

Produkce biometanu z čerstvých řepných skrojků s přidanou slámou

PRODUCTION OF BIOMETHANE FROM FRESH SUGAR BEET TOPS WITH ADDED STRAW

Julie Sobotková¹, Antonín Kintl¹, Igor Huňady¹, Jakub Elbl², Ondřej Malíček², Tomáš Koutný², Pavel Suchý²,
Magda Vičíková³, Tomáš Vítěz^{2,4}

¹ Zemědělský výzkum, spol. s r. o., Troubsko; ² Agronomická fakulta, Mendelova univerzita v Brně;

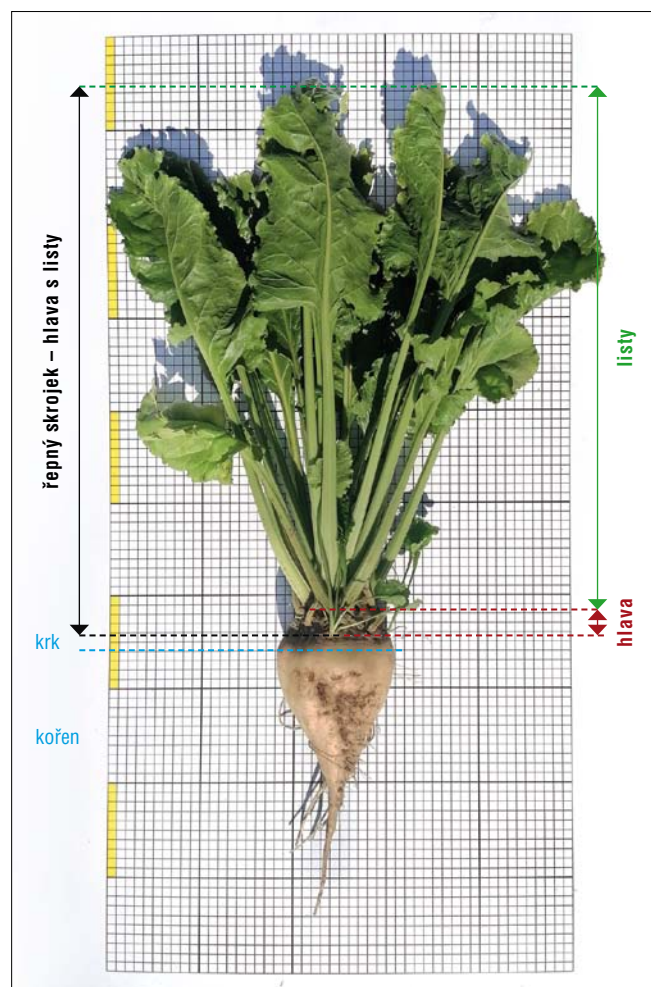
³ agriKomp Bohemia s. r. o.; ⁴ Přírodovědecká fakulta, Masarykova univerzita

Aktuální změny v Evropské unii směřující k nízkouhlíkové společnosti jsou závislé na elektrifikaci vycházející z obnovitelných zdrojů energie (1), přičemž bioenergie představuje klíčovou roli ve snižování emisí skleníkových plynů a zajištění budoucích palivových zdrojů po celém světě (2). Možnosti produkce a využití biomasy se však mezi jednotlivými zeměmi výrazně liší (3). Využívání obnovitelných zdrojů energie závisí na produkci rostlinné biomasy, jejíž výnosy mohou být negativně ovlivněny klimatickou změnou, zejména výkyvy teplot a nerovnoměrně rozloženými srážkami během vegetačního období (4, 5). Důsledkem těchto změn se například průměrné výnosy kukuřice v posledních desetiletích celosvětově snížily přibližně o 3,8 % (6). Výnos kukuřice může do konce století zaznamenat pokles až o 24 %, přičemž poklesy se projeví už do roku 2030, kdy se očekává, že celosvětová poptávka po obilovinách a krmivech vzroste o 50 % ve srovnání s rokem 2000 (7). Do roku 2050 se očekává celosvětové zvýšení poptávky po potravinách o 60 % (8). Jednou z možností, jak environmentálně šetrně uspokojit tuto poptávku, je využívání druhotných surovin ze zemědělské produkce, což může snížit tlak na konkurenci mezi produkcí potravin a zajištěním obnovitelných energetických zdrojů pro potřeby lidské populace (9). Podle HARDYHO (10) by takováto „biologická ekonomika mohla být pro 21. století tím, čím byla ekonomika založená na fosilních palivech pro 20. století“.

Cukrová řepa (*Beta vulgaris* var. *altissima* L.) je rostlina, která by mohla snížit konkurenci mezi produkcí potravin a produkcí surovin pro průmyslové využití. Existuje model, ve kterém se kořen cukrové řepy využívá pro produkci cukru a listy na produkci biometanu v bioplynové stanici (BPS) při jednom systému pěstování. Hlavní předností daného modelu je kombinace produkce potravin a biomasy pro produkci elektrické energie. Dalším přínosem je zvýšení udržitelnosti celého koloběhu produkce a zpracování potravinářských komodit. Na základě prací (11, 12, 13) je možné formulovat následující univerzální model: zemědělec vyprodukuje komoditu, například cukrovou řepu, ta se následně zpracuje v cukrovaru a zbytky ze zpracování se následně využijí v BPS, kde se vyrobí biometan a hnojivo (digestát), které se opět může použít ke hnojení zemědělských plodin. Využití biomasy z řepy na dva rozdílné účely – výrobu potravin a bioplynu – může zabránit konkurenčnímu tlaku na využívání půdy pro jedno nebo druhé průmyslové odvětví. Dalším příkladem takového konkurenčního tlaku je rozhodování mezi využitím biomasy v průmyslu a jejím ponecháním na orné půdě

za účelem podpory její kvality a úrodnosti. Podle DANISE ET AL. (14) pochází významná část půdní organické hmoty, zejména humusových látek, převážně z rozkladu rostlinných zbytků obsahujících hlavně celulosu a lignin. Mikroorganismy hrají klíčovou roli v přeměně těchto látek, přičemž jejich zbytky v půdě představují důležité výchozí materiály pro tvorbu humusových substancí (15).

