

Виробництво біометану з лігно-целюлозної агробіомаси

Кучерук П.П., к.т.н., с.н.с. відділу ТПСТ

Що таке бродіння?

БАКТЕРІЇ + ФЕРМЕНТИ



ВОЛОГА



МАКРО- та МІКРОНУТРИЄНТИ

Анаеробні умови

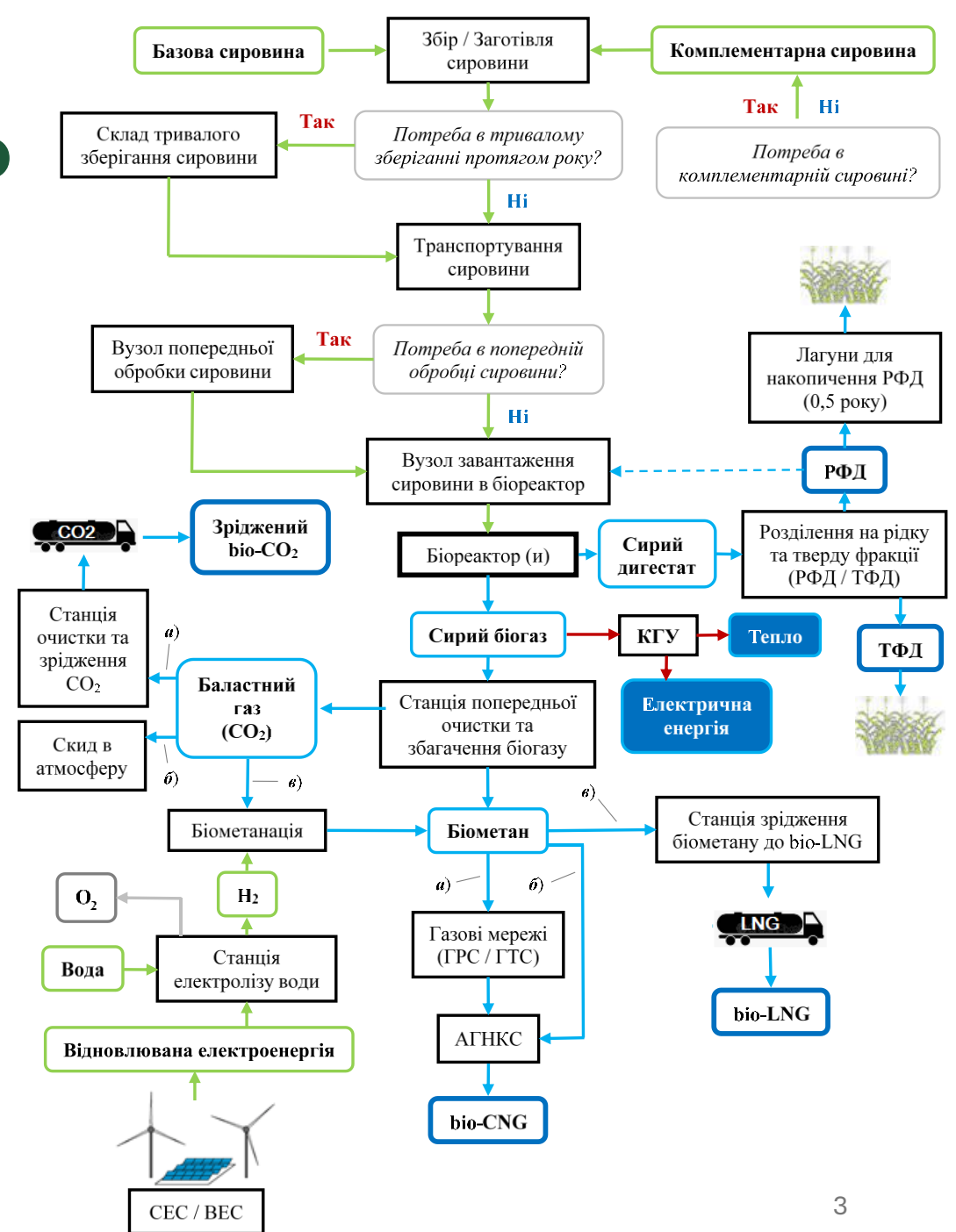
КОМПЛЕКСНА
ОРГАНІЧНА
РЕЧОВИНА

ОСНОВНИЙ
ЦІЛЬОВИЙ
ПРОДУКТ

ПРОМІЖНИЙ /
ПОБІЧНИЙ
ПРОДУКТ

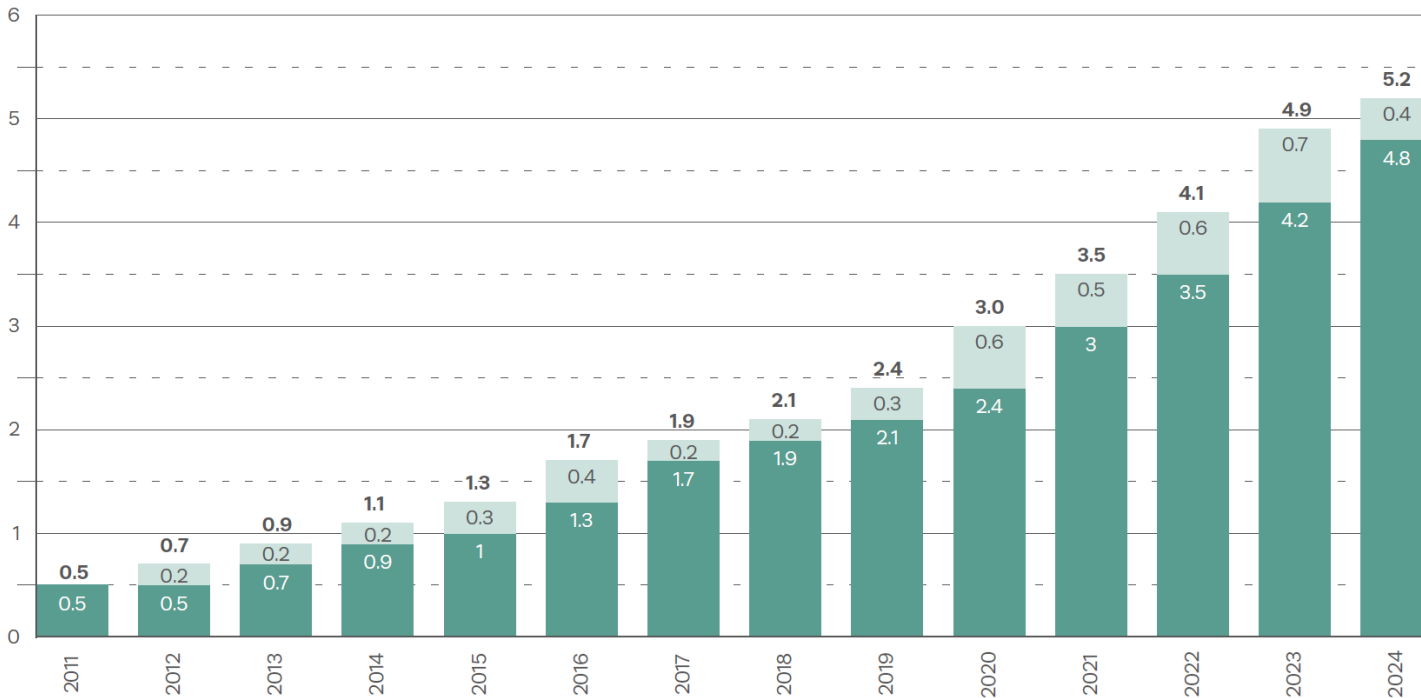
Основні концепції проєктів виробництва відновлюваного метану

