

Торайғыров университетінің хабаршысы
ҒЫЛЫМИ ЖУРНАЛЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайғыров университета

Торайғыров университетінің ХАБАРШЫСЫ

Энергетикалық сериясы
1997 жылдан бастап шығады



ВЕСТНИК Торайғыров университета

Энергетическая серия
Издается с 1997 года

ISSN 2710-3420

№ 4 (2025)

ПАВЛОДАР

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайгыров университета

Энергетическая серия
выходит 4 раза в год

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о постановке на переучет периодического печатного издания,
информационного агентства и сетевого издания

№ 14310-Ж

выдано

Министерство информации и общественного развития
Республики Казахстан

Тематическая направленность

публикация материалов в области электроэнергетики,
электротехнологии, автоматизации, автоматизированных и
информационных систем, электромеханики и теплоэнергетики

Подписной индекс – 76136

<https://doi.org/10.48081/GMYR4462>

Бас редакторы – главный редактор

Талипов О. М.

доктор PhD, ассоц. профессор (доцент)

Заместитель главного редактора

Калтаев А.Г., *доктор PhD*

Ответственный секретарь

Сағындық Ә.Б., *доктор PhD*

Редакция алқасы – Редакционная коллегия

Клецель М. Я.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Никифоров А. С.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Новожилов А. Н.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Никитин К. И.,	<i>д.т.н., профессор (Российская Федерация)</i>
Алиферов А. И.,	<i>д.т.н., профессор (Российская Федерация)</i>
Кошеков К. Т.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Приходько Е. В.,	<i>к.т.н., профессор</i>
Кислов А. П.,	<i>к.т.н., доцент</i>
Нефтисов А. В.,	<i>доктор PhD</i>
Шокубаева З. Ж.	<i>технический редактор</i>

За достоверность материалов и рекламы ответственность несут авторы и рекламодатели

Редакция оставляет за собой право на отклонение материалов

При использовании материалов журнала ссылка на «Вестник Торайгыров университета» обязательна

© Торайгыров университет

<https://doi.org/10.48081/TZWC7296>

***И. Б. Құлтан¹, Ұ. Б. Алихан², А. Жансерікқызы³,
Т. С. Торғаев⁴, З. Р. Құдайбергенов⁵**

^{1,2,3,4,5}Қорқыт Ата атындағы Қызылорда университеті,
Қазақстан Республикасы, Қызылорда қ.

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9485-0425>

²ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-6571-0348>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6164-6775>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-9048-7546>

⁵ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-6234-0520>

БИОГАЗДЫ АНАЭРОБТЫҚ АШЫТУ АРҚЫЛЫ ТҮСКЕН ЖАПЫРАҚТАРДАН АЛУ

Бұл мақалада жапырақты ағаштардың түскен жапырақтарын анаэробты ашыту арқылы биогаз өндірудің мүмкіндігі мен тиімділігі зерттеледі. Жапырақтар – көміртекке бай, бірақ азот мөлшері төмен органикалық қалдықтар. Олар дербес субстрат ретінде биогаз өндірісінде тиімсіз болғандықтан, сиыр көңімен бірге-ашыту (ко-ашыту) әдісі қолданылды. Эксперименттер әртүрлі көлемдегі және құрылымдағы үш биореакторда жүргізілді: 2 литрлік пластикалық ыдыс, OxiTop® биореакторы және 20 литрлік көлемдегі пластикалық бөтелкелер. Зерттеу барысында субстраттың ұсақталу деңгейі, инокулянт қатынасы, температуралық режимдер, рН көрсеткіштері және жалпы қатты заттардың мөлшері (TS) бақыланды. Ең жоғары биогаз ($0,641 \text{ м}^3/\text{кг VS}$) және метан шығымы ($0,368 \text{ м}^3/\text{кг VS}$) 20 литрлік реакторда алынды. Бұл үлкен көлемдегі реакторлардың микробтық белсенділік пен процесің тұрақтылығына оң әсер ететінін көрсетті. Сонымен қатар, ко-ашыту процесің бұхерлік қабілетін жақсартып, ашыту ортасының қышқылдануын болдырмады. Алынған нәтижелер түскен жапырақтарды жаңартылатын энергия көзіне айналдырудың жоғары әлеуетін көрсетіп, биогаз өндіру саласында экологиялық тұрғыдан тиімді және масштабталатын шешімдерді ұсынуға негіз болады. Ұсынылған деректер ауылдық және қала маңындағы аймақтарда ауқымды биогаз

