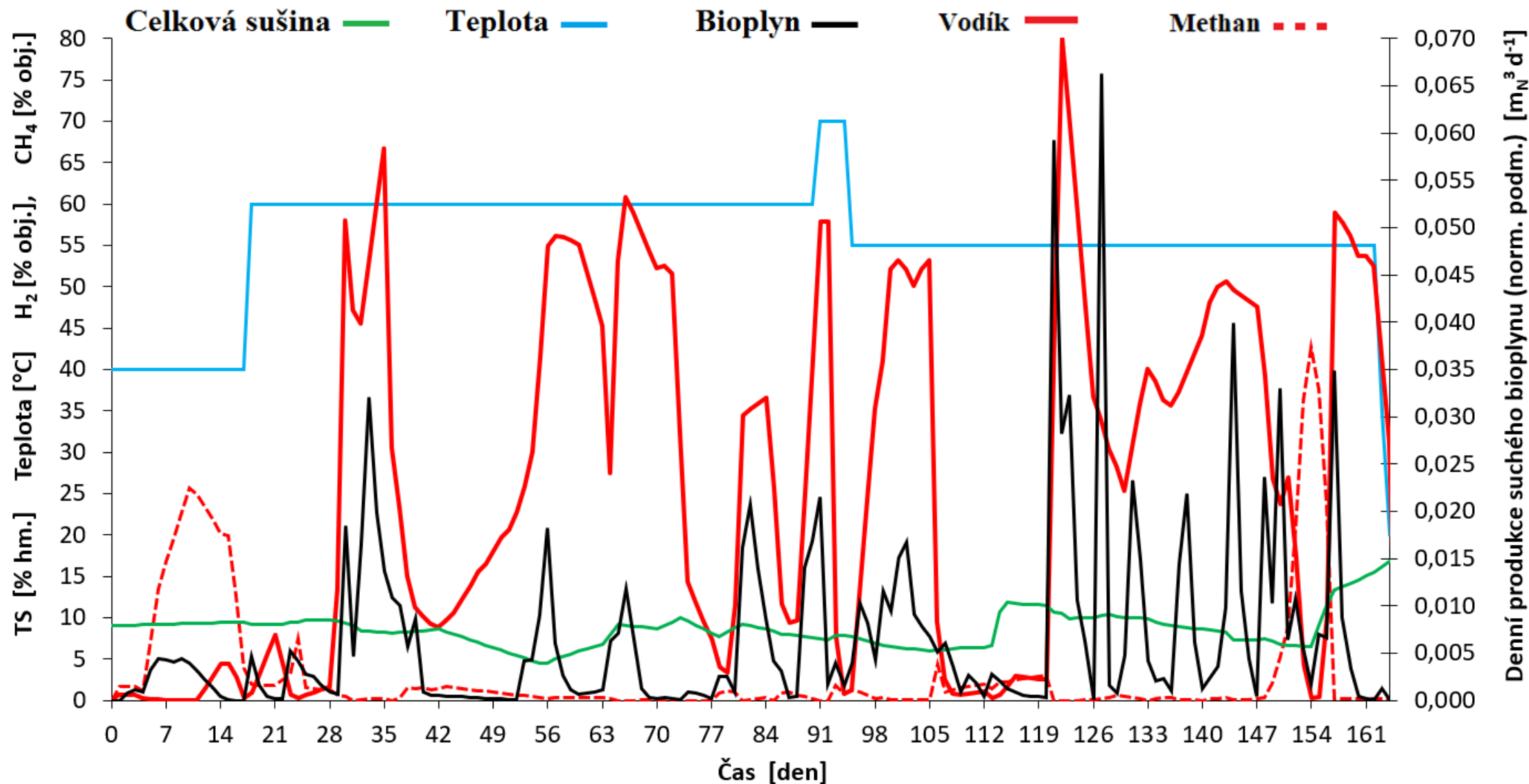
Měření produkce bioplynu: bubnovým plynoměrem RITTER TG05.

Měření koncentrace vodíku: TCD senzorem TELEDYNE Gasurvayor 700.

Měření koncentrace methanu: IČ senzorem TELEDYNE.

Ověřování zavzdušnění bioplynu: chromatograficky (GC-TCD).