- **Концепція 1**
Біометан та/або e/e з біогазу БГУ
- **Концепція 2**
Біометан з біогазу полігонів ТПВ
- **Концепція 3**
e-Біометан з відновлюваних H_2 та CO_2
- **Концепція 4**
Синтетичний біометан отриманий шляхом термогазифікації твердої або рідкої біомаси
- **Концепція 5**
Біометан з біогазу “темного бродіння” (H_2 , CH_4)

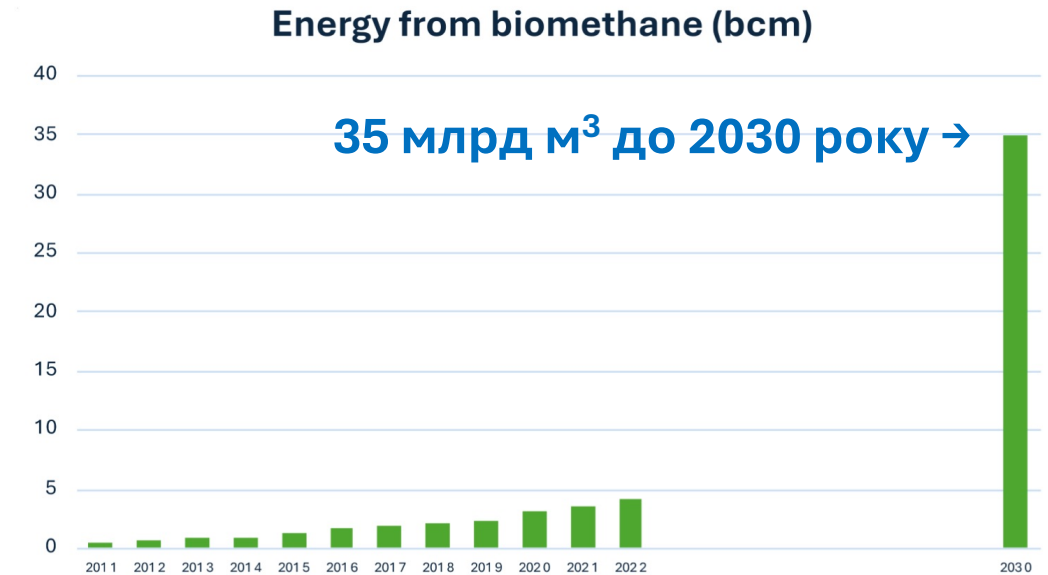


Виробництво біометану в Європі, млрд м³/рік

Ринок біометану динамічно зростає

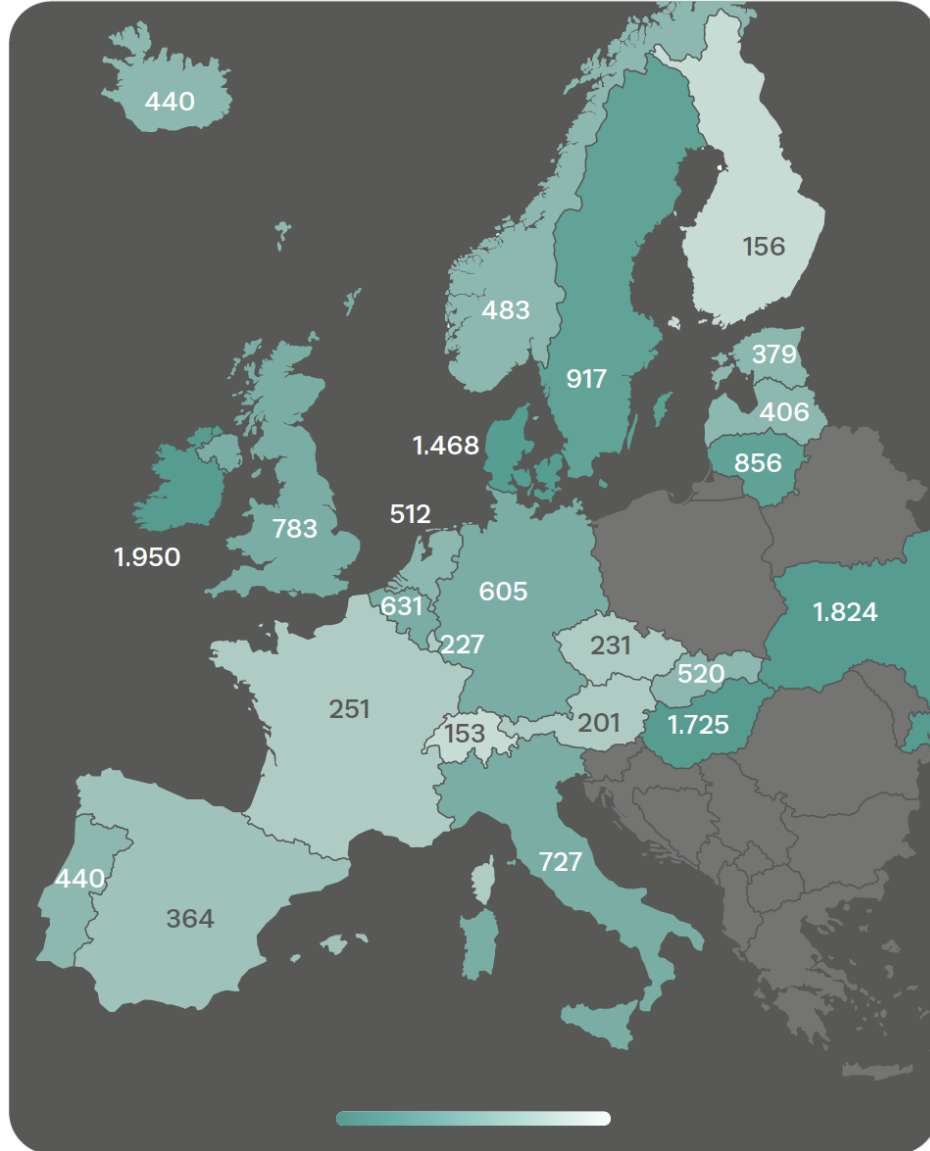


Амбітний план ЄС REPower EU

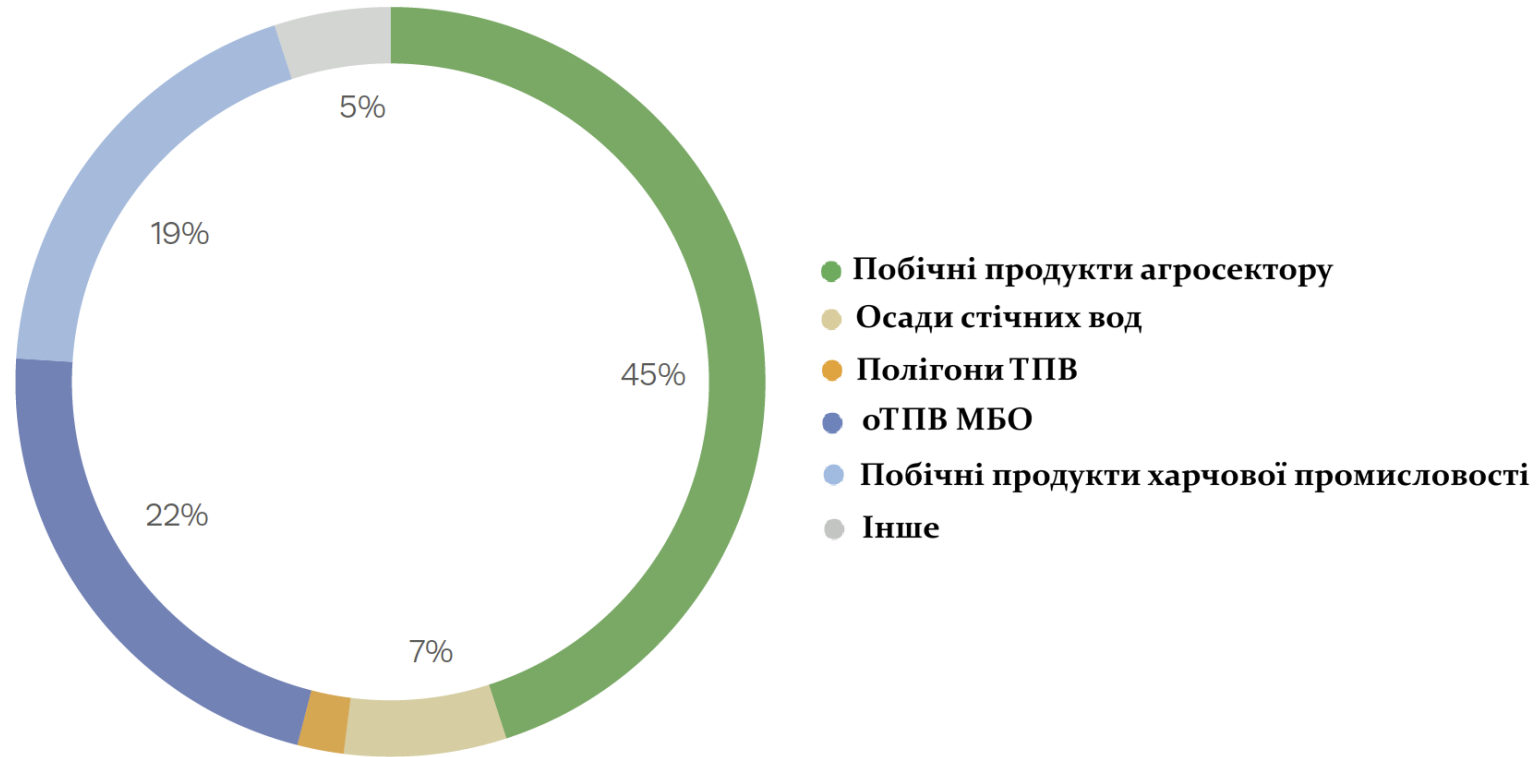


Статистика біометанових проєктів в Європі, 2025

Середній розмір біометанових проєктів, м³/год



Частка виробництва біометану за типом проєктів



Виробництво біометану в Україні