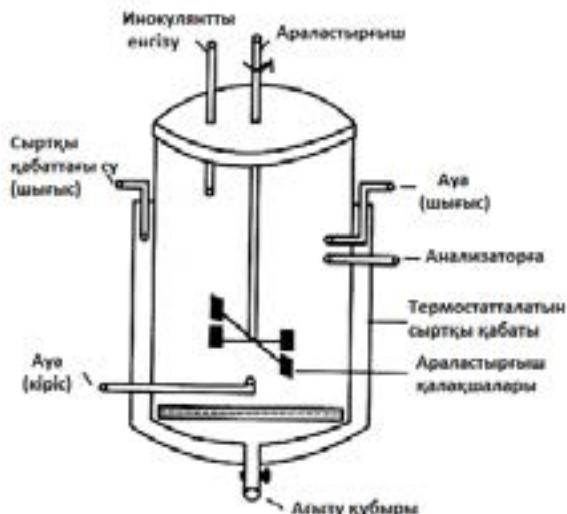
қондырғыларын әзірлеу үшін пайдаланылуы мүмкін, бұл қалдықтарды кәдеге жаратуға және жергілікті энергетиканы дамытуға ықпал етеді.

Кілтті сөздер: биогаз, анаэробты ашыту, биореактор, биохимиялық метан әлеуеті, энергетикалық тұрақтылық, органикалық қалдықтар.

Кіріспе

Жаңартылатын энергия көздері климаттың өзгеруі мен тұрақты энергетикалық шешімдерге қажеттілік мәселелерімен бетпе-бет келген сайын барған сайын маңызды бола түсуде. Анаэробты ашыту нәтижесінде өндірілетін биогаз – бұл таза және жаңартылатын энергия көзі, ол парниктік газдардың шығарылуын азайтады және тұрақты энергетикалық жүйе құруға ықпал етеді. Сонымен қатар, биогаз және басқа да жаңартылатын энергетикалық жүйелердің дамуы жергілікті экономикалық өсуге ынталандыру жасай алады және ауылды жерлерде жұмыс орындарын құруға ықпал етеді [1, 5026–5033-66.]. Жапырақты ағаштардың түскен жапырақтары да биогаз өндіру үшін субстрат ретінде пайдаланылуы мүмкін. Бұл қазіргі уақытта энергия өндіру үшін дерлік пайдаланылмайтын елеулі биогендік қалдықтар болып табылады. Бұл жапырақтарды жыл сайын жинау қажет, өйткені бұл эвтрофикация, құбырлардың немесе көше дренаждарының бітелуі, сондай-ақ шіріп жатқан жапырақтардан болатын тайғақ жолдардан туындайтын апаттар қаупін болдырмауға мүмкіндік береді [2, 355-б.].

Жапырақтардағы органикалық заттар бірлескен жүйелерінде бір субстрат түрі ретінде немесе бірқатар түрлер ретінде бірге ашытуға өңделуі мүмкін. Қазіргі уақытта бірге ашыту артықшылықты болып табылады, себебі бір-бірімен ашытылатын әртүрлі субстрат түрлері биогазды тиімді өндіру үшін қажетті көміртегі мен азоттың (C/N) дұрыс қатынасын, сілтілік қасиеттерді, жалпы қатты заттар (TS) құрамын және рН-ды қамтамасыз етеді [2, 355-б.]. Анаэробты ашыту үшін түскен жапырақтарды өңдеу биореакторының схемасы 1-суретте көрсетілген.



1-сурет – Түскен жапырақтарды анаэробты ашытуға арналған биореактордың принципіалды схемасы

Келесі маңызды қадам биогаз өндіруде қоспаның компоненттерінің оңтайлы қатынасын анықтау болып табылады [3, 173–178-бб.]. Себебі, жапырақтар көміртегі/азот (C/N) қатынасының жоғары болуымен ерекшеленеді, бұл олардың ыдырауын қиындатады. Бұл метан шығымының тиімділігін төмендетеді және процесс аз өнімді болады. Басқа қалдықтармен араластыру түскен жапырақтардан биогаз алу үшін ең тиімді және болашағы зор тәсілдер болып табылады.

