

Представлення Аналітичної записки

«Виробництво передового біометану з лігноцелюлозної сировини»

Вебінар 26.06.2025

Пожнивні рештки як сировина для виробництва біометану: склад, методи та обладнання для попередньої підготовки та зброджування

Петро Кучерук, к.т.н.

Біоенергетична асоціація України

Визначення термінів

Директива (ЄС) 2018/2001 (RED III) надає наступні визначення для лігноцелюлозних матеріалів:

- **«лігноцелюлозний матеріал»** означає матеріал, що містить лігнін, целюлозу та геміцелюлозу, як-от біомаса, отримана з лісів, деревні енергетичні культури та побічні продукти і відходи лісової промисловості
- **«нехарчовий целюлозний матеріал»** означає сировину, що складається переважно з целюлози та геміцелюлози та має нижчий вміст лігніну, ніж лігноцелюлозний матеріал, включаючи **залишки харчових та кормових культур, такі як солома, стебла, лушпиння та шкаралупа**; трав'янисті енергетичні культури з низьким вмістом крохмалю, такі як райграс, просо, міскантус, гігантська тростина; покривні культури до та після основних культур; лейні культури; промислові залишки, включаючи залишки харчових та кормових культур після екстракції з них рослинних олій, цукрів, крохмалю та білку; та матеріали з біовідходів, де під лей культурами та покривними культурами розуміються такі, що вирощені як тимчасові на короткочасно засіяних пасовищах, і які містять суміш трав та бобових культур з низьким вмістом крохмалю, призначених для отримання корму для худоби та покращення родючості ґрунту з метою отримання вищих врожаїв основних сільськогосподарських культур

Пожнивні рештки включають широкий спектр рослинних залишків (солома, бадилля овочів тощо) з різними характеристиками, проте найбільшу частку в Україні становлять лігноцелюлозні типи, такі як солома та кукурудзиння. **Для цілей Аналітичної записки та даної презентації термін «пожнивні рештки» означатиме лігноцелюлозні типи пожнивних решток (солома, кукурудзиння).**

Основні види пожнивних решток в Україні

Культура	Тип пожнивних решток	Доступність пожнивних решток як сировини для виробництва біогазу
Пшениця, ячмінь	Солома	Переважно збирається з полів і має значний альтернативний попит в різних сферах (підстилковий матеріал, субстрат для вирощування грибів або компостування, біопаливо, тощо)
Кукурудза	Кукурудзиння (стебла, листя, обгортки качанів, волоті, качани)	Як правило залишається в полі і заорюється в ґрунт. Є приклади виробництва гранул з кукурудзиння. Переважно доступна сировина для біогазу
Соняшник	Стебла, кошики	Як правило залишається в полі і заорюється в ґрунт. Доступна сировина для біогазу
Ріпак	Стебла, стручки	Як правило залишається в полі і заорюється в ґрунт. Переважно доступна сировина для біогазу
Соя	Стебла, листя	Як правило залишається в полі і заорюється в ґрунт. Переважно доступна сировина для біогазу

Солома пшениці



Кукурудзиння в полі



Солома ріпаку в полі



Стебла соняшнику в полі



Характеристика поживних решток як сировини для виробництва біогазу

Вид	CP (%)	C:N	CEL	HCEL	LGN	Рівень гідрофобності
Солома пшениці	84-92	60-100	32-42	20-28	15-21	Високий
Кукурудзиння	72-84	45-65	34-45	22-30	12-18	Середньо високий
Стебла соняшнику	76-85 (*)	40-60	30-42	20-28	15-22	Середньо високий
Ріпакова солома	80-90	50-75	30-40	18-26	18-24	Середній
Солома сої	82-88	25-35	32-42	20-26	14-20	Низько середній

*після підсушування в полі

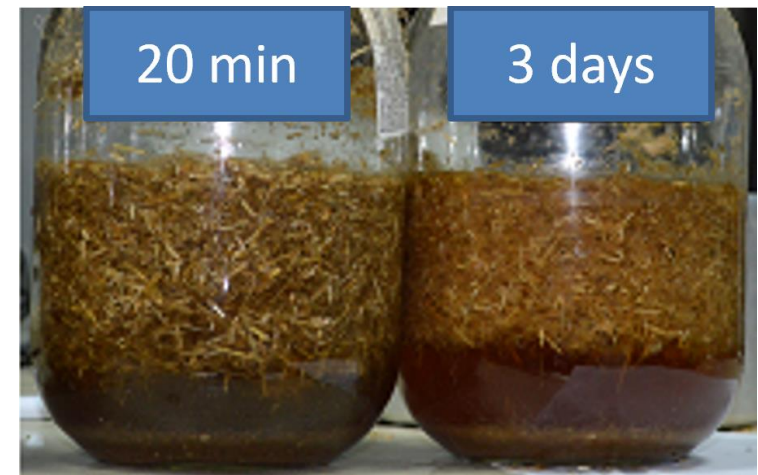
Ключові фактори, що впливають на виробництво біогазу