Problém

Vlivem absence automatizační techniky pro dávkování substrátu a odpouštění digestátu byla doba zdržení příliš dlouhá (4-80 dnů).

To byl pravděpodobně hlavní důvod, proč se při žádné teplotě nepodařilo fermentaci ustálit. Testované zatížení činilo $1 \text{ až } 60 \text{ kg}_{VS} \text{ m}^{-3} \text{ d}^{-1}$.

Intenzita produkce vodíku

Výsledky experimentu

Substrát		Bramborové zkrojky	Digestát z kukuřičné siláže	Roztok glukózy
Zatížení fermentoru	$\text{kg}_{\text{VS}}\text{m}^{-3}\text{d}^{-1}$	2,9	2,5	48,9
Doba zdržení	dny	58	16	10
Intenzita produkce vodíku z fermentačního objemu	$\text{Nm}^3 \text{ m}^{-3} \text{ d}^{-1}$	0,07	0,39	0,27
Obsah H_2 v bioplynu	% obj.	16	38	38

Produkce H_2 nebyla dostatečně intenzivní, pro praktické uplatnění by bylo potřeba ji zvýšit na $2\text{--}3 \text{ Nm}^3 \text{ m}^{-3} \text{ d}^{-1}$.
Takové zvýšení by mělo být po optimalizaci možné.

Poloprovozní jednotky temné fermentace

Feedstock	Volume of reactor (m ³)	Reactor type	pH	HRT	T (°C)	H ₂ production rate (m ³ /m ³ /day)	H ₂ yield	Yield unit
Molasses ⁷⁹	1.48	CSTR	4.5	4	35	5.57	0.175	m ³ /kg COD
Heat-treated food waste ⁸⁰	0.5	CSTR	5.3	21	33	3.88	1.82	mol H ₂ /mol sucrose
Alkali-treated food waste ⁸¹	0.15	CSTR	5.3	36	35	1.17	0.5	mol H ₂ /mol sucrose
Sucrose ⁸²	0.4	CSTR	5.9	4	35	15.59	0.52	mol H ₂ /mol sucrose
Kitchen waste ⁸³	0.15	Inclined PFR	5.6	168	35	1.99	72	L H ₂ /kg VS
Garbage slurry	0.2	CSTR	5.8	30	60	5.4	2.4	mol H ₂ /mol sucrose
Co substrate of groundnut deoiled cake with condensed molasses and other feedstocks ⁸⁴	10	Batch	3.8	24	35	0.27	12.2	mol H ₂ /kg COD removed
Food waste ⁸⁵	0.2	CSTR	5.5		55	0.95	67	L H ₂ /kg VS
Glute manufacturing wastewater + sucrose ⁸⁶	1	Fluidized bed	6	24	35	0.22	0.016	m ³ /kg COD
Citric acid plant waste ⁸⁷	50	UASB	6.8 to 7.2	12	35–38		0.84	mol H ₂ /mol hexose

Zdroj:

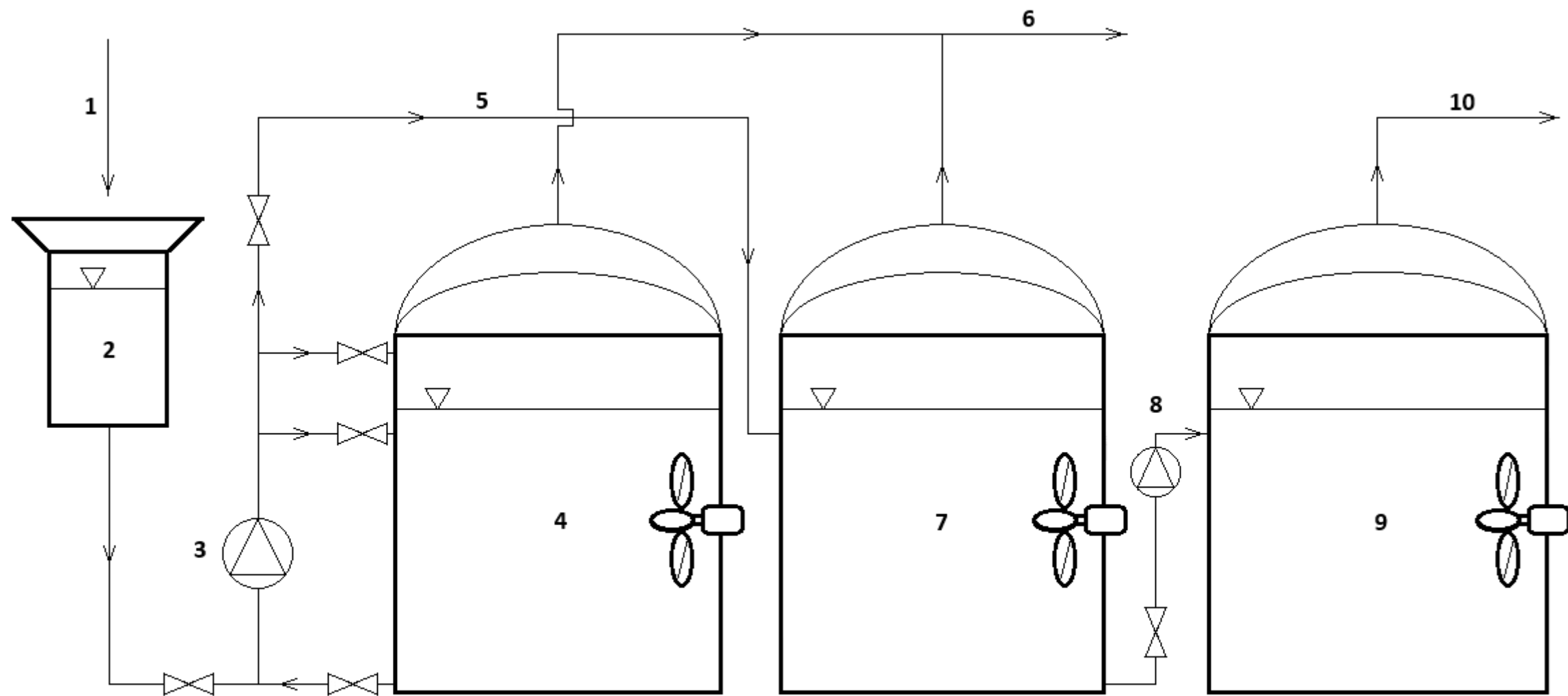
Sohale, A.P., Janardanan, S., Yadav, D., Dash, B., Yadav, M.D., Dark Fermentative Biohydrogen Production: Recent Advances and Challenges, American Chemical Society, Industrial & Engineering Chemistry Research (2023), Volume 62, Issue 37, pages 14755-14771, ISSN 0888-5885, doi: 10.1021/acs.iecr.3c01439.

Vyhlídky na využití temné fermentace

- Některé poloprovozní zkoušky temné fermentace přinesly slibné výsledky.
- Proces však dosud nebyl průmyslově aplikován.
- DF je již nyní aplikovatelná pro zpracovávání odpadních vod zejména v případě obsahu škrobu a jednoduchých sacharidů, např. v potravinářském průmyslu nebo u lihovarů. Přispělo by se tak k energetické nezávislosti ČOV.
- Výzkum pokračuje a mokrou metodu by mělo být brzy možné uplatnit jako rozšíření odpadářských bioplynových stanic zpracovávajících např. potravinové odpady.
- “Suchá temná fermentace” tuhých substrátů se zdá také být schůdnou, ale výzkum je teprve na začátku.
- Efluent je zdrojem zejména organických kyselin například pro výrobu bioplastů.

Temná fermentace (DF) jako předstupeň pro bioplynovou či biometanovou stanici

- Před stávající bioplynovou stanicí se postaví bioreaktor pro temnou fermentaci.
- Bioplyn z DF se využije pro ohřev technologie nebo i jako zdroj vodíku.
- Efluent se přímo nebo po průchodu zrovnoměrnovacím zásobníkem využije jako kyselý substrát pro produkci metanu bioplynovou stanicí.