Ко-ашыту – бірнеше түрдегі субстраттардың бірге ашытылу процесі. Мұндай тәсіл биогаз шығымын арттыруға мүмкіндік береді, себебі микроорганизмдер әртүрлі компоненттерден қоректік заттар мен энергия көздерін пайдалана алады [4;5]. Сонымен қатар, ко-ашыту процесстің тұрақтылығын арттырып, ингибиторлық заттардан туындайтын оның бұзылу қаупін азайтады. Бұл сондай-ақ биогаз өндіруге қажетті жалпы шығындарды төмендетуі мүмкін, себебі қолжетімді жергілікті органикалық қалдықтардың кең спектрі пайдаланылады [6, 344-б.].

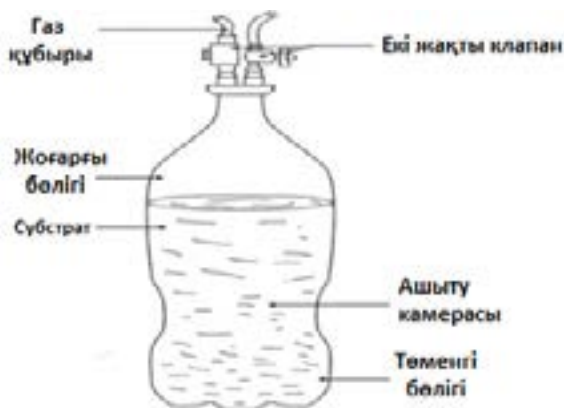
Материалдар мен әдістері

Түскен жапырақтарды анаэробты ашыту процесін зерттеу үшін әр түрлі ағаш түрлерінің, соның ішінде дуб, қайың және клён жапырақтары қолданылуы мүмкін. Жапырақтарды күз мезгілінде қалалық парктерден және ауылдық учаскелерден жинауға болады. Барлық жапырақтар алдын ала

қоқыс және бұтақтар сияқты бөгде ластанулардан тазартылып, кейін 1–2 см мөлшеріндегі бөлшектерге ұсақталады [7].

Түскен жапырақтарды ашыту процесінің тиімділігін бастапқы бағалау және биогаз қондырғысының жұмыс істеуінің оңтайлы параметрлерін анықтау үшін 2 литрлік пластикалық ыдыстан жасалған шағын модель пайдаланылып, эксперимент жүргізілді. Бұл модель толыққанды қондырғыны салмай-ақ алғашқы зерттеулер жүргізуге мүмкіндік берді және ашыту процесінің әртүрлі жағдайларын тексеріп, биогаз шығымын бағалауға қолданылды. Аталған эксперимент кейінірек үлкен көлемді биогаз қондырғыларын жобалаудың негізі болды [8, 46–55-66.].

Ашыту қондырғысының схемасы 2-суретте көрсетілген. Бөтелкенің қақпағында екі канал болды, әрбірі екі жолақты клапанға қосылған, бұл реактордан ауаны шығаруға және газ құрамын анықтау үшін талдағышқа қосылуға мүмкіндік берді.



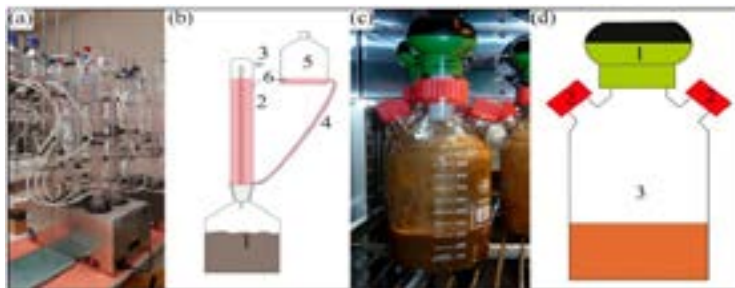
2-сурет – Ашыту үшін қондырғының схемалық диаграммасы

2-суретте анаэробты ашытуға арналған лабораториялық қондырғы көрсетілген: екі литрлік пластикалық бөтелке, қақпағында екі каналы бар. Бір канал екі жолақты клапанға қосылған, ол ауа шығаруға арналған, екіншісі биогаз құрамын өлшеу үшін газ талдағышқа қосылған. Реактор ішінде ұсақталған жапырақтар мен сиыр көңінің қоспасы орналасқан. Қондырғы герметикалық және анаэробты ашыту жағдайларын имитациялауға арналған.