- Станом на квітень 2026 року в Україні запущено **6 проєктів** виробництва біометану сумарною потужністю **108 млн м³/рік**
- Ще принаймні 7 біометанових проєктів планується запуснути протягом найближчих трьох років сумарною потужністю 40 млн м³/рік
- Згідно затвердженої КМУ в квітні 2026 року Програми розвитку виробництва біометану на період до 2035 року **до 2030 року** планується вийти на рівень виробництва **1 млрд м³ біометану** на рік, **до 2035 року** - наростити потужності до **2,1 млрд м³**
- Вихід на планові показники виробництва біометану вимагатиме використання значних обсягів поживних решток як сталої сировини

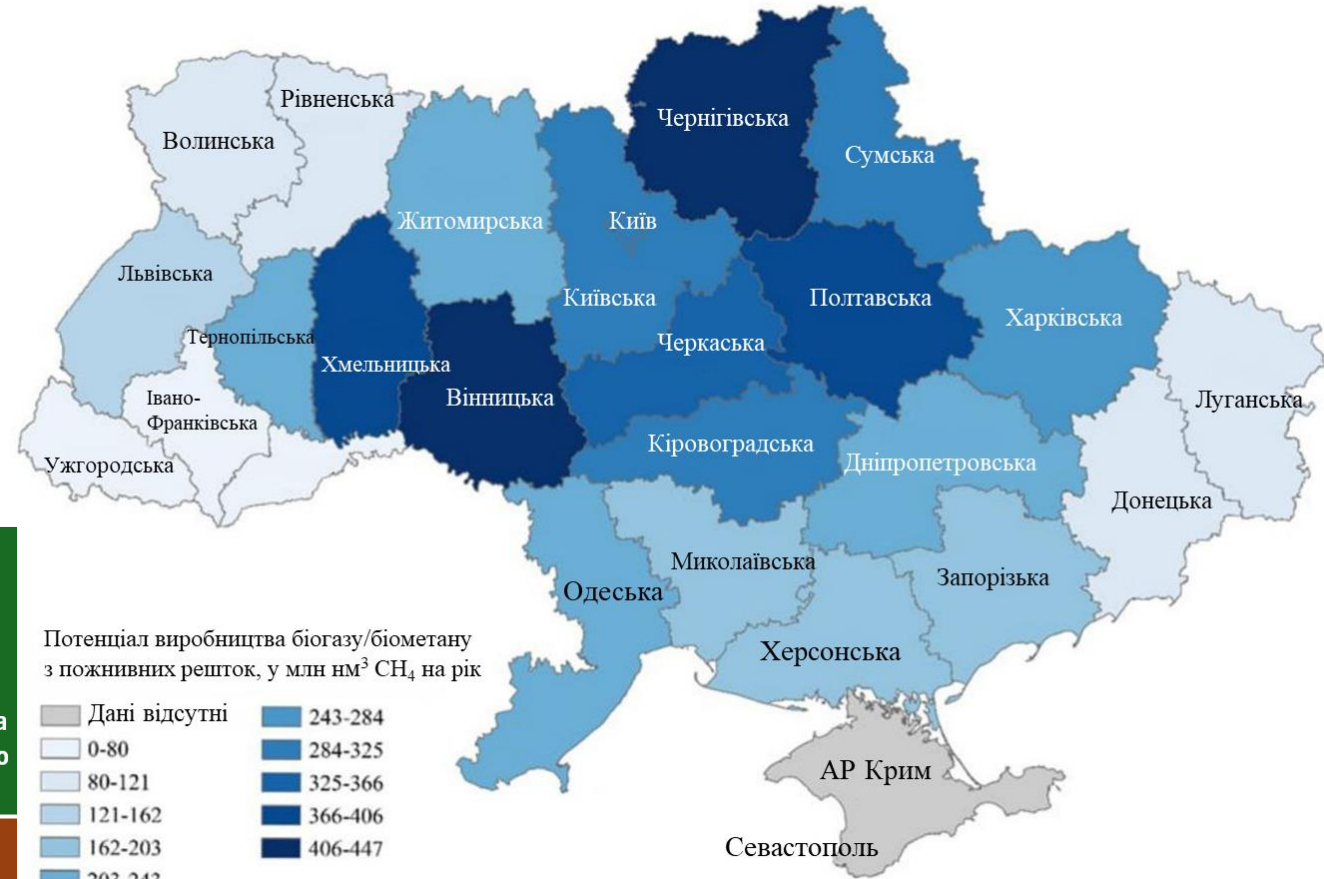
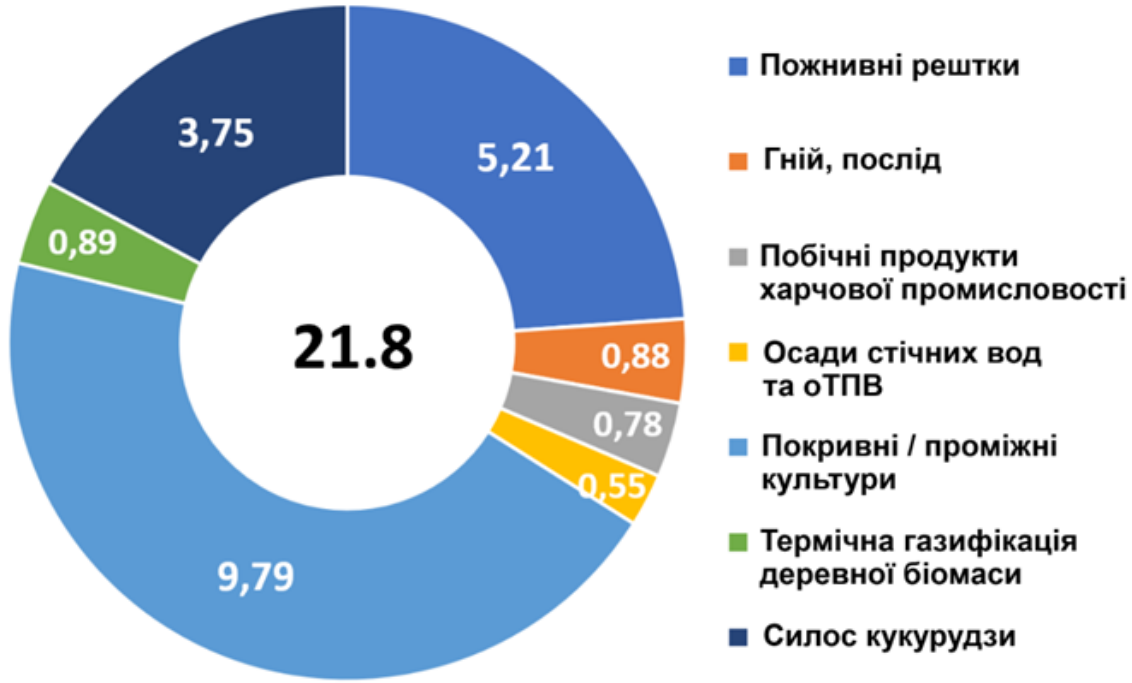
Діючі біометанові проєкти в Україні