- ! Гідрофобність
- ! Не оптимальне (високе) C:N
- ! Високий вміст лігніну та низька біодоступність органічної речовини
- ! Низька вологість

Гідрофобність кутикули



Тест на змочуваність соломи



Підходи щодо усунення недоліків поживних решток як сировини для біогазу: зниження гідрофобності

Основні фактори, що обумовлюють гідрофобність

- високий вміст лігніну
- покриття поверхні восковою кутикулою
- кристалічність целюлози
- накопичення кремнезему (SiO_2)
- закриті клітинні структури

Основні методи зниження гідрофобності

Лужна обробка – руйнує лігнін та воски

Паро-вибухова обробка – відкриває клітинні стінки

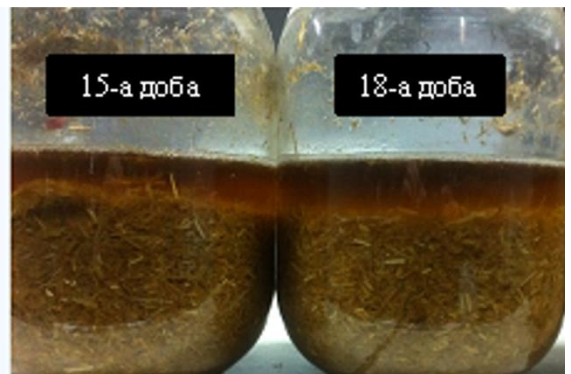
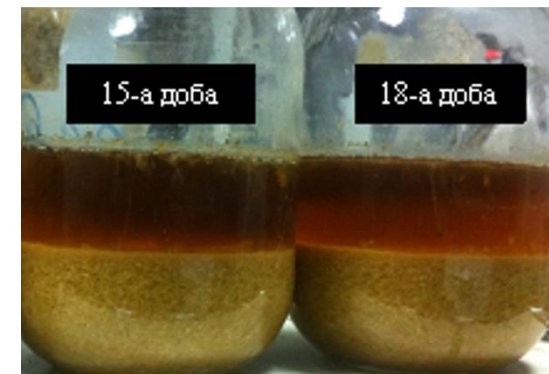
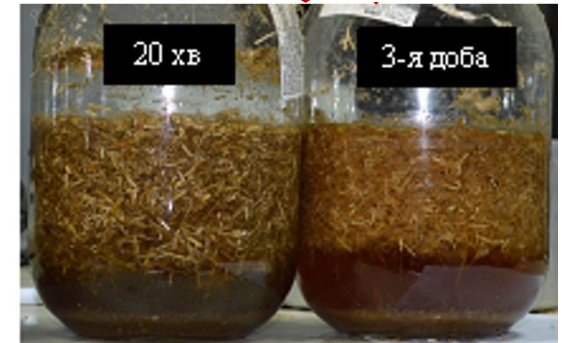
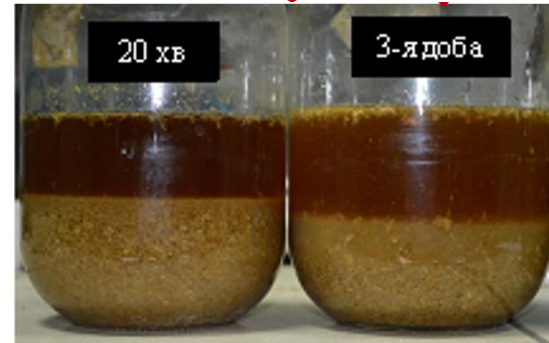
Біологічна обробка з допомогою грибів – розкладає лігнін

Механіко-термічна обробка (екструзія, гранулювання)