OxiTop® биореакторы мен эвдиометрі бар түскен жапырақтарды ашыту эксперименті

Екі литрлік қондырғының алғашқы эксперименттерінен кейін ашыту процесінің тиімділігін нақты бағалау және биогаз параметрлерін өлшеу үшін

ОхіТор® биореакторы мен эвдиометрі қолданылды. Бұл жүйе тек ашыту процесінің параметрлерін жоғары дәлдікпен бақылауға мүмкіндік беріп қана қоймай, сонымен қатар түскен жапырақтарды анаэробты ыдыратуға қатысатын микроорганизмдердің газ бөлу динамикасы мен белсенділігі туралы кеңірек ақпарат берді.



3-сурет – Биохимиялық метан әлеуетін (BMP) анықтау

Биохимиялық метан әлеуетін (BMP) анықтау эксперименті: (a) Сұмоншасында эвдиометр жиынтығы, (b) Эвдиометр жиынтығы: 1 – инокулянт пен субстрат қоспасы бар шыны бөтелке (реактор); 2 – газды тасымалдау үшін ішкі шыны түтікшесі бар эвдиометр түтігі; 3 – газ үлгілерін алу үшін клапан; 4 – қосылу түтігі; 5 – қысым компенсациялау резервуары; 6 - шектеу сұйықтығы. (c) Термостаттық шкафтағы ОхіТор® биореакторы. (d) ОхіТор® биореакторы: 1 – өлшеу басы; 2 – бүйірлік қосылыстар; 3 – инокулянт пен субстрат қоспасы бар реактор.

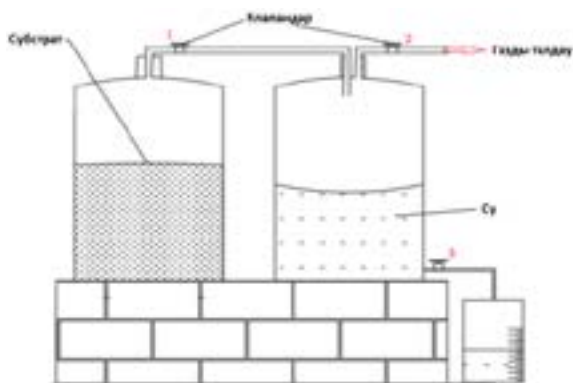
Құрғақ анаэробты ашыту (AD) технологиясында ОхіТор® биореакторлары (WTW, Вайльхайм, Германия) термостаттық инкубаторда 38 ± 1 °C температурада BMP тестін жүргізу үшін инкубацияланды. Субстраттар мен инокулянттар реакторларға ұшпалы қатты заттардың (VS) мазмұны бойынша 1:1 қатынасында қосылды. Реакторларда жалпы құрғақ заттың (TS) мөлшері 17 %-ды құрады. Анаэробты жағдайларды қамтамасыз ету үшін реакторлар 2 минут бойы азотпен үрленді. BMP тестілері үш қайталау бойынша жүргізілді, сонымен қатар тек инокулянт бар үш бақылау реакторы болды [9].

Эвдиометрлерде биогаз өндірісі көлемдік әдіспен өлшенді. ОхіТор® реакторларында биогаздың түзілуі әр 240 минут сайын, реактор ішіндегі қысымның өзгеруіне негізделіп бақыланды, бұл қысымды ОхіТор® өлшеу басы арқылы өлшеді (3-суретті қараңыз).

ОхіТор® биореакторы мен эвдиометрі бар эксперименттен кейін, түскен жапырақтарды ашыту процесін әрі қарай тестілеу және оңтайландыру үшін 20 литрлік екі мөлдір пластикалық бөтелкеден эксперимент өткізілді.

Бұл эксперимент периодты жүктеу әдісін қолдана отырып жүргізілді, бұл ашыту процестерін икемді бақылауға және қондырғының әртүрлі жұмыс режимдерінде динамикасын бағалауға мүмкіндік берді.