№	КОМПАНІЯ	Регіон	Потужність, млн м ³ /рік	Приєднання	Старт, рік
1	ТОВ «Галс Агро»	Чернігівська обл.	3,0	ГРМ	2023
2	Група компаній VITAGRO	Хмельницька обл.	3,0	ГРМ	2024
3	МХП	Дніпропетровська обл.	11,0	ГРМ	2025
4	МХП	Вінницька обл.	24,0	Bio LNG	2025
5	ТОВ «ЮМ ЛІКВІД ГАЗ»	Вінницька обл.	11,0	Bio LNG	2025
6	ТОВ «Теофіпольська енергетична компанія»	Хмельницька обл.	56,0	ГТС	2026
	ВСЬОГО		108,0		

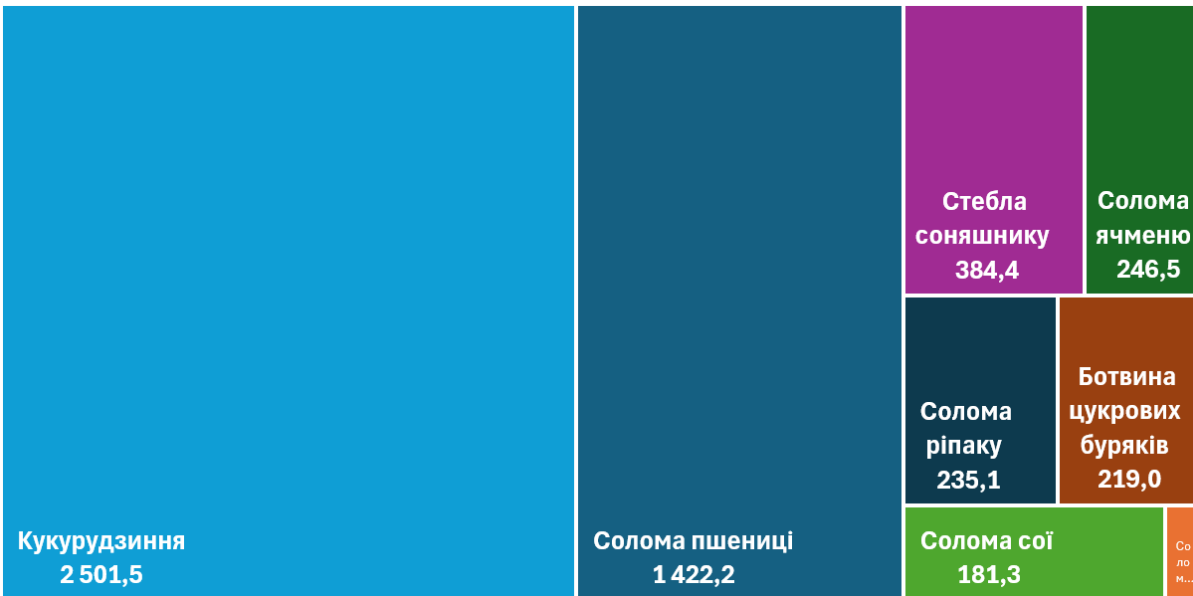
Сценарій UABIO виробництва та споживання біометану в Україні до 2050 р.

	2027	2030	2035	2040	2045	2050
Виробництво біометану, млрд м ³	0,25	1,00	2,1	4,5	9,5	20
Експорт біометану, млрд м ³	0,13	0,50	1,05	2,25	4,8	10
Споживання на внутрішньому ринку, млрд м ³	0,13	0,50	1,05	2,25	4,8	10
Кількість біометанових заводів, од.	50	200	420	900	1900	4000
Необхідні інвестиції, млрд €	0,5	2,0	4,2	9,0	19,0	40
Зниження емісії ПГ, млн т CO ₂ -екв.	0,6	2,5	5,3	11,3	23,8	50
Створені робочі місця, тис од.	3,1	12,5	26,2	56,2	118	250

Структура потенціалу виробництва біогазу в Україні



Примітка: Дані для Донецької та Луганської областей надані, без урахування ТОТ



Науково-практична проблематика використання пожнивних решток для виробництва біометану