Товарна гранула з соломи



Механічно подрібнена солома $L_{\text{max}} = 30 \text{ мм}$



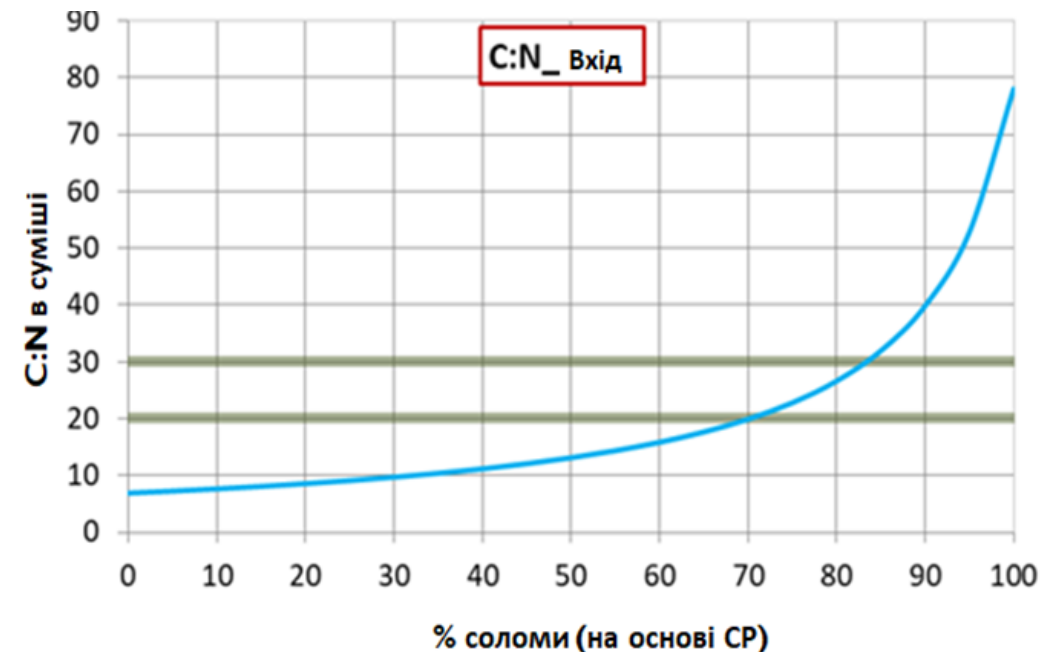
Підходи щодо усунення недоліків поживних решток як сировини для біогазу: оптимізація C:N

Можливі стратегії оптимізації величини C:N

- **Сумісне зброджування з ко-субстратами**, багатими на азот, напр., послід, барда, гноївка свиней
- **Попередня обробка грибками** (селективна біологічна делігніфікація)
- **Вилуговування водою або замочування**
- **Контрольована термічна обробка** (низькотемпературна гідротермальна обробка)
- **Лужна попередня обробка + розділення твердих/рідких речовин**
- **Додавання штучних азотних добрив**

Приклад оптимізації C:N за рахунок додавання посліду курячого

Параметр	Од. вим.	Значення	
		Курячий послід	Пелети з пшеничної соломи
Вміст CP	% сирової маси	30	91
Вміст COP	% CP	72	91
Вміст N	г N / кг COP	73,6	6
Вміст C	г C / кг COP	509	470
C:N	-	6,9	78,3



Підходи щодо усунення недоліків поживних решток як сировини для біогазу: підвищення біодоступності