Эксперименттік қондырғы екі мөлдір пластикалық бөтелкеден тұрды, әрқайсысының көлемі 20 литр, биіктігі 39,7 см және диаметрі 25,4 см, олар реактор және су жинағыш бак ретінде қолданылды (4-сурет). Эксперименттер кезеңдік жүктеу әдісімен жүргізілді. Күнделікті талдау үшін жеткілікті биогаз мөлшерін алу мақсатында реактордың көлемі (12 л) және субстрат мөлшері ұлғайтылды. Барлық бөтелкелер субстратты жүктемес бұрын таза азотпен жуылып, M-Seal герметікімен тығыз жабылды. Реакторлардың барлық түрлері үшін инокулят ретінде ірі қара малдың нәжісі қолданылды. Инокулят пен субстраттың арақатынасы 1:4 болды. Реакторлар ыңғайлы аралықпен температурасы бақыланатын бөлмеге орналастырылып, 30 күн бойы ұсталды. Процесс температурасы 38–40 °C аралығында ұсталды, ал TS концентрациясы 8–10 % аралығында болды. Мезофильді жағдайлар қолданылды, себебі оларды ұстау жеңілірек әрі арзан, және көпшілік анаэробты реакторлар дәл осы жағдайда жұмыс істейді. Субстраттың pH мәндері сандық pH-метрмен (INSIF ELECTRONICS IE-702) анықталды. Қалған шарттар барлық реакторларда бірдей болды. Биогаздың көлемі су ауыстыру әдісімен өлшенді. Көрсеткіштер стандартты температура (0°C) және қысым (1 атм) жағдайларына сәйкес түзетілді [10, 148–159-66.].



4-сурет – Эксперименттік қондырғының схемасы

Клапан 1 газ сынамасын алу кезінде мұқият жабық күйде қалды. Биогазды күнделікті алу үшін су жинағыштан клапан 2 арқылы алынды. Су құю кезінде клапан 2 арқылы клапан 1 және 3 жабық болды. Екі 20 литрлік пластикалық бөтелкелерді периодтық жүктеу әдісімен пайдалану тәжірибесі

бұл әдістің түскен жапырақтарды ыдырату процесін жақсартуда тиімді екенін көрсетті. Периодтық жүктеу метаноген микроорганизмдерінің тұрақты белсенділігін сақтауға мүмкіндік беріп, метан газын жоғары мөлшерде алуға септігін тигізді. Эксперименттің нәтижелері бұл әдістің ірі биогаз қондырғыларында қолданылуының мүмкіндігін растап, өсімдік қалдықтарын ыдырату процесін оңтайландыру үшін жаңа деректер ұсынуда.

Нәтижелер және талқылау

Әр түрлі биореактор модельдерін пайдалану арқылы жүргізілген тәжірибелердің негізінде келесі деректер алынған: түскен жапырақтарды анаэробты ыдырату процесінде бөлінген биогаздың көлемі 1-кестеде:

1-кесте – Үш түрлі тәжірибенің талдау кестесі

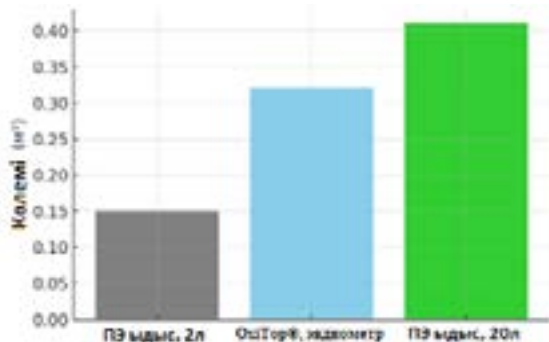
Сыни шарттар	Биогаз шығымы, мл/г	Метанның үлесі, %
ПЭ ыдыс, 2 л	Көң:жапырақ = 1:1, 38 °С	270
ОxіТор®, эвдиометр	Көң:жапырақ = 1:1, 38°С, TS=17 %	310
ПЭ ыдыс, 20 л	Көң:жапырақ = 1:4, 38–40 °С, TS=10 %	380

Талдау нәтижелері бойынша биогаздың ең жоғары шығымы (380 мл/г) 20 литрлік бөтелкелерді қолданған кезде алынған, бұл оңтайлы жүктеу режимімен, көлемімен және тұрақты температуралық жағдайлармен түсіндіріледі. Реактор көлемінің және субстрат концентрациясының (TS шамамен 10 %) ұлғаюы микробтық белсенділікті жақсартып, метан шығымын арттырды.