- Пожнивні рештки (солома, стебла) є відносно новою та складною сировиною для виробництва біогазу, що потребує застосування нових підходів та розробки інноваційних технологічних рішень, зокрема в проєктах з високою часткою соломи в сировинному міксі
- Основними властивостями пожнивних решток, що обмежують їх використання як сировини для виробництва біогазу, є наступні:
 1. **Сильні гідрофобні властивості** → стратифікація в технологічних ємностях та блокування роботи міксерів, збільшення витрат енергії на перемішування та переміщення
 2. **Високе (не оптимальне) співвідношення C:N** → неможливість протікання процесу метанового бродіння через дефіцит нітрогену для метаболізму бактерій та архей
 3. **Низька біодоступність органічної речовини** → зниження швидкості процесу та виходу біогазу, що веде до зниження економічної ефективності проєктів виробництва біометану
 4. **Низька вологість** → обмеження частки в сировинному міксі при використанні поширених біореакторів типу CSTR
- Пожнивні рештки, як правило, потребують попередньої обробки перед зброджуванням. Вибір відповідної технології такої обробки є оптимізаційною задачею, направленою на пошук рішення, за якого найбільший вихід енергії біогазу за одиницю часу може бути досягнутий за найменших витрат енергії та найменшої собівартістю
- Пожнивні рештки від різних культур потребують різних підходів до заготівлі, транспортування та зберігання. Оптимізація логістики сировини є актуальною задачею, оскільки витрати на сировину, зокрема і пожнивні рештки, становлять до 50% і більше операційних витрат біометанових проєктів

Гідрофобні властивості соломи

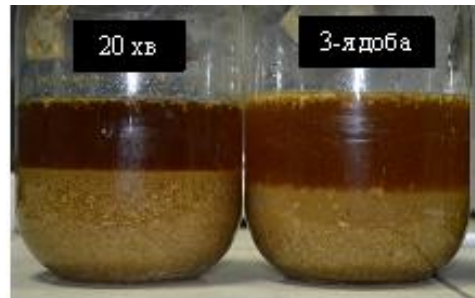
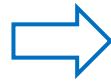
Основні фактори, що обумовлюють гідрофобність соломи

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

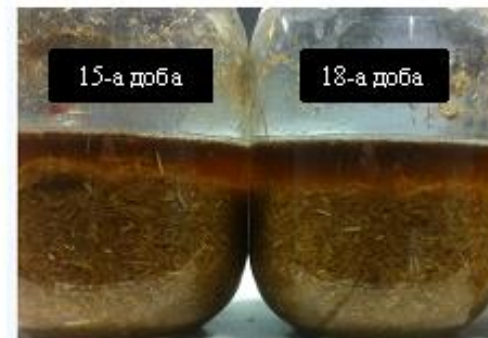
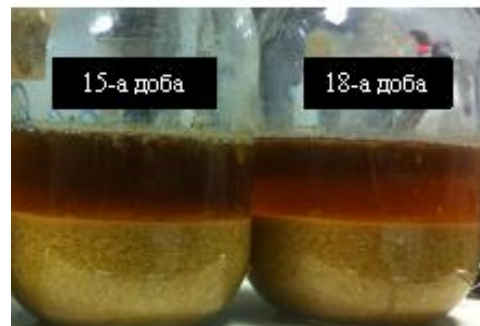
Можливі методи зниження гідрофобності соломи

- Лужна обробка
- Паро-вибухова обробка
- Біологічна обробка з допомогою грибів
- Механіко-термічна обробка (екструзія, гранулювання)

Гранула товарна з соломи пшениці



Солома механічно подрібнена



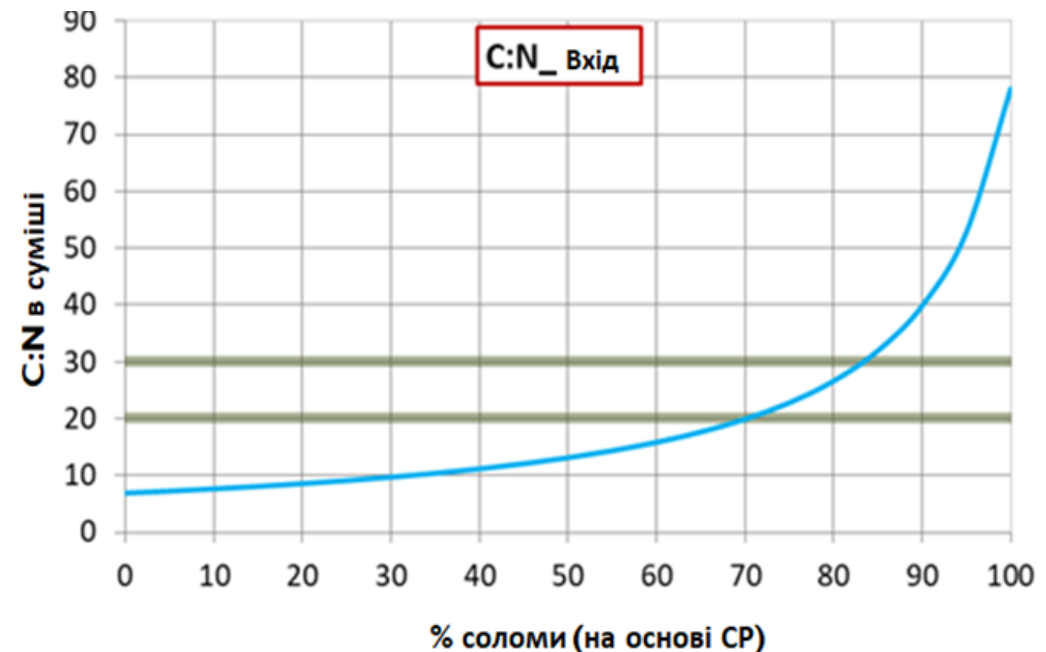
Підходи щодо усунення недоліків поживних решток як сировини для біогазу: оптимізація C:N

Можливі стратегії оптимізації величини C:N

- **Сумісне зброджування** з ко-субстратами, багатими на азот, напр., послід, барда, гноївка свиней, мікрководорості
- **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

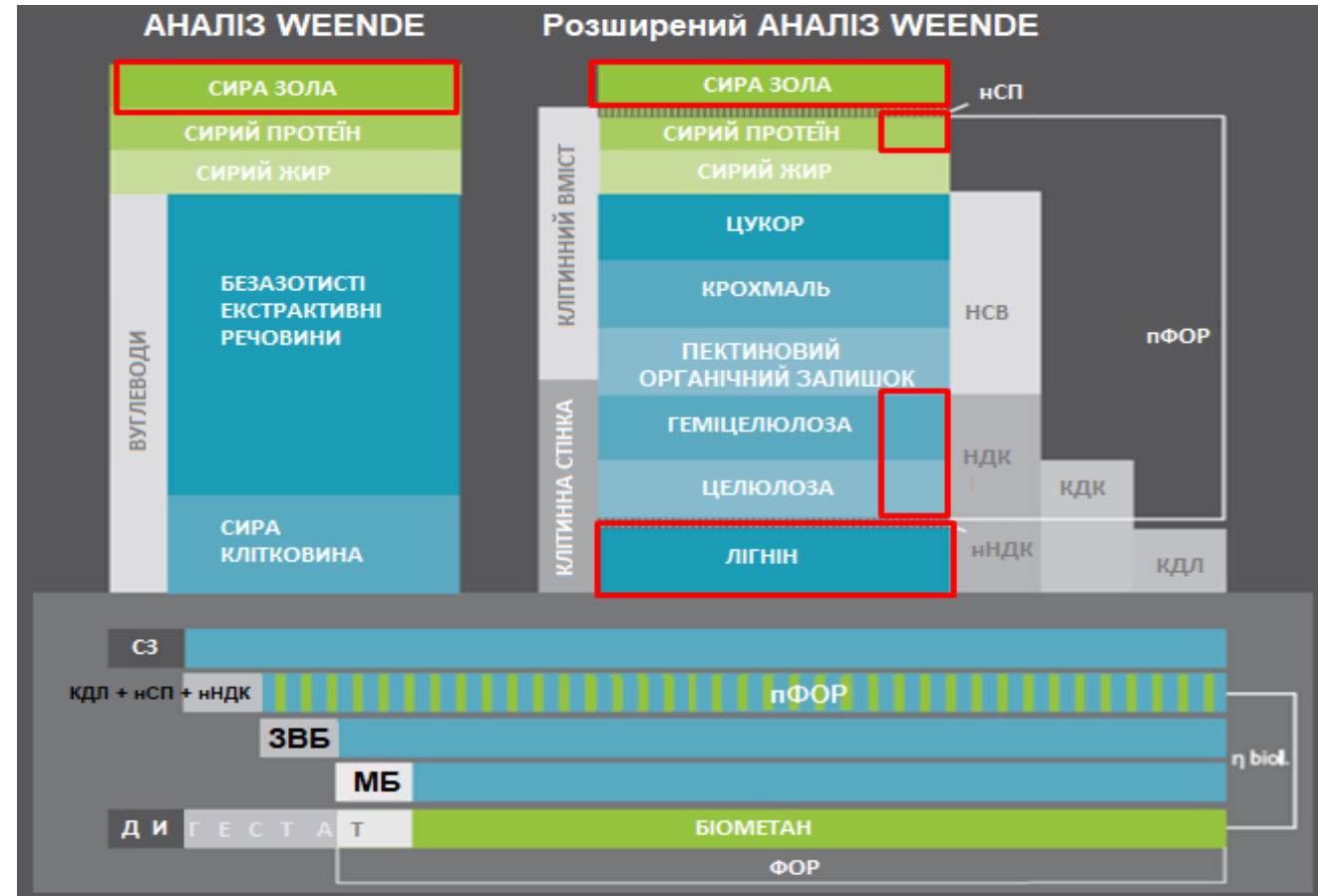
- Лігнін в процесі метанового бродіння не зброджується
- Закрита структура лігно-целюлозних комплексів перешкоджає доступу води та бактерій
- Частина сирого протеїну та (гемі)-целюлози також не зброджується