- 1 Tekutá vstupní směs
- 2 Zásobník
- 3 Dávkovací / cirkulační čerpadlo
- 4 Míchaný bioreaktor pro temnou fermentaci

- 5 Kyselý efluent
- 6 Bioplyn s vysokým obsahem vodíku
- 7 Zásobník efluentu
- 8 Čerpadlo efluentu

- 9 První fermentor stávající bioplynové stanice
- 10 Bioplyn s vysokým obsahem methanu

Temná fermentace jako součást biorafinérie

Biorafinérie je závod zpracovávající obnovitelnou surovinu (biomasu) na biopaliva, chemikálie a další využitelné produkty.

- Bioplyn s vodíkem se energeticky využije v rámci rafinérie.
- Z efluentu jsou separovány chemické látky jako obchodovatelné suroviny.
- ✓ **Kyselina octová** je surovinou např. pro výrobu **vinyl acetátu**, plastů jako acetátu celulózy, esterů, halogenovaných kyselin, acetanhydridu, acetamidů, citrátů, ... a následně aspirinu, antibiotik, insekticidů, barviv, ...
- ✓ **Kyselina propionová** je surovinou je protiplísňovým a antibakteriálním stabilizátorem v potravinářství. Je prekurzorem plastů jako **acetát-propionát celulózy**, a esterů sloužících jako plastifikátory nebo vůně.
- ✓ **Kyselina máselná** je surovinou pro výrobu **butanolu**, plastů poly-3-hydroxybutyrát (PHB), acetát-butyrate celulózy, vonných a ochucovacích látek methylbutyrát, ethylbutyrát, amylbutyrát a dalších.
- ✓ **Kyselina mléčná** má sama velice široké využití a také je prekurzorem bioplastů jako **kyselina polymléčná (PLA)**.
- ✓ **Kyselina kapronová** je aditivem do potravin a zdrojem pro farmaceutické syntézy.

Závěr

Temná fermentace (DF) je biochemická metoda výroby vodíku a mnoha organických látek.

Metoda je stále ještě ve stádiu výzkumu a vývoje.

Některé pilotní jednotky poskytly slibné výsledky.

V budoucnu by se temná fermentace mohla uplatnit alespoň jako předstupeň biometanových stanic.

Případně by mohlo jít i o výrobu cenných organických látek pro chemický a dalších průmysly.

Děkuji za pozornost

Ing. Jiří Rusín, Ph.D.

Výzkumná skupina: Technologie pro ochranu prostředí

+420 597 323 812

jiri.rusin@vsb.cz

<https://ceet.vsb.cz/vec>

Příspěvek vznikl v rámci projektu č. TN02000025/001 “Národní centrum pro energetiku II” podpořeného Technologickou Agenturou ČR a Národním plánem obnovy. Experiment temné fermentace byl proveden v Institutu environmentálních technologií (IET).