Obr. 1. Znázornění rostliny cukrové řepy podle JÚZLA A ELZNERA (22) a biomasy, která byla odebrána za účelem stanovení jejich základních vlastností



Tab. I. Přehled variant (řepa: listy a hlava, sláma)

Substrát	Navážka (g)	Akronym	Složení substrátu
1 listy	100,00	L	Inokulum 3L + řepa (listy) 100 g
2 hlava bez listů	112,50	H	Inokulum 3L + řepa (hlava bez listů) 112,5 g
3 hlava s listy	70,59	HL1	Inokulum 3L + řepa (hlava s listy) 70,59 g
4 hlava s listy	105,88	HL2	Inokulum 3L + řepa (hlava s listy) 105,88 g
5 hlava s listy	141,18	HL3	Inokulum 3L + řepa (hlava s listy) 141,18 g
6 hlava s listy + sláma	70,59 + 6,51 (= 10 : 1)	HL+S1	Inokulum 3L + řepa (hlava s listy) 70,59 g + sláma 6,61 g
7 hlava s listy + sláma	52,94 + 9,78 (= 5 : 1)	HL+S2	Inokulum 3L + řepa (hlava s listy) 52,94 g + sláma 9,78 g

Biomasa na bázi lignocelulosity je přirozeně odolná vůči mikrobiální a enzymatické degradaci (16). Tento jev byl vysvětlován tím, že mikroorganismy obvykle získávají méně energie, než kolik jí musí vynaložit na produkci enzymů potřebných k degradaci ligninu (17). Nedávné studie však naznačují, že degradace ligninu začíná již v rané fázi dekompozice, kdy je v prostředí dostatek snadno rozložitelných sacharidových frakcí. Díky tomu mají mikroorganismy k dispozici dostatek energie pro produkci enzymů rozkládajících lignin (18, 19). Velké množství listové biomasy cukrové řepy vyžaduje nalezení efektivních způsobů jejího využití, protože často zůstává na polích nevyužitá, pokud není použita jako krmivo pro zvířata (20). Cukrová řepa obsahuje až 21 % sacharosy (21) a biomasa ponechaná na poli, označovaná jako řepný skrojek, obsahuje značné množství cukrů. Ty mohou stimulovat mikrobiální společenstvo během rozkladu ligninu k nerovnovážnému stavu.

Materiál a metody

Testovaný materiál

Odběry vzorků biomasy řepných skrojků byly realizovány ručně na třech místech zájmového pozemku. Z důvodů eliminace okrajového efektu byla pro odběr vzorků vynechána část pozemku okolo jeho obvodu o šířce 20 m. Jednotlivé odběrové body byly od sebe vzdáleny 100 m. V každém odběrovém místě bylo odebráno 10 ks řepných skrojků z 10 po sobě jdoucích rostlin v řádku pro každou ze tří následujících variant:

- hlava s listy (HL),
- hlava bez listů (H),
- listy (L)

Ihned po odebrání byly vzorky uloženy do přenosného termoboxu a transportovány do laboratoře. V laboratoři byly vzorky rostlin zpracovány dle obr. 1. Vzorky rostlinné biomasy byly lyofilizovány pomocí lyofilizátoru Gregor L10-55 PRO (GREGOR Instruments, s. r. o., Sázava, Česká republika). Celková sušina (total solids, 105 °C) a ztráta žiháním (volatile solids, 550 °C) byly stanoveny podle českých norem ČSN EN 14346, ČSN EN 15169.

Fermentační testy

Fermentační testy byly provedeny podle normy (Verein Deutscher Ingenieure) VDI 4630:2016, která popisuje standardizovaný

postup pro biologické testování substrátů určených k anaerobní fermentaci. Podrobnější informace o metodice lze nalézt v publikaci TEJCHMANNOVÁ ET AL. (23). Jednotlivé vzorky (tab. I.) byly nadávkovány do laboratorních vsázkových fermentorů o objemu 5 l. Jako inokulační substrát byl použit materiál z třetího stupně anaerobní fermentace bioplynové stanice v Čejči. Do každého z 24 použitých fermentorů bylo nadávkováno 3 l inokulačního substrátu. Vzorky byly dávkovány do jednotlivých fermentorů v množství: čerstvý list drcený 100 g, bulva drcená 112,5 g, směs list + bulva 105,88 g, směs list + bulva a sláma 70 g + 7 g (10 : 1), směs list + bulva a sláma 50 g + 10 g (5 : 1). Pro každý vzorek byly použity vždy tři fermentory, tři fermentory sloužily pro určení produkce bioplynu inokula. V průběhu fermentace byla ve fermentorech udržována stabilní teplota $40 \pm 0,2$ °C. Doba zdržení substrátu ve fermentoru byla 28 dnů.

Statistická analýza

Všechny parametry experimentu byly měřeny nejméně ve třech opakováních. Statistické zpracování dat bylo provedeno v programu Statistica 14 (TIBCO Software, Inc., Palo Alto, SF, USA). Byla provedena průzkumná exploratorní analýza dat (EDA) výsledků za účelem vyřazení extrémních hodnot, následovala jednofaktorová analýza rozptylu (one-way analysis of variance, ANOVA) v kombinaci s post-hoc Tukeyho HSD testem.

Výsledky

Nutriční charakteristika substrátů pro fermentační testy

Tab. II., III. a IV. obsahují popis složení čtyř základních substrátů z hlediska jejich nutričních parametrů, což je nezbytné pro hodnocení jejich vhodnosti pro anaerobní fermentaci a produkci biometanu.

Nejvyšší obsah sušiny měla **sláma (S)** (99,06 %), která se statisticky významně lišila od všech ostatních variant (tab. II.). Nejnížší obsah byl zjištěn u varianty **listy (L)** (15,56 %).

Nejvyšší obsah organické hmoty měla varianta **hlava bez listů (H)** (94,85 %), což ukazuje na vysoký podíl těkavých látek a pravděpodobně největší potenciál pro anaerobní degradaci. Nejnížší obsah spalitelných látek měla varianta **listy (L)** (84,11 %), což naznačuje vysoký podíl anorganických látek (popela).

Hlava bez listů (H) měla nejnížší obsah vlákniny (6,50 %) a také nejnížší hodnoty vlákniny NDF (14,06 %) a ADF (8,28 %),

což předznamenává lepší rozložitelnost v procesu fermentace. **Listy (L)** a **hlava s listy (HL)** měly střední hodnoty obsahu vlákniny (10,11 % a 9,41 %), přičemž listy obsahují více hemicelulose (14,31 %) než hlava s listy (10,07 %), což může ovlivnit rychlost hydrolýzy. Nejvyšší podíl vlákniny (37,21 %) obsahovala **sláma (S)**, což odpovídá jejímu vysokému obsahu NDF (80,24 %) a ADF (56,74 %). Obsah celulósy zde byl nejvyšší (44,97 %), což naznačuje obtížnou biologickou rozložitelnost.