Основні фактори, що обумовлюють низьку біодоступність

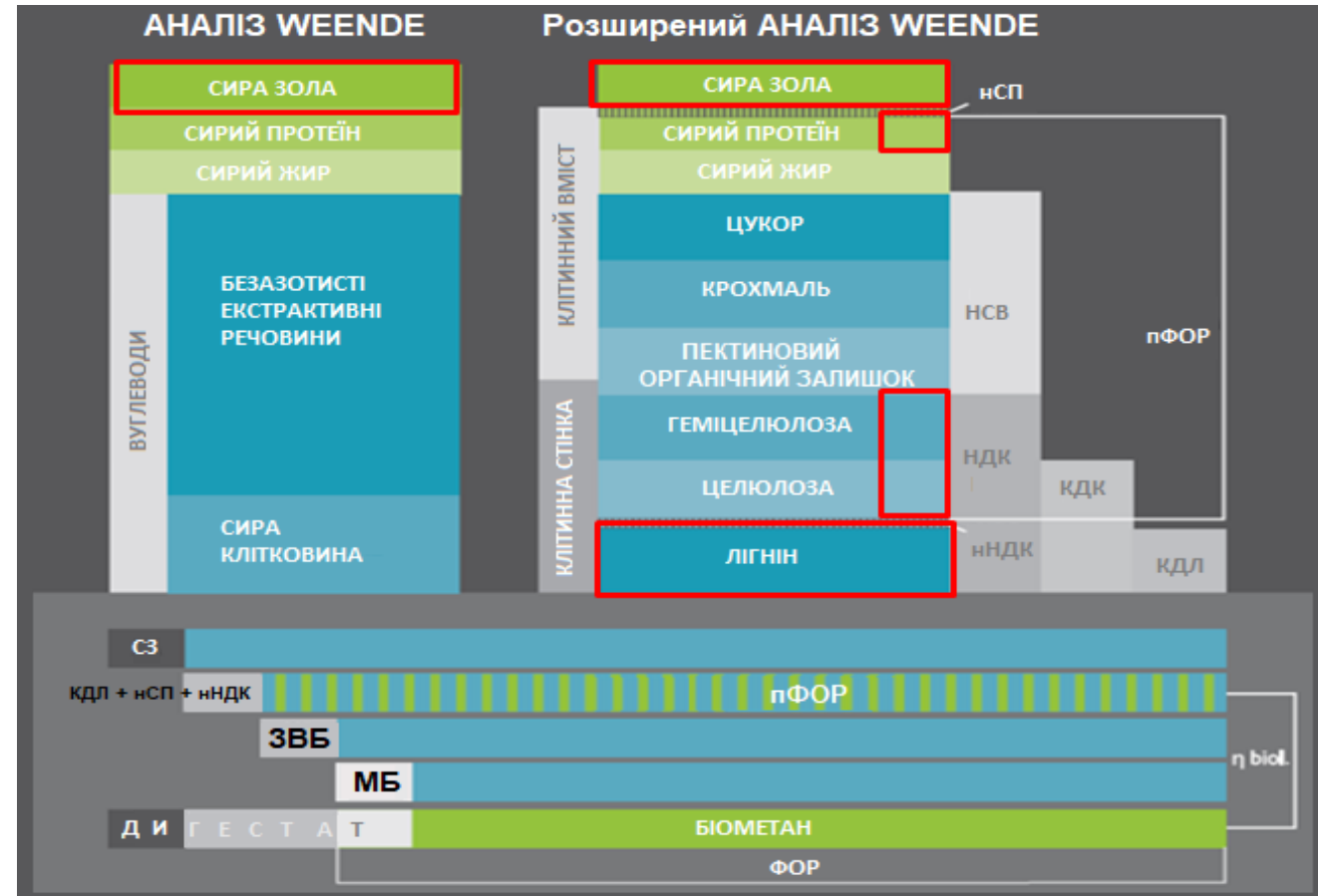
- Лігнін в процесі метанового бродіння не зброджується
- Закрита структура лігно-целюлозних комплексів перешкоджає доступу води та бактерій
- Частина сирого протеїну та (гемі)-целюлози також не зброджується

Рівень впливу різних методів попередньої обробки на біодоступність

Високотемпературна обробка під тиском, кавітаційні методи

Хімічна обробка, екструзія

Механічне подрібнення



пФОР - загальна потенційна здатність органічної речовини до зброджування
ФОР - фактично зброджувана органічна речовина
НДК - нейтрально детергентна клітковина
КДК - кислотно детергентна клітковина (целюлоза, лігнін)

НСВ - неструктурні вуглеводи
КДЛ - кислотно детергентний лігнін
нНДК- не зброджувана нейтрально детергентна клітковина
нСП – не зброджуваний сирий протеїн
ЗВБ – залишковий вихід біогазу
МБ – приріст бактеріальної маси

Підходи щодо усунення недоліків поживних решток як сировини для біогазу: **забезпечення вологою**

Основні стратегії вирішення питання низької вологості поживних решток при зброджуванні

- **Додавання свіжої води**
- **Рецикл рідкої фракції дигестату**
- **Рецикл рідкої фракції дигестату після попередньої обробки (освітлення, віддувка аміаку, тощо)**
- **Додавання ко-субстратів з більш високим вмістом води, напр., рідкої гноївки, барди, рідких виробничих стоків, тощо**
- **Вибір технологій «сухого» зброджування, що потребують менше води**

Приклад 1 забезпечення достатньої кількості води при додаванні **свіжої води** до соломи

Вхідні дані:

Вихідна вологість соломи: 15%

Цільовий вміст сухих речовин в біореакторі: $\leq 10\%$,

Результат:

Необхідно додати не менше **3,1 м³ води на 1 т соломи**

Для проєкту 5 млн нм³CH₄/рік → 74,6 тис. м³/рік води

Приклад 2 забезпечення достатньої кількості води при додаванні **гноївки свиней** до соломи