Рівень впливу різних методів попередньої обробки на біодоступність

Високотемпературна обробка під тиском, кавітаційні методи

Хімічна обробка, екструзія

Механічне подрібнення



nФОР - 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 пожнивних решток як сировини для біогазу: **забезпечення вологою**

Основні стратегії вирішення питання низької вологості пожнивних 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 проекту 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 проекту 5 млн нм³CH₄/рік → 77,5 тис. м³/рік гноївки зі свиноферми орієнтовно 15,7 тис. голів

Лабораторія відділу ТПБ ТПСТ

- Дослідження питомого виходу метану зі зразків сировини (всього 35 батч систем періодичного зброджування)
- Аналіз фізико-хімічного складу органічної сировини (СР, зольність, спектрофотометрія, титрування)
- Власні аналітичні методики статистичного аналізу результатів
- Аналіз складу біогазу (CH_4 , CO_2 , H_2S) з допомогою портативного цифрового газоаналізатора
- Вимірювання об'єму виділеного біогазу з допомогою каліброваних евдіометрів та лічильників барабанного типу
- Дослідження технологічних режимів виробництва біогазу в реакторах напівпроточного типу (5 реакторів об'ємом 32 л)



Лабораторія дообладнана піччю тривалого горіння та інвертором 12 кВт з 2*16 кВт батареями

Млин Retsch SM 100

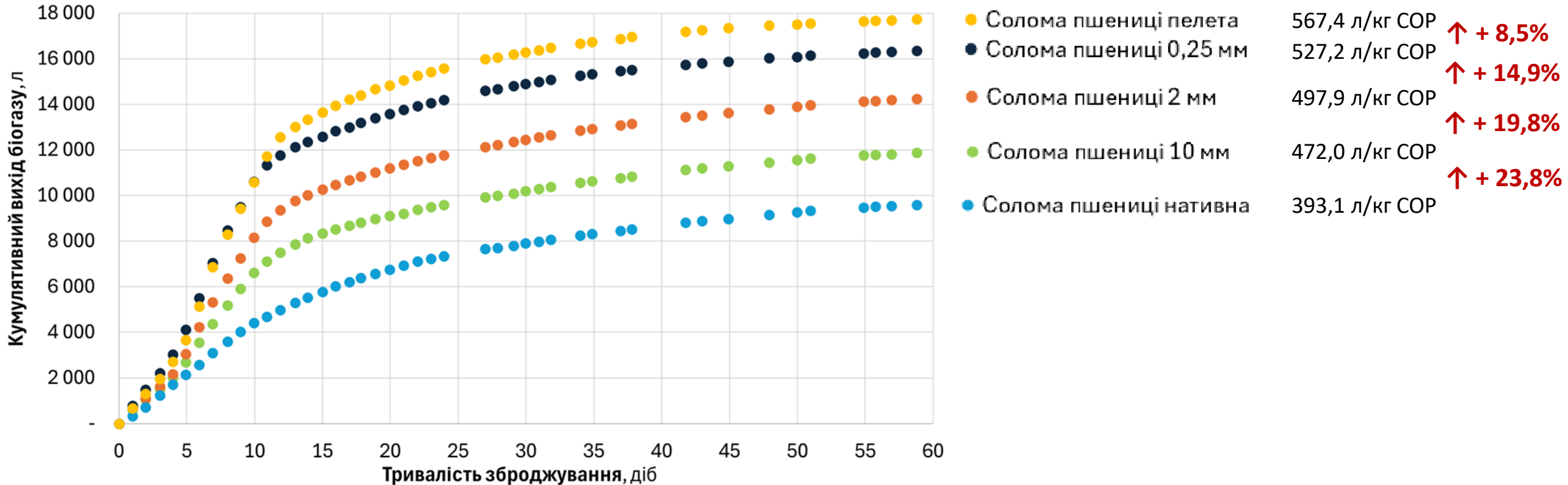
Експериментальне дослідження впливу подрібнення і гранулювання на вихід біогазу

Досліджений матеріал - солома пшениці сорту *Triticum aestivum* L.

Процес зброджування – періодичний при температурі $38 \pm 1^\circ\text{C}$,

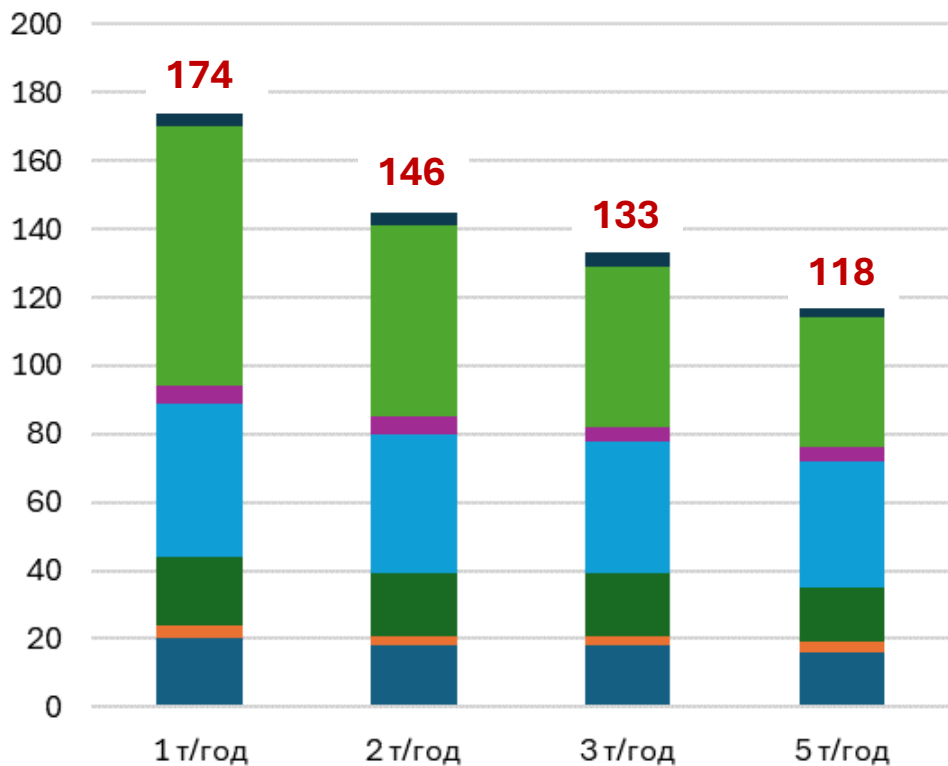
Стартова концентрація сухої беззольної речовини (СОР) 32,5 гСОР/кг.