Klíčovým faktorem ovlivňujícím dostupnost organické hmoty pro mikroorganismy je lignin (ADL). Nejnižší obsah ADL (2,78 %) měla **hlava bez listů (H)**, což znamená, že by měla být nejlépe degradovatelná ze všech materiálů. **Listy (L)** a **hlava s listy (HL)** měly střední obsah ADL (5,85 % a 4,14 %), což značí průměrnou fermentační degradabilitu v procesu fermentace. Nejvyšší podíl ligninu (11,76 %) měla **sláma (S)**, což potvrzuje její obtížnou biodegradabilitu.

Hlava bez listů (H) měla dále nejvyšší obsah sacharidů (63,79 %), což vytváří předpoklad pro rychlý nástup fermentace a produkci bioplynu. **Hlava s listy (HL)** obsahovala také poměrně vysoký podíl cukrů (34,90 %), což je vhodné pro metanogenezi. **Listy (L)** měly střední obsah cukrů (16,66 %), zatímco **sláma (S)** obsahovala jen 2,51 %, což indikuje nízkou dostupnost lehce fermentovatelných sacharidů.

Produkci bioplynu mohou zvyšovat tuky díky vyššímu energetickému obsahu. Nejvyšší obsah tuku měly **listy** (2,23 %), **hlava bez listů** měla obsah nejnižší (0,29 %).

Mikrobiální aktivitu během fermentačního procesu podporuje vyšší obsah dusíkatých látek (NL). Nejvyšší obsah dusíkatých

Tab. II. Sušina a ztráta žiháním u základních variant substrátů pro ferm. testy

Varianta	Sušina (%)			Obsah spalitelných látek v sušině (%)		
	průměr	±SD	HSD	průměr	±SD	HSD
1 L	14,56	0,25	D	84,11	0,21	D
2 HL	16,28	0,79	C	88,01	0,13	C
3 H	21,49	0,17	B	94,85	0,17	A
4 S	99,06	0,21	A	93,52	0,25	B

Legenda: L = listy, H = hlava bez listů, HL = hlava s listy, S = sláma; ±SD = směrodatná odchylka; HSD = Tukeyho HSD test – písmena (A–D) udávají statisticky významné rozdíly mezi variantami.

látek měly **listy** (22,18 %). **Hlava s listy** (17,46 %) a **hlava bez listů** (8,49 %) měly nižší NL. Nejméně NL obsahovala **sláma** (3,51 %), což snižuje její fermentační potenciál.

Z naměřených dat vyplývá, že jako nejlepší substrát pro produkci biometanu se jeví varianta **hlava bez listů (H)** díky vysokému obsahu cukrů (63,79 %) a nízkému obsahu ligninu neboli ADL (2,78 %), což vytváří předpoklad pro rychlou fermentaci. Středně vhodné substráty jsou **hlava s listy (HL)** a **listy (L)**, protože obsahují vyvážený poměr vlákniny, cukrů a NL. Nejméně vhodným substrátem je **sláma (S)** kvůli vysokému obsahu ligninu (11,76 %), nízkému obsahu cukrů (2,51 %) a nízké dostupnosti lehce fermentovatelných látek. Tyto závěry korespondují i s pracemi (24), ve kterých bylo potvrzeno, že právě vyvážený obsah organických látek snadno a středně biodegradovatelných je určující pro využitelnost konkrétního druhu biomasy v rámci anaerobní fermentace. Některé substráty,

Tab. III. Složení základních variant substrátů pro fermentační testy – obsah NDF, ADF, vlákniny, ADL a celulósy (% sušiny)

Varianta	NDF (%)			ADF (%)			Vláknina (%)			ADL (%)			Celulósa (%)		
	průměr	±SD	HSD	průměr	±SD	HSD	průměr	±SD	HSD	průměr	±SD	HSD	průměr	±SD	HSD
1 L	29,45	0,34	B	15,14	0,88	B	10,11	1,46	B	5,85	0,20	B	9,29	0,97	C
2 HL	22,17	0,14	C	12,10	0,23	C	9,41	0,37	B	4,14	0,40	C	7,96	0,24	B
3 H	14,06	0,03	D	8,28	0,14	D	6,50	0,29	C	2,78	0,77	D	5,50	0,72	B
4 S	80,24	1,86	A	56,74	0,65	A	37,21	0,83	A	11,76	0,42	A	44,97	1,07	A

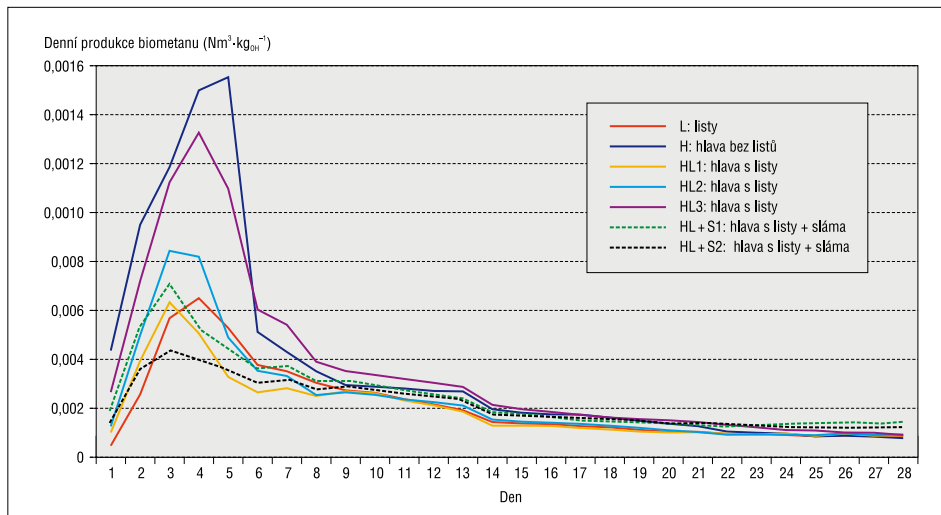
Legenda: NDF = neutrální detergentní vláknina, ADF = kyselá detergentní vláknina, ADL = kyselý detergent lignin; L = listy, H = hlava bez listů, HL = hlava s listy, S = sláma; ±SD = směrodatná odchylka; HSD = Tukeyho HSD test – písmena (A–D) udávají statisticky významné rozdíly mezi variantami.