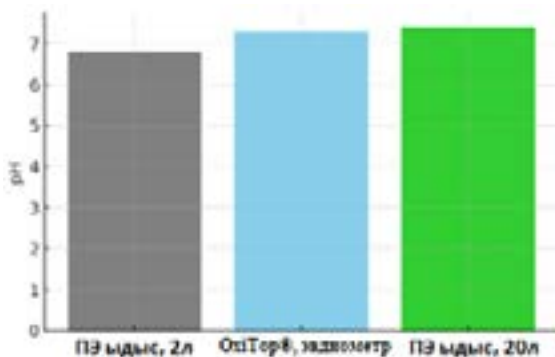
ОxіТор® құрылғысымен жүргізілген эксперименттер параметрлердің жоғары дәлдігін және тұрақтылығын көрсетті, бұл биохимиялық метан потенциалын (BMP) бағалауға мүмкіндік берді. Бұл жағдайда метан шығымы 58 %-ға жетіп, әдістің тиімділігін және оны ауқымды қолдану мүмкіндігін растады.

Сонымен қатар, көңмен бірге-ашыту (ко-брожение) кезінде ортаның буферлік қабілетінің жақсарғаны, қышқылдықтың төмендегені және процестің тұрақтылығының артқаны байқалды. Бұл көң мен лигноцеллюлозалық материалдардың үйлесімінде синергетикалық әсер болатынын көрсететін бұрын жарияланған деректерді растайды.

Сондай-ақ, ірі бөтелкелі реакторларда кезеңдік жүктеу әдісін қолдану метаногендердің белсенді дамуына ықпал етеді, ортаның қышқылдануын болдырмайды және эксперимент бойы биогаздың тұрақты түзілуін қамтамасыз етеді.



5-сурет – Метан потенциалының салыстырмасы (м³/кг VS)



6-сурет – Өртүрлі қондырғылардағы pH деңгейі
5-суретте биогаздың меншікті шығымы (м³/кг VS)

Бұл график субстраттағы ұшпа заттардың (VS) массасына шаққандағы газ түзілуінің тиімділігін көрсетеді.

20 литрлік қондырғы ең жоғары меншікті өнімділікті көрсетті – 0,641 м³/кг VS,

OxiTop® жүйесі – шамамен 0,3 м³/кг VS,

2 литрлік модель – 0,26 м³/кг VS.

Бұл нәтижелер ірі қондырғылардың органикалық заттардың ыдырауы мен микрофлораның тұрақтануы үшін қолайлы жағдай жасайтынын растайды.

6-суретте субстраттың қышқылдық деңгейі

Графикте үш түрлі эксперименттегі жиынтық биогаз шығымының салыстырмасы берілген:

– 2 литрлік реактор негізіндегі модель,

- эвдиометрлері бар OxiTop® реакторлары,
- екі 20 литрлік пластикалық бөтелкеден тұратын қондырғы.

Ең үлкен биогаз көлемі (528 литрге дейін) 20 литрлік қондырғыда тіркелді. Бұл нәтиже жүктелген субстрат көлемінің көп болуымен және процестің тұрақты жүруімен түсіндіріледі. Кіші қондырғыларда биогаз көлемі аз болғанымен, нәтижелер меншікті көрсеткіштер тұрғысынан бағалануы тиіс.

Метанның меншікті шығымы ($\text{м}^3/\text{кг VS}$) әртүрлі жағдайларда метан шығымының меншікті көрсеткіштері салыстырылды:

Ең жоғары метан шығымы – $0,368 \text{ м}^3/\text{кг VS}$ – 20 литрлік қондырғыда тіркелді,

OxiTop® жүйесі шамамен $0,25 \text{ м}^3/\text{кг VS}$ көрсетті,

Ең төменгі нәтиже – $0,113 \text{ м}^3/\text{кг VS}$ – 2 литрлік модельге тиесілі.

Бұл көрсеткіш биогаздың энергетикалық әлеуеті тұрғысынан ең маңыздысы болып табылады. Нәтижелер көрсеткендей, жалпы газ көлемі аз болғанымен, OxiTop® қондырғысы метан түзілуінің жоғары тиімділігін көрсетті.

Қорытынды

Жүргізілген зерттеулер жапырақты ағаштардың түскен жапырақтарын анаэробты ашыту процесінде субстрат ретінде пайдаланудың тиімділігін көрсетті. Биогаз бен метанның ең жоғары шығымы үлкен көлемді реакторларда кезеңдік жүктеу әдісімен алынған, бұл жылу реттелуінің тұрақтылығымен, субстраттың біркелкі таралуымен және микробтық белсенділіктің жоғарылауымен түсіндіріледі.