Вхідні дані:

Вихідна вологість соломи: 15%

Вологість гноївки свиней: 96%

Цільовий вміст сухих речовин в біореакторі: $\leq 10\%$,

Результат:

Необхідно додати не менше **3,9 м³ гноївки на 1 т соломи**

Для проєкту 5 млн нм³CH₄/рік → 77,5 тис. м³/рік гноївки зі свиноферми орієнтовно 15,7 тис. голів

Методи попередньої обробки та їх ефективність

Фізичні

- Механічні
- Термічні
- Ультразвукові
- Електрохімічні

Хімічні

- Лужні
- Кислотні
- Окислювальні

Біологічні

- Мікробіологічні
- Ферментні

Комбіновані

- Паровий вибух
- Екструзія
- Термохімічні

Метод	Де-кристалізація целюлози	Розпад гемі-целюлози	Розпад лігніну	Збільшення питомої поверхні
Біологічні методи				+
Подрібнення	+			+
Паровий вибух		+	+	+
Обробка концентрованою кислотою		+	+	+
Обробка розведеною кислотою		+		+
Лужна обробка		-	+	+
Екструзія				+
Символ плюс (+) вказує на те, що метод попередньої обробки має цей ефект, символ мінус (-) вказує на відсутність ефекту, а відсутність символу означає, що незрозуміло, чи є ефект, чи ні.				

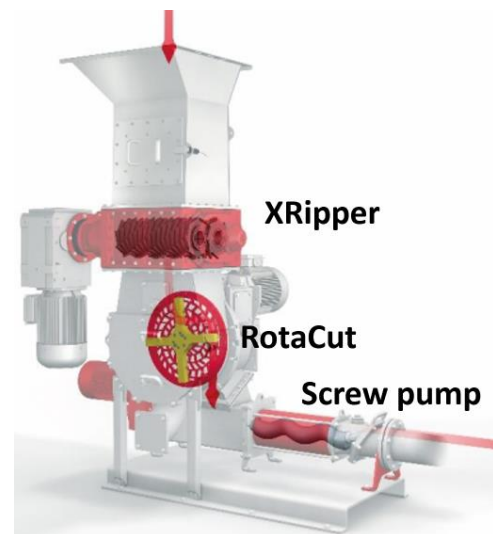
Процес	Переваги	Недоліки
Подрібнення	- збільшена площа поверхні - полегшена обробка субстрату - часто покращена плинність у біореакторі	- підвищене енергоспоживання - високі витрати на обслуговування / чутливість до каменів тощо.
Гаряча вода (TDH)	збільшує доступність для ензимів	- високе споживання тепла - ефективний лише до певної температури
Лужна обробка	розщеплює лігнін	- висока концентрація лугу в біореакторі - висока вартість хімікатів
Мікробний	низьке споживання енергії	- повільний процес - не розщеплює лігніну
Ензимний	низьке споживання енергії	- необхідність постійного додавання ензимів - висока вартість ензимів
Паровий вибух	розщеплює лігнін та розчиняє геміцелюлозу	- високе тепло- та електроспоживання - ефективний лише до певної температури
Екструзія	збільшує площу поверхні	- підвищене енергоспоживання - високі витрати на обслуговування / чутливість до каменів тощо.
Кислотна обробка	розчиняє геміцелюлозу	- висока вартість кислоти - проблеми з корозією - утворення інгібіторів, особливо при нагріванні