Tab. IV. Složení základních variant substrátů pro fermentační testy – obsah hemicelulósy, cukrů, tuků, popela a N látek (% sušiny)

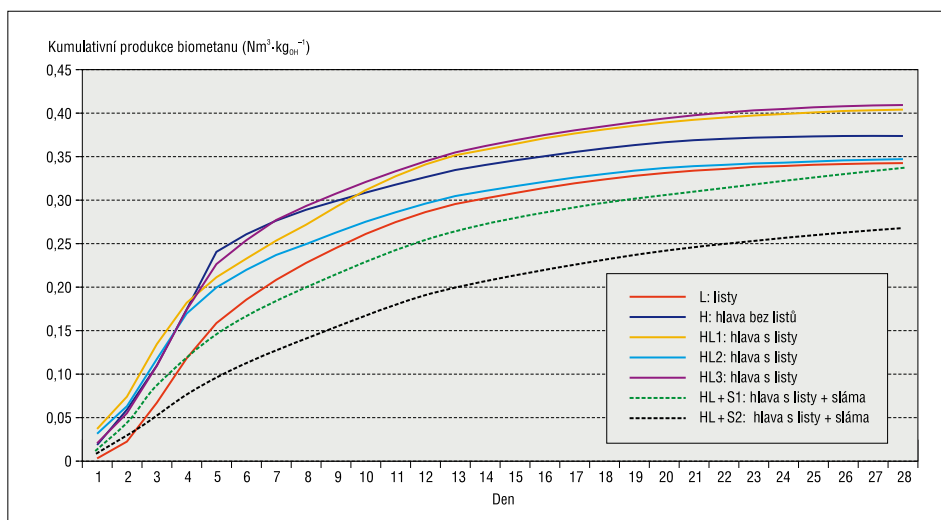
Varianta	Hemicelulósa (%)			Cukry (%)			Tuky (%)			Popel (%)			Dusíkaté látky (%)		
	průměr	±SD	HSD	průměr	±SD	HSD	průměr	±SD	HSD	průměr	±SD	HSD	průměr	±SD	HSD
1 L	14,31	1,01	B	16,66	3,68	C	2,23	0,32	C	15,60	0,23	A	22,18	0,03	A
2 HL	10,07	0,34	C	34,90	1,61	B	1,20	0,17	B	10,99	0,13	B	17,46	0,16	B
3 H	5,78	0,12	D	63,79	2,68	A	0,29	0,06	AB	4,42	0,11	D	8,49	0,07	C
4 S	23,44	1,22	A	2,51	1,19	D	1,71	0,35	A	9,33	0,05	C	3,51	0,14	D

Legenda: L = listy, H = hlava bez listů, HL = hlava s listy, S = sláma; ±SD = směrodatná odchylka; HSD = Tukeyho HSD test – písmena (A–D) udávají statisticky významné rozdíly mezi variantami.

Obr. 2. Denní produkce biometanu v průběhu 28 dnů



Obr. 3. Kumulativní produkce biometanu v průběhu 28 dnů



jako je například sláma, by bylo vhodné předem upravit, případně smísit s jinými organickými substráty, aby se zvýšila její degradabilita v anaerobním procesu (25).

Fermentační testy

Denní produkci biometanu ($\text{Nm}^3 \cdot \text{kg}_{\text{OH}}^{-1}$) v průběhu 28 dnů fermentačních testů znázorňuje obr. 2. Z grafu vyplývá, že nejvyšší produkce biometanu nastala u všech variant mezi 2. až 5. dnem, poté produkce klesala. Nejvyšší hodnota denní produkce biometanu byla zaznamenána u variant **listy (L)** 4. den, **hlava bez listů (H)** 5. den, **hlava s listy (HL2)** a **hlava s listy (HL1)** 3. den, **hlava s listy (HL3)** 4. den, **hlava s listy + sláma (HL+S1)** a **hlava s listy + sláma (HL+S2)** 3. den. Nejvyšší maximum bylo zaznamenáno u varianty **hlava bez listů (H)**. Varianty **hlava s listy (HL1–3)** v různých hmotnostech má nižší maxima než varianta **hlava bez listů (H)**, což může indikovat jiný vliv listů na fermentační proces. Vzorky obsahující slámu vykazovaly v porovnání s ostatními vzorky nižší denní produkci biometanu, což potvrzuje obtížnější rozložitelnost slámy v anaerobním procesu (26). Přibližně po 10. dni se produkce biometanu u všech vzorků

výrazně snižuje a po 15. dni je již relativně stabilní s minimálními rozdíly mezi jednotlivými vzorky. To naznačuje, že hlavní část biologicky rozložitelného materiálu byla rozložena během prvního týdne fermentace. Obdobný průběh zaznamenali autoři předložené práce i při testování dalších organických substrátů (27–30).

Kumulativní produkce biometanu ($\text{Nm}^3 \cdot \text{kg}_{\text{OH}}^{-1}$) v průběhu 28 dnů je znázorněna na obr. 3. Nejvyšší kumulativní produkci biometanu vykazují varianty **hlava s listy (HL3)** a **hlava s listy (HL1)**. Středně vysoké hodnoty produkce biometanu byly zaznamenány u variant **hlava bez listů (H)** a **hlava s listy (HL2)**. Nejnižší hodnoty produkce biometanu byly zjištěny u variant, které obsahovaly slámu: **hlava s listy + sláma (HL+S1)** a **hlava s listy + sláma (HL+S2)**, což může být způsobeno nižší rozložitelností nebo delší dobou potřebnou pro degradaci. Přítomnost slámy tedy snižovala produkci biometanu, pravděpodobně kvůli vyššímu obsahu ligninu (30). Lignocelulosa biomasa je velmi odolná vůči mikrobiálnímu rozkladu (32, 33). Proto je produkce biometanu z pšeničné slámy bez předúpravy často nízká, jsou uváděny hodnoty $0,180\text{--}0,195 \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}_{\text{OH}}^{-1}$ (6, 34), což odpovídá biologické rozložitelnosti nižší než 50 %.