Түскен жапырақтарды көң сияқты органикалық қалдықтармен бірге ашыту ортаның буферлік қасиетін жақсартты, қышқылдану қаупін азайтты және метан шығымын арттырды. Бұл – бірге ашыту кезіндегі синергетикалық әсердің тәжірибе жүзінде расталғанын білдіреді.

Алынған нәтижелер өсімдік қалдықтарын өңдеп, жаңартылатын биоотын өндіруге бағытталған масштабталатын және энергия үнемдейтін шешімдерді әзірлеуге негіз бола алады. Болашақта бұл технологияның параметрлерін оңтайландыру және техникo-экономикалық тиімділігін бағалау бойынша қосымша зерттеулер жүргізу қажет.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ДЕРЕКТЕР ТІЗІМІ

1 **Rahman, M. S., Majumder, M. K., Sujan, M.H.K.** «Adoption determinants of biogas and its impact on poverty in Bangladesh.» Energy Reports, Vol. 7. – P. 5026 5033. – Nov. 2021. – <https://doi.org/10.1016/J.EGYR.2021.08.027>

2 **Elif Gulsen Akbay, H.** Anaerobic Mono and Co-Digestion of Agro-Industrial Waste and Municipal Sewage Sludge: Biogas Production Potential,

Kinetic Modelling, and Digestate Characteristics. *Fuel* 2024. – 355. – 129468 – <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.129468>

3 Jena, S. P., Mishra, S., Acharya, S. K., Mishra, S. K. «An experimental approach to produce biogas from semi dried banana leaves,» *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. – Vol. 19. – P. 173–178. – Feb. 2017. – <https://doi.org/10.1016/j.seta.2017.01.001>

4 Hagos, K., Zong, J., Li, D., Liu, C., Lu, X. «Anaerobic co-digestion process for biogas production: Progress, challenges and perspectives,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – Vol. 76. – P. 1485–1496. – Sep. 2017 – <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.184>

5 Pavi, S., Kramer, L. E., Gomes, L. P., Miranda, L. A. S. «Biogas production from co-digestion of organic fraction of municipal solid waste and fruit and vegetable waste» *Bioresour Technol*. – Vol. 228. – P. 362–367. – Mar. 2017 – <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.01.003>

6 Kunatsa T., Xia, X. «A review on anaerobic digestion with focus on the role of biomass co-digestion, modelling and optimisation on biogas production and enhancement,» *Bioresour Technol*, Vol. 344. – P. 126311. – Jan. 2022. – <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2021.126311>

7 DIN 38414-8; German Standard Methods for the Examination of Water, Waste Water and Sludge; Sludge and Sediments (Group S); Determination of the Amenability to Anaerobic Digestion (S 8). Deutsches Institut für Normung: Berlin, Germany. – 1985.

8 Wruss, J., Waldenberger, G., Huemer, S., Uygun, P., Lanzerstorfer, P., Müller, U., Höglinger, O., Weghuber, J. Compositional characteristics of commercial beetroot products and beetroot juice prepared from seven beetroot varieties grown in Upper Austria, *J. Food Compos. Anal.* 42 (2015) 46–55. – <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2015.03.005>

9 Leaf Those Leaves Alone! Leaving Fallen Leaves Brings Many Benefits for Nature, Says Scientist. [Electronic resource]. – <https://scienceinpoland.pl/en/news/news,79543,leaf-those-leaves-alone-leaving-fallen-leaves-brings-many-benefits-nature-says> (ac- cessed on 5 September 2024).

10 Chandra, R., Vijay, V. K., Subbarao, P. M. V., Khura, T. K. Production of methane from anaerobic digestion of jatropha and pongamia oil cakes // *Appl. Energy* 93 2012 . – P. 148–159. – <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.10.049>.

05.05.25 ж. баспаға түсті.

04.07.25 ж. түзетулерімен түсті.

05.12.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

*И. Б. Құлтан¹, У. Б. Алихан², А. Жансериккызы³,

Т. С. Торгаев⁴, З. Р. Кудайберген⁵

^{1,2,3,4,5}Қызылординский университет имени Коркыт Ата,

Республика Казахстан, г. Кызылорда.

Поступило в редакцию 05.05.25.

Поступило с исправлениями 04.07.25.

Принято в печать 05.12.25.