Приклади обладнання для обробки пожнивних решток

BIOEXTRUDER LEHMANN



VOGELSANG PREMIX



Комплекс підготовки соломи Euromilling / Lin-Ka



BIOCRUSHER BIO-G



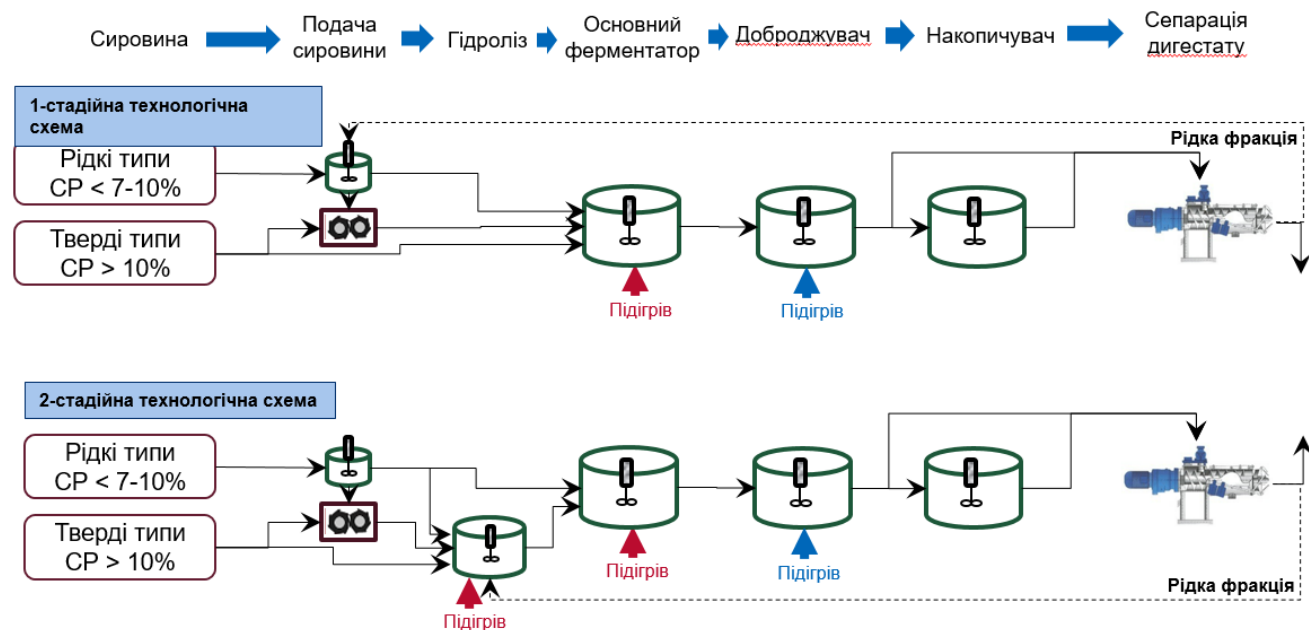
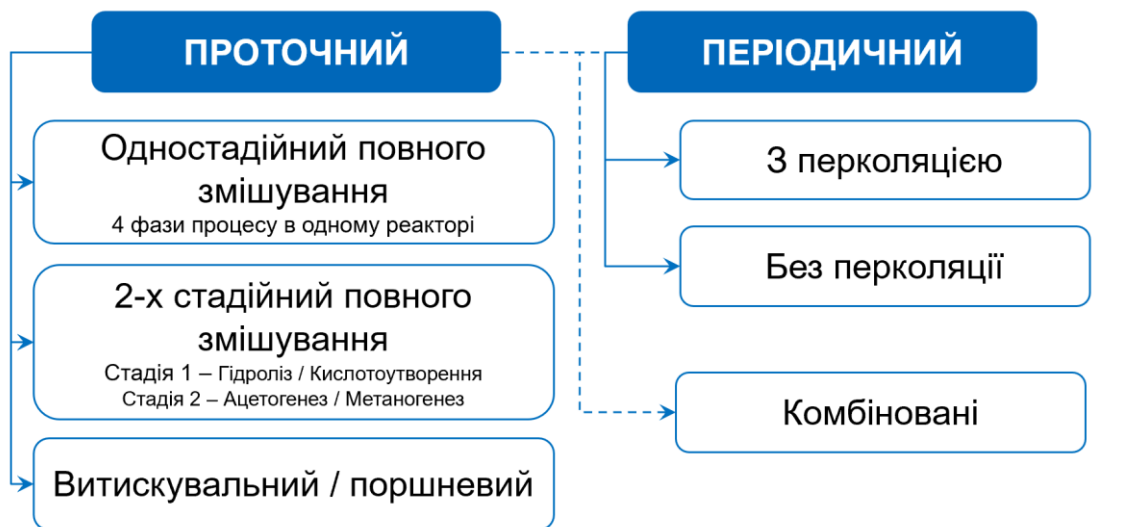
MAXXIMIZER MethaPlanet