Obr. 4. znázorňuje průběh koncentrace biometanu v bioplynu

během 28 dnů trvajících fermentačního testu. Z obrázku je patrné, že k nejrychlejšímu nárůstu koncentrace biometanu došlo u varianty **hlava bez listů (H)**. Varianty **hlava s listy (HL2)** a **hlava s listy (HL1)** vykazovaly podobný trend, ale s mírně nižšími hodnotami koncentrace biometanu v bioplynu oproti variantě **hlava bez listů (H)**. U variant **listy (L)** a **hlava s listy + sláma (HL+S1)** byl zaznamenán pomalejší nárůst koncentrace biometanu a její hodnoty byly nižší než u varianty **hlava bez listů (H)**. **Hlava s listy + sláma (HL+S2)** vykazovala nejpomalejší nárůst koncentrace biometanu. Je patrné, že substráty obsahující pouze řepnou hlavu bez příměsi slámy mají vyšší kinetiku tvorby biometanu, pravděpodobně díky vyššímu obsahu snadno dostupných cukrů ve srovnání s ostatními variantami. Naopak substráty s přidanou slámou (**HL+S1** a **HL+S2**) vykazují nejnižší koncentraci biometanu, pohybující se kolem 55–60 %_{obj.} Přídavek slámy vede k nižší koncentraci biometanu v bioplynu, což je pravděpodobně způsobeno vysokým obsahem vlákniny a nízkou dostupností fermentovatelných složek (7, 34).

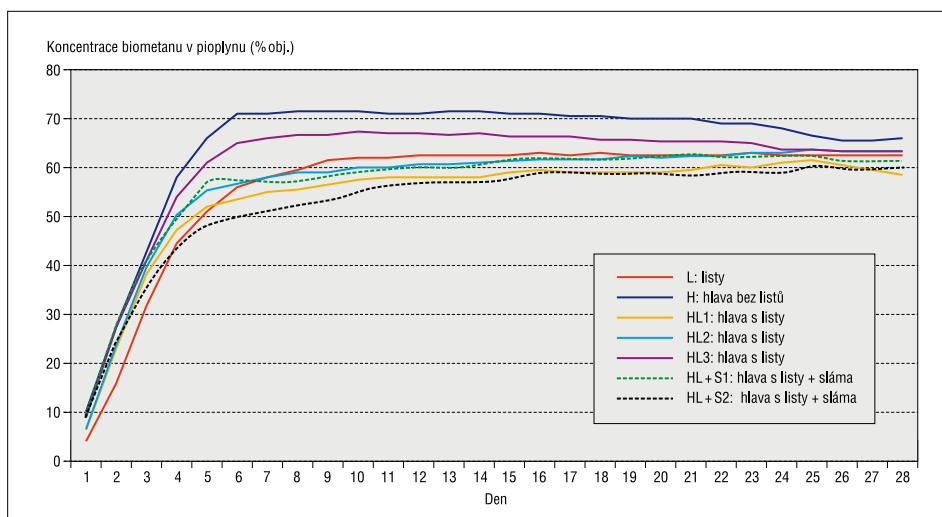
V tab. V. jsou uvedeny hodnoty kumulativní produkce biometanu a koncentrace biometanu v bioplynu pro různé substráty 28. den měření, včetně statistické analýzy významnosti rozdílů

mezi variantami substrátů. Výsledky poukazují na průkazné rozdíly ($P < 0,05$) v produkci biometanu v závislosti na složení a hmotnostním zastoupení jednotlivých substrátů.

Kumulativní produkce biometanu (28. den) se pohybovala mezi $0,267 \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}_{\text{OH}}^{-1}$ u varianty **HL+S2** a $0,409 \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}_{\text{OH}}^{-1}$ u varianty **HL3**. Nejvyšší hodnoty kumulativní produkce biometanu bylo dosaženo u variant substrátů **HL1** a **HL3** s hodnotami $0,407 \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}_{\text{OH}}^{-1}$ a $0,409 \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}_{\text{OH}}^{-1}$. To naznačuje, že tyto substráty mají výrazně vyšší potenciál pro produkci biometanu ve srovnání s jinými variantami. Naopak nejnižší produkce biometanu byla zaznamenána u substrátu

HL+S2 s hodnotou $0,2674 \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}_{\text{OH}}^{-1}$, což naznačuje, že příměs **slámy (S)** v těchto poměrech negativně ovlivnila produkci biometanu. Kumulativní produkce biometanu u variant **HL1** a **HL3** byla signifikantně vyšší než u varianty **HL+S2**. Vědecké studie ukazují, že produkce biometanu z kukuřičné siláže se průměrně pohybuje mezi $0,290$ a $0,400 \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}_{\text{OH}}^{-1}$, v průměru tedy $0,345 \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}_{\text{OH}}^{-1}$ (30, 35, 36). Varianty substrátů bez příměsi slámy testované v této práci tuto hodnotu přesahují nebo se jí blíží. Srovnání s dalšími autory ukazuje, že v hodnotách produkce biometanu ze substrátu sestávajícího z různých částí skrojků řepy existuje značná variabilita, což zdůrazňuje důležitost specifického hodnocení pro různé typy biomasy a jejich využití v praxi. Tyto hodnoty potvrzují potenciál využití rostlinných zbytků cukrové řepy pro zpracování v BPS, existují zde ale potenciálně nezodpovězené otázky.

Obr. 4. Koncentrace biometanu v bioplynu



Vzhledem k odlišnému chemickému složení cukrové řepy a specifickému průběhu její biodegradace v bioplynovém fermentoru se její rozklad výrazně liší od ostatních druhů rostlinné biomasy. Změny během fermentace siláže jsou navíc mnohem výraznější než u jiných substrátů. Výsledky ukázaly, že potenciál produkce bioplynu z čerstvé cukrové řepy je výrazně nižší ve srovnání s píceinami a obilovinami (37). To je způsobeno tím, že hlavním zdrojem fermentovatelné organické hmoty v cukrové řepě je disacharid sacharosa, zatímco v píceinách a obilovinách tvoří hlavní část fermentovatelné organické hmoty polysacharidy. Tato nevýhoda cukrové řepy je kompenzována zvýšenou tvorbou ethanolu během fermentace. WEISSBACH (37) proto také tvrdí, že produkce biometanu ze siláže z cukrové řepy může být podstatně vyšší než z jiné rostlinné biomasy. Na druhou stranu v podmínkách ČR je nepředstavitelné, že by se cukrová řepa

Obr. 5. V kontextu udržitelného zemědělství je vhodné zvažovat využití všech rostlinných zbytků a odpadů ze zemědělské činnosti



Tab. V. Kumulativní produkce biometanu (28. den) a koncentrace biometanu v bioplynu (28. den)

Substrát	Kumulativní produkce biometanu (Nm ³ ·kg _{OH} ⁻¹)			Koncentrace biometanu v bioplynu (% _{obj})		
	průměr	±SD	HSD	průměr	±SD	HSD
1 L	0,3415	0,0341	AB	62,7	2,5	AB
2 H	0,3740	0,0069	AB	65,7	0,6	A
3 HL1	0,4073	0,0345	A	58,3	0,6	B
4 HL2	0,3470	0,0396	AB	63,3	2,5	AB
5 HL3	0,4092	0,0549	A	63,3	2,3	AB
6 HL+S1	0,3368	0,0625	AB	61,3	1,2	AB
7 HL+S2	0,2674	0,0031	B	60,0	3,6	AB

Legenda: OH = organická hmota; L = listy, H = hlava bez listů, HL = hlava s listy, HL+S = hlava s listy + sláma; ±SD = směrodatná odchylka; HSD = Tukeyho HSD test – písmena (A–D) udávají statisticky významné rozdíly mezi variantami.

pěstovala za účelem produkce bioplynu. V kontextu udržitelného zemědělství je ale nezbytné vést diskusi o využití všech rostlinných zbytků a odpadů ze zemědělské činnosti (obr. 5.).