ПОЛУЧЕНИЕ БИОГАЗА АНАЭРОБНЫМ СБРАЖИВАНИЕМ ОТ ОПАВШИХ ЛИСТЬЕВ

В данной статье рассматриваются возможности и эффективность анаэробного сбраживания опавших листьев лиственных деревьев для производства биогаза. Листья богаты углеродом, но имеют низкое содержание азота, что делает их неэффективными в качестве единственного субстрата для получения биогаза. Поэтому была использована методика совместного сбраживания с коровьим навозом для балансировки соотношения C/N и повышения микробной активности. Эксперименты проводились с использованием трёх типов биореакторов: пластикового контейнера объёмом 2 литра, биореактора OxiTop® и пластиковых бутылей объёмом 20 литров. Контролировались такие параметры, как размер частиц субстрата, соотношение инокулянта, температурный режим, уровень pH и содержание общих твёрдых веществ (TS). Наибольший выход биогаза (0,641 м³/кг VS) и метана (0,368 м³/кг VS) был достигнут в установке объёмом 20 литров, что свидетельствует о благоприятных условиях для микробной активности и стабильности процесса. Совместное сбраживание также улучшило буферную способность среды, предотвратило закисление и обеспечило устойчивое образование газа. Полученные результаты демонстрируют высокий потенциал превращения опавших листьев в возобновляемый источник энергии и закладывают основу для разработки экологически эффективных и масштабируемых решений в области производства биогаза. Эти данные могут быть использованы для создания крупных биогазовых установок в сельских и пригородных районах, что способствует утилизации отходов и развитию местной энергетики.

Ключевые слова: биогаз, анаэробное сбраживание, биореактор, биохимический метановый потенциал, энергетическая устойчивость, органические отходы.

*I. B. Kultan¹, U. B. Alikhan², A. Zhanserikyzy³,

T. S. Torgaev⁴, Z. R. Kudaybergen⁵

^{1,2,3,4,5}Korkyt Ata Kyzylorda University,

Republic of Kazakhstan, Kyzylorda.

Received 05.05.25.

Received in revised form 04.07.25.

Accepted for publication 05.12.25.

PRODUCTION OF BIOGAS FROM FALLEN LEAVES THROUGH ANAEROBIC DIGESTION

This article explores the potential and efficiency of anaerobic digestion of fallen leaves from deciduous trees for biogas production. Leaves are rich in carbon but low in nitrogen, making them inefficient as a sole substrate for biogas generation. Therefore, a co-digestion method with cow manure was used to balance the C/N ratio and enhance microbial activity. Experiments were conducted using three types of bioreactors: a 2-liter plastic container, an OxiTop® bioreactor, and 20-liter plastic bottles. Parameters such as substrate particle size, inoculum ratio, temperature conditions, pH levels, and total solids (TS) content were carefully monitored. The highest biogas yield (0.641 m³/kg VS) and methane yield (0.368 m³/kg VS) were achieved in the 20-liter setup, indicating that larger-scale reactors provide better conditions for microbial activity and process stability. Additionally, co-digestion improved the buffering capacity of the medium, preventing acidification and promoting a more stable fermentation process. The obtained results demonstrate the high potential of converting fallen leaves into a renewable energy source and provide a foundation for offering environmentally efficient and scalable solutions in biogas production. These data can be used for the development of large-scale biogas plants in rural and suburban areas, contributing to waste management and the development of local energy systems.

Keywords: biogas, anaerobic digestion, bioreactor, biochemical methane potential, energy sustainability, organic waste.

Теруге 17.12.2025 ж. жіберілді. Басуға 30.12.2025 ж. қол қойылды.

Электронды баспа

29.9 Mb RAM

Шартты баспа табағы 22,2. Таралымы 300 дана. Бағасы келісім бойынша.

Компьютерде беттеген: А. К. Мыржикова

Корректор: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас

Тапсырыс № 4494

Сдано в набор 17.12.2025 г. Подписано в печать 30.12.2025 г.

Электронное издание

29.9 Mb RAM

Усл. печ. л. 22,2. Тираж 300 экз. Цена договорная.

Компьютерная верстка: А. К. Мыржикова

Корректор: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас

Заказ № 4494

«Toraighyrov University» баспасынан басылып шығарылған

Торайғыров университеті

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

«Toraighyrov University» баспасы

Торайғыров университеті

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

67-36-69

E-mail: kereku@tou.edu.kz

www.vestnik-energy.tou.edu.kz