VŠB TECHNICKÁ
UNIVERZITA
OSTRAVA

17. LISTOPADU 2175/15
708 00 OSTRAVA-PORUBA

UNIVERZITA@VSB.CZ
WWW.VSB.CZ



VSBTUO

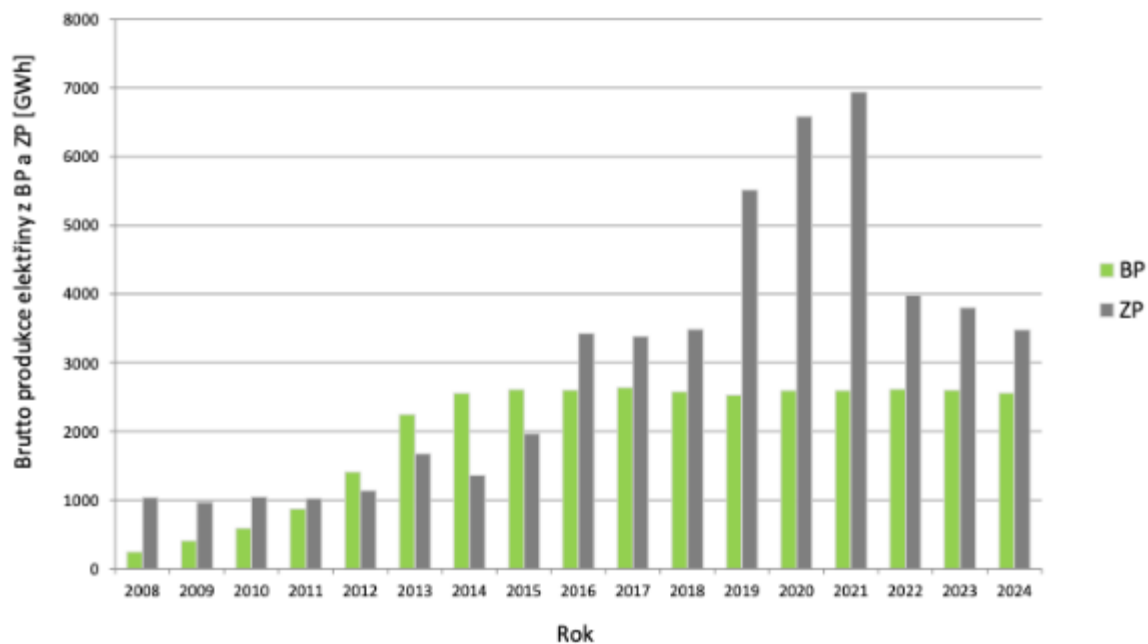


VSBTUOSTRAVA

Produkce energie z bioplynu v ČR

Ročně spotřebujeme cca 6,5 TWh elektrické energie z bioplynu. To je asi 1 % spotřeby energie v ČR.

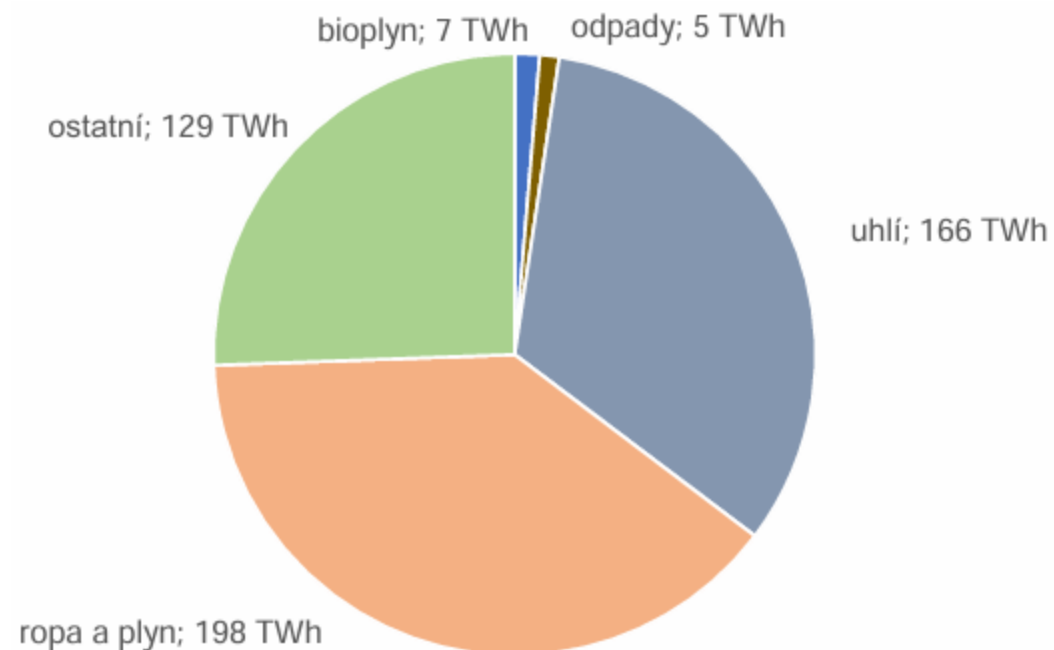
Hrubá produkce elektrické energie ze spalování bioplynu a zemního plynu



Zdroj:

Česká bioplynová asociace z.s.: Hodnocení výroby elektřiny z bioplynu v roce 2024.
<https://www.czba.cz/aktuality/hodnoceni-vyroby-elektriny-z-bioplynu-v-roce-2024.html>

Struktura celkové roční spotřeby energie v ČR



EGÚ Brno, a.s. Několik poznámek k bioplynu (listopad 2021)
<https://www.egubrno.cz/wp-content/uploads/2022/01/bioplyn.pdf>