Pro účely fermentace lze úspěšně využít i listů cukrové řepy, které jsou vedlejším produktem výroby cukru (38). Listy z produkce cukrové řepy se většinou nevyužívají, a proto představují relevantní zdroj zbytkové biomasy pro výrobu bioplynu, s nízkým obsahem ligninu (39) a relativně vysokým methanovým potenciálem, srovnatelným nebo vyšším než u celé rostliny kukuřice (40). Rovněž podle FANG ET AL. (41) listy cukrové řepy vykazují dobrý potenciál jako suroviny pro výrobu bioplynu. BADGER ET AL. (42) uvádí pro listy cukrové řepy produkci biometanu 0,297 Nm³·kg_{OH}⁻¹, zatímco FANG ET AL. (41) 0,490 Nm³·kg_{OH}⁻¹.

Další autoři se zabývali zejména využitím cukrovarských řízků pro výrobu bioplynu. HUTNAN ET AL. (43) uvádí, že produkce biometanu byla více než 0,360 Nm³·kg_{OH}⁻¹. Nejvyšší měrné produkce bioplynu (spec. GPR) 0,72 Nm³·kg_{OH}⁻¹ za den bylo dosaženo při 25denní fermentaci s průměrným obsahem biometanu v bioplynu přibližně 63 %, tj. 0,453 Nm³·kg_{OH}⁻¹ biometanu (44). Rovněž MUŽÍK ET AL. (45) pracovali s cukrovarskými řízků. Nejvyššího výtěžku biometanu 0,331 Nm³·kg_{OH}⁻¹ bylo dosaženo během fermentace v trvání 35 dnů. Ještě vyššího výtěžku biometanu až 0,389 Nm³·kg_{OH}⁻¹ bylo dosaženo při kofermentaci cukrovarských řízků s kukuřičnou siláží, ale pro biodegradaci substrátu bylo nutné delší období fermentace v trvání 55 dnů. Podle RATAJE (46) může u řepných řízků s relativně vysokým obsahem draslíku a chloru za určitých okolností dojít k inhibici fermentačního procesu.

Vysoký obsah cukrů v řepné hlavě podporuje intenzivní fermentaci, což vede k rychlé produkci těkavých mastných kyselin. Pokud nastane stav, kdy dochází k nerovnováze mezi rychlou hydrolýzou a pomalejší metanogenezí, může docházet k hromadění mezistupňových produktů, jako je kyselina propionová, která inhibuje aktivitu metanogenů (47).

Koncentrace biometanu v bioplynu se pohybovala mezi 58,3 %_{obj} a 65,7 %_{obj}. Nejvyšší hodnota byla zaznamenána u substrátu **H**, což znamená, že tento substrát produkuje bioplyn s nejvyšším obsahem biometanu. Ostatní substráty vykazují hodnoty v rozmezí 58,3–63,3 %_{obj}, což je běžný interval pro anaerobní fermentaci. Zajímavé je, že varianta **HL1**, která měla

vysokou kumulativní produkci biometanu (tab. V.), vykazuje nejnižší koncentraci biometanu (58,3 %_{obj}). To může naznačovat větší podíl oxidu uhličitého nebo jiných vedlejších plynů vznikajících během anaerobní fermentace.

Na základě uvedených hodnot lze konstatovat, že substrát **HL3** je optimální pro maximalizaci produkce biometanu, avšak substrát **H** poskytuje nejvyšší koncentraci biometanu v bioplynu (tab. V.). Kombinace **HL** (hlava s listy) se složkou **S** (sláma) v poměru **HL+S2** (navážka 52,94+9,78 g) se ukazuje pro produkci biometanu jako nejméně vhodná. Avšak podle LARSEN ET AL. (25) kofermentace slámy s listy cukrové řepy může sloužit jako metoda předúpravy, která zvyšuje produkci biometanu ze slámy. Zvýšení se pohybovalo v rozmezí 19–34 % po 9 měsících kofermentace v laboratorním pokusu a 18–32 % po 6 měsících kofermentace v pilotním pokusu (25).

Závěr

Z hlediska výsledků rozborů tří různých základních substrátů a jejich směsí pro produkci biometanu, zahrnujících různé varianty sklizňových zbytků cukrové řepy a směsí těchto sklizňových zbytků řepy a slámy, se jako nejlepší substrát pro produkci biometanu jeví varianta **hlava bez listů** díky vysokému obsahu cukrů a nízkému obsahu ligninu, což umožňuje rychlou fermentaci. Středně vhodné substráty jsou **hlava s listy** a **listy**, protože obsahují vyvážený poměr vlákniny, cukrů a dusíkatých látek. Nejméně vhodným substrátem je **sláma** kvůli vysokému obsahu ligninu, nízkému obsahu cukrů a nízké dostupnosti snadno fermentovatelných látek. Na základě výsledků fermentačních testů lze konstatovat, že substrát **hlava s listy** je optimální pro maximalizaci produkce biometanu, avšak substrát **hlava bez listů** poskytuje nejvyšší koncentraci biometanu v bioplynu. Kombinace **hlava s listy se slámou** se bez předúpravy ukázala pro produkci biometanu jako nejméně vhodná.

Článek vznikl za podpory projektu č. TS01020188 – Využití siláže vyrobené z „řepných skrojků a obilné slámy“ při kritickém nedostatku kukuřičné siláže.