Метод обробки: 1) механічне подрібнення до фракцій ≤ 10 мм, ≤ 2 мм та $\leq 0,25$ мм 2) гранулювання



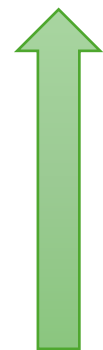
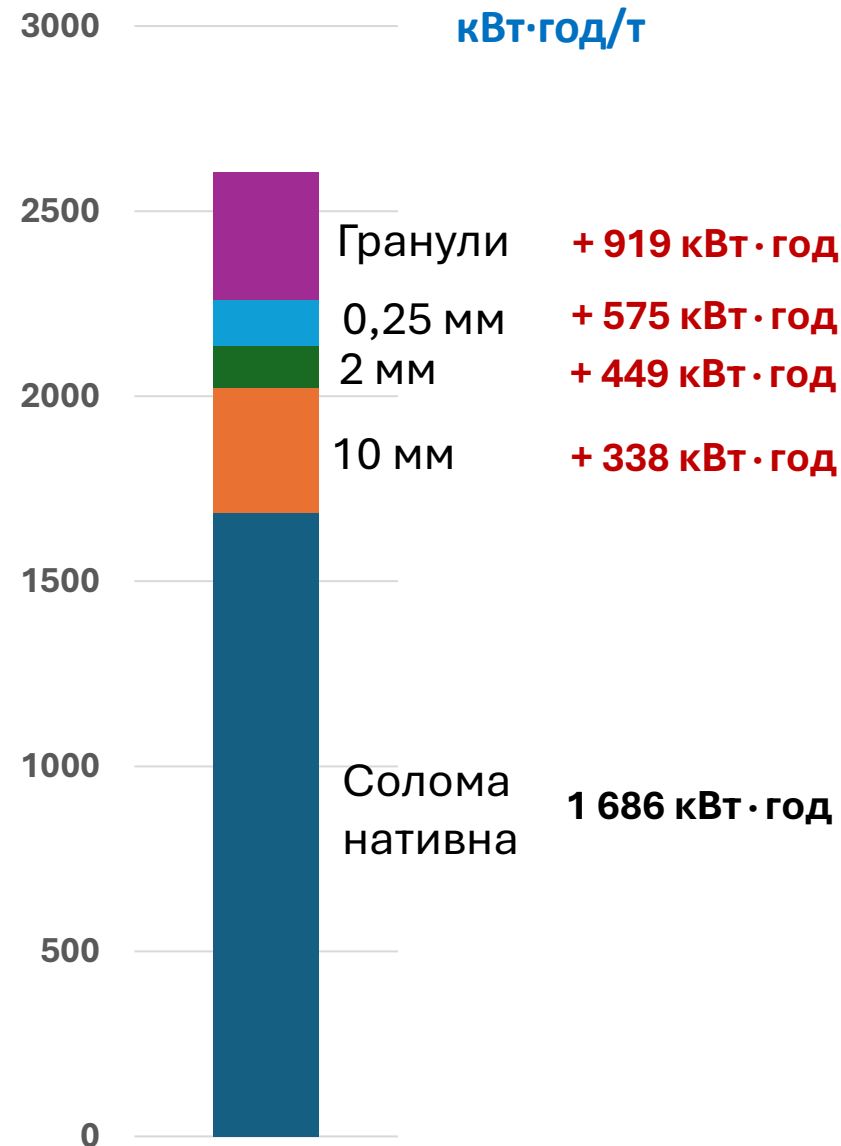
Баланс витрат електричної енергії і енергії біогазу для лінії гранулювання соломи

Питоме споживання електричної енергії на гранулювання соломи, кВт·год/т гранул



- Охолодження гранул
- Гранулювання
- Кондиціювання (підготовка до гранулювання)
- Остаточне подрібнення (дробарки молоткові)
- Первинне подрібнення
- Освітлення, системи керування, інші витрати
- Транспортери, пневмотранспорт

Енергія біогазу з соломи, кВт·год/т



Експериментальне дослідження моно-зброджування гранульованої соломи пшениці з додаванням макро- та мікроелементів

Параметри тесту

- Тип випробувального процесу – щоденне завантаження/вивантаження
- Тип реактора – реактор напівпроточного типу з гідравлічним режимом повного змішування (CSTR)
- Робочий об'єм реактора – 32 л
- Температура процесу – $38 \pm 1^\circ\text{C}$
- Вхідна суміш – гранули пшеничної соломи + вода
- Джерело додаткового нітрогену – аміачна селітра, сульфат амонію
- Органічне навантаження – від 2,0 до 3,5 г СОР/л/добу
- Контрольовані параметри процесу – вихід біогазу, склад біогазу (CH_4 , CO_2), тиск газу, FOS/TAC, CP/COP дигестату, рН, температура

Дослідна установка напівпроточного анаеробного зброджування



Стан суміші в біореакторах на 139 добу експерименту

Лише гранули



Гранули + макроелементи



Виробничі показники проєкту

Продукт	Розмірність	Вихід продукту:		
		Концепція 1 – біометан з соломи, після обробки біоекструдером + скраплений CO ₂	Концепція 2 – біометан з пелет + скраплений CO ₂	Концепція 3 – лише біометан з соломи, після обробки біоекструдером
Біометан (98% CH ₄)	тис. нм ³ /рік	4 455,3	4 756,9	4 455,3
	МВт·год/рік	43 540	46 488	43 540
Скраплений CO ₂ (99,99%)	т/рік	5 561	6 001	0
Дигестат	т/рік	109 760	110 928	107 344

Вихідні параметри фінансової моделі

Параметр	Розмірність	Значення, без ПДВ
Цільові продукти		
Ціна на біометан - концепція 1	євро/МВт·год (*)	91
Ціна на біометан – концепція 2	євро/МВт·год (*)	90
Ціна на біометан – концепція 3	євро/МВт·год (*)	82
Ціна на зріджений CO ₂	євро/т	133
Ціна на дигестат	євро/т	1,5
Сировина		
Солома пшениці	євро/т	25,77
Гноївка свиней	євро/т	0
Кукурудзиння	євро/т	36,84
Силос кукурудзи	євро/т	20,95
Зберігання та логістика сировини в межах комплексу		
Солома пшениці	євро/т	2,93
Гноївка свиней	євро/т	0
Кукурудзиння	євро/т	2,67
Силос кукурудзи	євро/т	3,14
Логістика цільвих продуктів		
Зріджений CO ₂	євро/(т·км)	0,05
Біометан: тариф для точки входу в ГТСУ	грн/(1000 м ³ /добу)	464,37
Біометан: тариф для точки входу та виходу на міждержавних з'єднаннях	євро/(1000 м ³ /добу)	25,66