BIOGRINDER MEBA

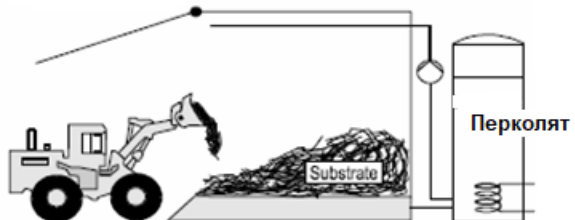


Технології анаеробного зброджування

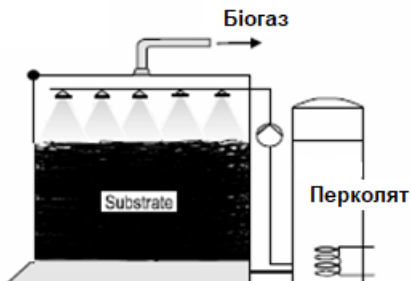


Контейнерний процес з циркуляцією перколяту

Завантаження / вивантаження

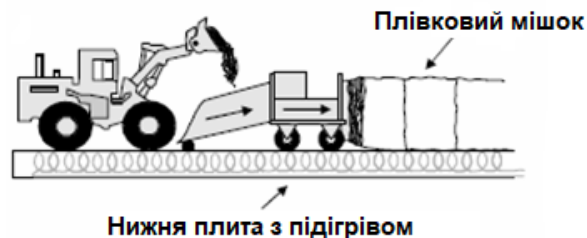


Зброджування

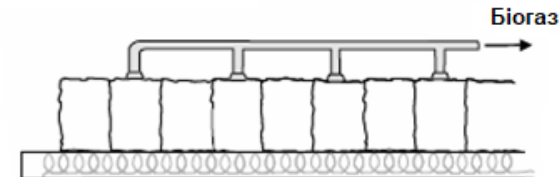


Тонельний процес без перколяту

Завантаження / вивантаження

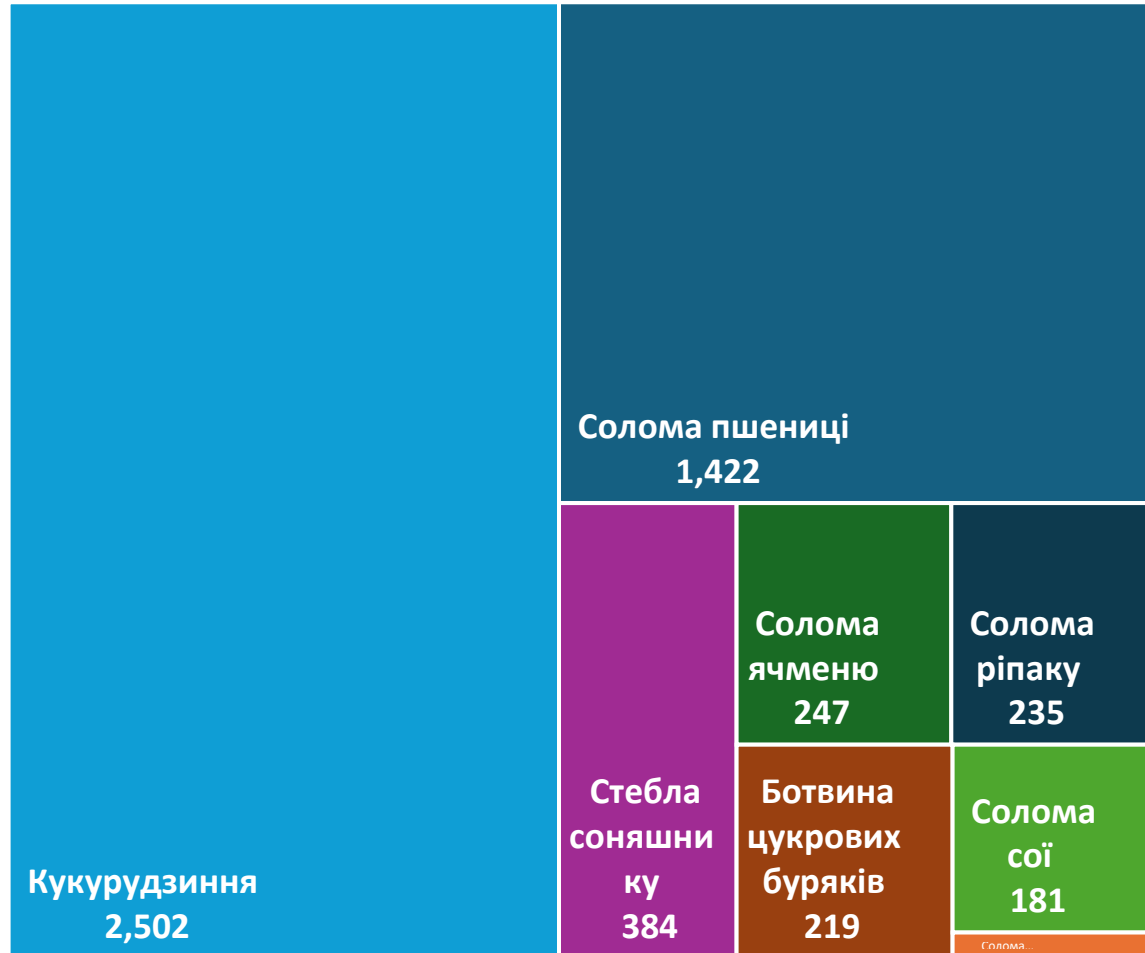