Souhrn

Využití rostlinné biomasy v bioplynových stanicích představuje efektivní způsob produkce bioenergie. Jednou z možností je zužitkování rostlinných zbytků cukrové řepy vznikajících při výrobě cukru – řepných skrojků. V rámci našeho výzkumu byly provedeny fermentační testy čtyř variant substrátů: listy, hlava bez listů, hlava s listy a hlava s listy + sláma. Statistické zpracování výsledků ukázalo, že nejlepší substrát pro produkci biometanu je varianta hlava bez listů, která se vyznačuje vysokým obsahem cukrů a nízkým obsahem ligninu, což urychluje proces fermentace. Dalšími částečně vhodnými substráty jsou hlava s listy a listy, zatímco nejméně vhodným substrátem je sláma, kvůli vysokému obsahu ligninu a nízkému obsahu cukrů. Nejvyšší koncentrace biometanu v bioplynu byla tedy dosažena u substrátu hlava bez listů, zatímco nejnižší koncentraci poskytla kombinace hlava s listy + sláma.

Klíčová slova: řepné skrojky, fermentace, biometan, cukry, vláknina, lignin.

Literatura

1. NAZIR, M. S. ET AL.: Environmental impacts and risk factors of renewable energy paradigm—a review. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 27, 2020, s. 33516–33526, doi:10.1007/s11356-020-09751-8.
2. BUCHHOLZ, B.; STYCZYŃSKI, Z.: Smart Grids Worldwide. In *Smart Grids*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2020, s. 367–408. ISBN 978-3-662-60930-9.
3. TAUFIQ-YAP, Y. ET AL.: Sustainable Production of Bioenergy. In *Innovations in Sustainable Energy and Cleaner Environment*. Berlin: Springer, 2020, s. 541–561, ISBN 978-981-13-9012-8.
4. FIELD, C. B.; CAMPBELL, J. E.; LOBELL, D. B.: Biomass energy: the scale of the potential resource. *Trends Ecol. Evol.*, 23, 2008 (2), s. 65–72, doi:10.1016/j.tree.2007.12.001.
5. HASEGAWA, T. ET AL.: A global dataset for the projected impacts of climate change on four major crops. *Sci Data*, 9, 2022 (58), s. 1–11, doi:10.1038/s41597-022-01150-7.
6. LIU, Z. ET AL.: Sustainability assessment of straw utilization circulation modes based on the emergent ecological footprint. *Ecol. Indic.*, 75, 2017, s. 1–7, doi:10.1016/j.ecolind.2016.12.024.
7. BRUINSMA, J.: *World Agriculture: Towards 2015/2030: An FAO Perspective*. London: Earthscan Publications Ltd, 2003, 432 s., ISBN 9251048355.
8. ALEXANDRATOS, N.; BRUINSMA, J.: World agriculture towards 2030/2050: The 2012 Revision (2022). FAO, [online] <https://www.fao.org/4/ap106e/ap106e.pdf>.
9. *Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development*. UN General Assembly, 2015. [online] <https://www.refworld.org/legal/resolution/unga/2015/en/111816>.
10. HARDY, R. W. F.: The Bio-based Economy. *Trends in new crops and new uses*, 2002, s. 11–16.
11. DU, C. ET AL.: Valorization of food waste into biofertiliser and its field application. *J. Clean. Prod.*, 187, 2018, s. 273–284, doi:10.1016/j.jclepro.2018.03.211.
12. O'CONNOR, S. ET AL.: Biogas production from small-scale anaerobic digestion plants on European farms. *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 139, 2021, 110580, doi:10.1016/j.rser.2020.110580.
13. LUKAS, V. ET AL.: Význam variabilní aplikace fosforečných a draselných hnojiv u cukrové řepy. *Listy cukrov. řepář.*, 137, 2021 (12), s. 417–422.
14. DANISE, T.; FIORETTA, A.; INNANGI, M.: Spectrophotometric methods for lignin and cellulose in forest soils as predictors for humic substances. *Eur. J. Soil Sci.*, 69, 2018 (5), s. 856–867, doi:10.1111/ejss.12678.
15. KÖGEL-KNABNER, I.: The macromolecular organic composition of plant and microbial residues as inputs to soil organic matter. *Soil Biol. Biochem.*, 34, 2002 (2), s. 139–162, doi:10.1016/S0038-0717(01)00158-4.
16. ZOGLAMI, A.; PAES, G.: Lignocellulosic Biomass: Understanding Recalcitrance and Predicting Hydrolysis. *Front. Chem.*, 7, 2019 (874), s. 1–11, doi:10.3389/fchem.2019.00874.
17. THIRUNAVUKKARASU, A. ET AL.: Unraveling the dynamics of lignin chemistry on decomposition to understand its contribution to soil organic matter accumulation. *Plant Soil*, 2024, doi:10.1007/s11104-024-07066-y.
18. LEHMANN, J.; KLEBER, M.: The contentious nature of soil organic matter. *Nature*, 528, 2015, s. 60–68, doi:10.1038/nature16069.
19. ANGST, G. ET AL.: Plant- or microbial-derived? A review on the molecular composition of stabilized soil organic matter. *Soil Biology and Biochemistry*, 156, 2021, 108189, doi:10.1016/j.soilbio.2021.108189.
20. EBRAHIMI, P.; KHAMIRIKAR, F.; LANTE, A.: Unlocking the biorefinery approaches to valorize sugar beet leaves (*B. Vulgaris* L.) for food industry applications: A critical review. *Food Res. Int.*, 197, 2024 (part 1), 115145, doi:10.1016/j.foodres.2024.115145.
21. MEMON, Y. M.; KHAN, I.; PANHWAR, R. N.: Adoptability performance of some exotic sugarbeet varieties under agro-climatic conditions of Thatta. *Pakistan Sugar J.*, 19.6, 2004, s. 42–46.
22. JÚŽL, M.; ELZNER, P.: *Pěstování okopanin*. Brno: Mendelova univerzita v Brně, 2014, 100 s., ISBN 978-80-7509-193-3.
23. TEJCHMANOVÁ, P. ET AL.: Melasové výpalky – perspektivní substrát pro produkci biometanu. *Listy cukrov. řepář.*, 138, 2022 (1), s. 19–22.
24. JAMEEL, M. K. ET AL.: Biogas: Production, properties, applications, economic and challenges: A review. *Results Chem.*, 7, 2024, 101549, doi:10.1016/j.rechem.2024.101549.
25. LARSEN, S. U. ET AL.: Co-ensiling of straw with sugar beet leaves increases the methane yield from straw. *Bioresour. Technol.*, 245, 2017 (part A), s. 106–115, doi:10.1016/j.biortech.2017.08.117.
26. DAI, X. ET AL.: Biomethane production by typical straw anaerobic digestion: Deep insights of material compositions and surface properties. *Bioresour. Technol.*, 313, 2020, 123643, doi:10.1016/j.biortech.2020.123643.
27. KINTL, A. ET AL.: Possibilities of Using White Sweetclover Grown in Mixture with Maize for Biomethane Production. *Agronomy*, 10, 2020 (9), 1407, doi:10.3390/agronomy10091407.
28. KINTL, A. ET AL.: Using the Mixed Culture of Fodder Mallow (*Malva verticillata* L.) and White Sweet Clover (*Melilotus albus* Medik.) for Methane Production. *Fermentation*, 8, 2022 (3), s. 94, doi:10.3390/fermentation8030094.
29. VÍTEZ, T. ET AL.: The Digestion of Waste from Vegetables and Maize Processing. *Waste Biomass Valor.*, 11, 2020 (6), s. 2467–2473, doi:10.1007/s12649-019-00583-3.
30. VÍTEZ, T. ET AL.: Impact of Maize Harvest Techniques on Biomethane Production. *Bioenerg. Res.*, 14, 2021 (1), s. 303–312, doi:10.1007/s12155-020-10173-0.
31. KINTL, A.; HUŇADY, I.; SOBOTKOVÁ, J.: Netradiční druhy píce k produkci bioplynu. *Agromanuál*, 18, 2023 (9–10), s. 99–101.
32. THEURETZBACHER, F. ET AL.: The effect of a combined biological and thermo-mechanical pretreatment of wheat straw on energy yields in coupled ethanol and methane generation. *Bioresour. Technol.*, 194, 2015, s. 7–13, doi:10.1016/j.biortech.2015.06.093.
33. SAWATDEENARUNAT, C. ET AL.: Anaerobic digestion of lignocellulosic biomass: Challenges and opportunities. *Bioresour. Technol.*, 178, 2015, s. 178–186, doi:10.1016/j.biortech.2014.09.103.
34. MÖLLER, H. B.; SOMMER, S. G.; AHRING, B. K.: Methane productivity of manure, straw and solid fractions of manure. *Biomass Bioenerg.*, 26, 2004 (5), s. 485–495.
35. HERRMANN, A.; RATH, J.: Biogas Production from Maize: Current State, Challenges, and Prospects. 1. Methane Yield Potential. *BioEnergy Res.*, 5, 2012, s. 1027–1042, doi: 10.1007/s12155-012-9202-6.
36. OSLAJ, M.; MURSEC, B.; VINDIS, P.: Biogas production from maize hybrids. *Biomass Bioenerg.*, 34, 2010 (11), s. 1538–1545, doi:10.1016/j.biombioe.2010.04.016.
37. WEISSBACH, F.: Gas production potential of fresh and ensiled sugar beets in biogas production. *Landtechnik*, 64, 2009 (6), s. 394–397.
38. SIKORA, J.; NIEMIEC, M.; SZELĄG-SIKORA, A.: Use of sugar beet leaves for biogas production. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*, 61, 2016 (4), s. 151–155.
39. SINGH, K. ET AL.: Fermentation pattern and changes in cell wall constituents of straw-forage silages, straws and partners during storage. *Anim. Feed Sci. Tech.*, 61, 1996 (1–4), s. 137–153, doi:10.1016/0377-8401(96)00953-4.
40. KREUGER, E.; NGES, I. A.; BJÖRNSSON, L.: Ensiling of crops for biogas production: effects on methane yield and total solids determination. *Biotechnol. Biofuels*, 4, 2011 (44), s. 1–8, doi:10.1186/1754-6834-4-44.
41. FANG, C.; BOE, K.; ANGELIDAKI, I.: Anaerobic co-digestion of by-products from sugar production with cow manure. *Water Res.*, 45, 2011 (11), s. 3473–3480, doi:10.1016/j.watres.2011.04.008.
42. BADGER, D. M.; BOGUE, M. J.; STEWART, D. J.: Biogas production from crops and organic wastes. 1. Results of batch digestions. *New Zealand J. Sci.*, 22, 1979 (1), s. 11–20.
43. HUTNAN, M.; DRTEL, M.; MRAFKOVÁ, L.: Anaerobic biodegradation of sugar beet pulp. *Biodegradation*, 11, 2000, s. 203–211, doi:10.1023/A:1011139621329.

44. DEMIREL, B.; SCHERER, P.: Production of methane from sugar beet silage without manure addition by a single-stage anaerobic digestion process. *Biomass Bioenerg.*, 32, 2008 (3), s. 203–209, doi:10.1016/j.biombioe.2007.09.011.
45. MUŽÍK, O.; KÁRA, J.; HANZLÍKOVÁ, I.: Potential of sugar beet pulp for biogas production. *Listy cukrov. řepář.*, 128, 2012 (7–8), s. 246–249.
46. RATAJ, D.: *Vliv substrátu na výkon bioplynové stanice*. České Budějovice, 2013, 89 s., Diplomová práce na Katedře rostlinné výroby a agroekologie na Jihočeské univerzitě v Č. Budějovicích.
47. DOHÁNYOS, M.: *Problematika řízení a kontroly bioplynových stanic*. Česká bioplynová asociace, 2007, [online] <https://www.czba.cz/problematika-rizeni-a-kontroly-bioplynovych-stanic.html>.

Sobotková J., Kintl A., Huňady I., Elbl J., Malíček O., Koutný T., Suchý P., Vičíková M., Vítěz T.: Production of Biomethane from Fresh Sugar Beet Tops with Added Straw

The use of plant biomass in biogas plants represents an efficient method of producing bioenergy. One option is the use of beet plant residues from sugar production – sugar beet tops. In our research, fermentation tests of four substrate variants were performed: leaves, top without leaves, top with leaves and top with leaves + straw.

Statistical processing of results showed that the substrate variant best suitable for the production of biomethane is top without leaves, as it exhibits high content of sugars and low content of lignin, both accelerating the process of fermentation. Other partially suitable substrates are top with leaves and leaves with straw being the least suitable substrate due to its high content of lignin and low content of sugar. The highest concentration of biomethane in biogas was achieved with the substrate top without leaves, while the lowest concentration was recorded with the combination of top with leaves + straw.

Key words: sugar beet tops, fermentation, biomethane, sugars, fibre, lignin.

Kontaktní adresa – Contact address:

Ing. Jakub Elbl, Ph. D., Mendelova univerzita v Brně, Agronomická fakulta, Ústav agrosystémů a bioklimatologie, Zemědělská 1, 613 00, Brno, Česká republika, e-mail: jakub.elbl@mendelu.cz