Зброджування

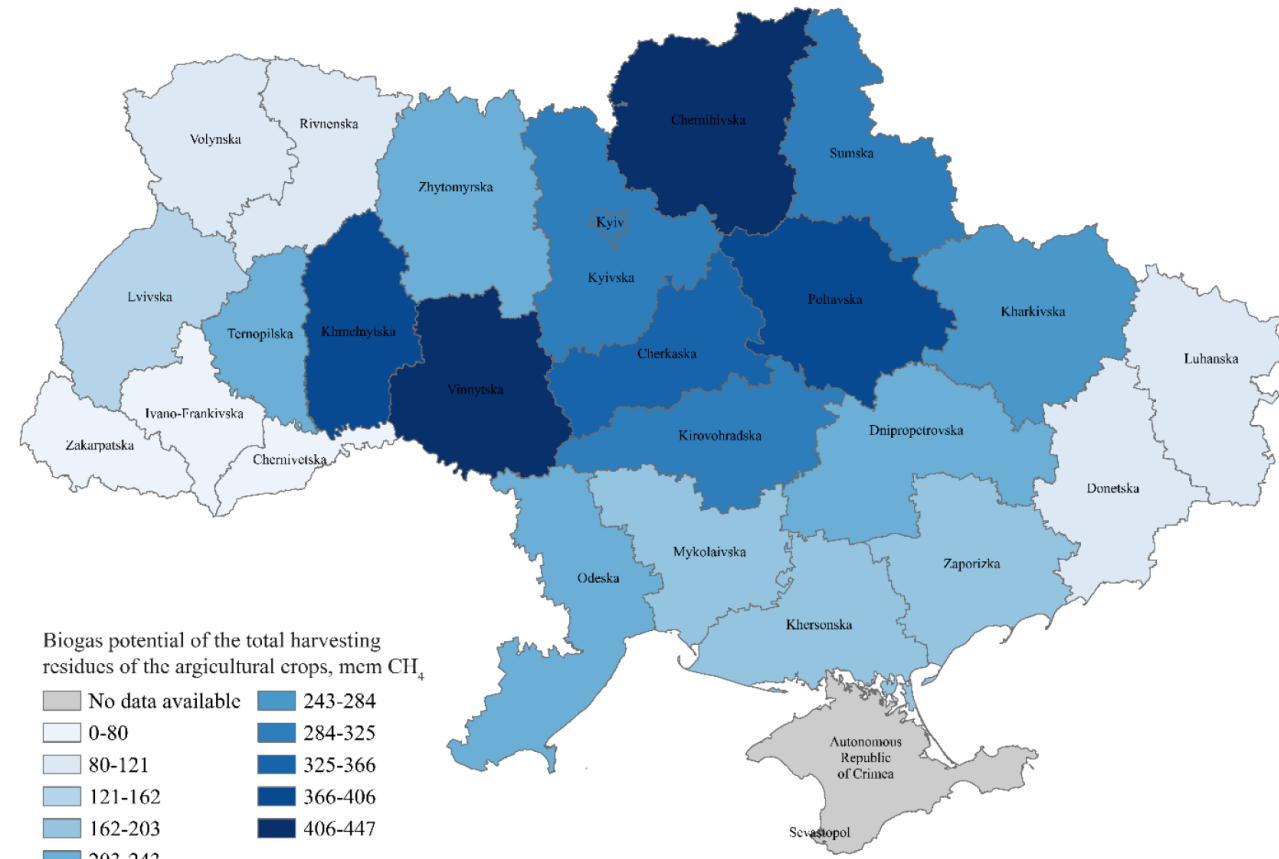


Потенціал виробництва біометану з пожнивних решток в Україні

Всього – 5.2 млрд nm^3CH_4 на рік



Від 10 до 447 млн nm^3CH_4 /рік по областях



Note: numbers for the Donetsk and Luhansk districts are given with the temporarily occupied territories excluded

Дякую за увагу!

Петро Кучерук

kucheruk@secbiomass.com

<https://uabio.org/>

UABIO