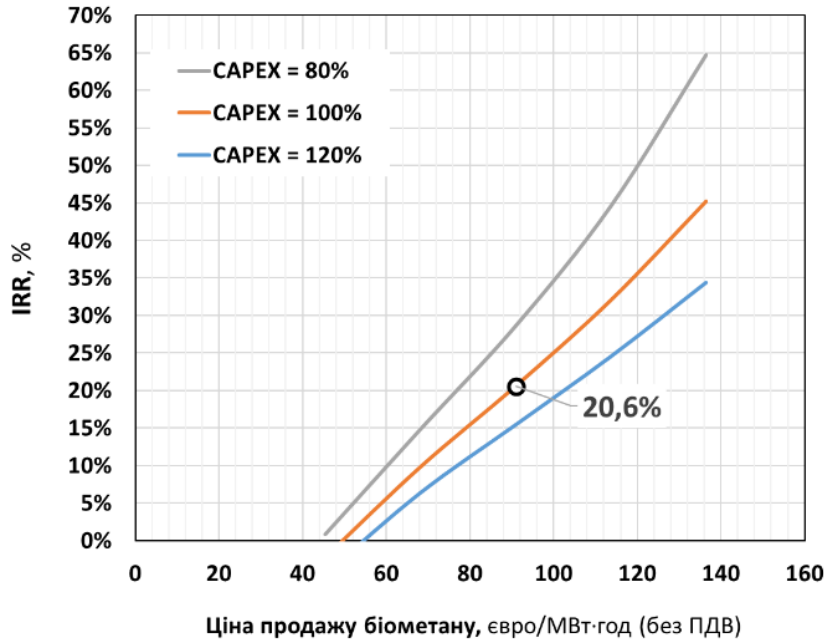
* 1 МВт·год енергії біометану = близько 100,28 нм³CH₄

Економічні показники проєкту

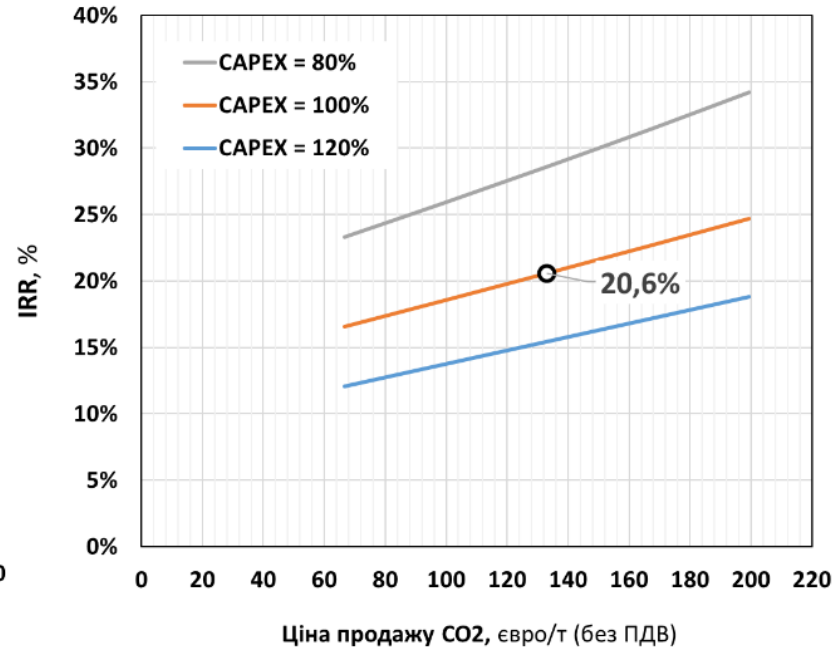
Показник	Розмірність	Значення		
		Концепція 1 біометан з соломи, після обробки біоекструдером + скраплений CO ₂	Концепція 2 біометан з пелет + скраплений CO ₂	Концепція 3 лише біометан з соломи, після обробки біоекструдером
Інвестиції (CAPEX), в т.ч.:		13,93	13,87	11,95
Запозичені кошти	млн євро	8,36	8,32	7,17
Власні кошти		5,57	5,55	4,78
Операційні витрати (OPEX), у т.ч.:		1,98	2,24	1,89
Сировина	млн євро/рік	0,97	0,95	0,90
Операційні витрати	(без ПДВ)	0,35	0,53	0,33
Логістика цільових продуктів		0,39	0,42	0,30
Дохід		4,87	5,15	3,73
Біометан в ГТС	млн євро/рік	3,96	4,18	3,57
Зріджений CO ₂	(без ПДВ)	0,74	0,80	-
Дигестат		0,16	0,17	0,16
NPV	млн євро	6,07	6,25	1,23
IRR	%	20,6%	20,9%	12,5%
Простий термін окупності	років	5,8	5,7	7,8
Дисконтований термін окупності	років	7,6	7,5	12,1

Аналіз чутливості – концепція 1

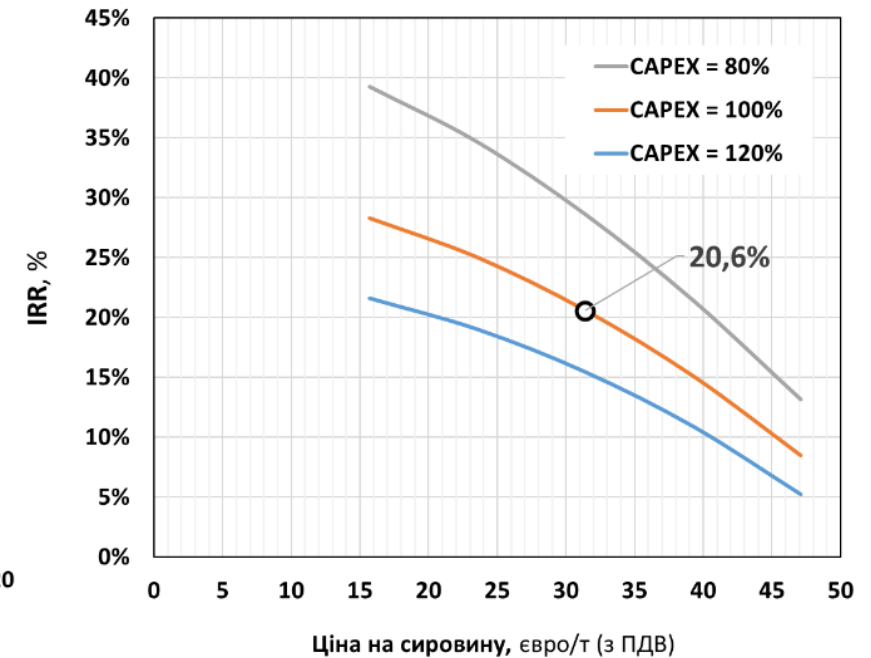
Вплив ціни на біометан



Вплив ціни на CO₂



Вплив ціни на сировину



- На рентабельність проекту більшою мірою впливає ціна продажу біометану та ціна на сировину, меншою мірою – ціна продажу зрідженого CO₂
- Зменшення ціни біометану до 80 євро/МВт·год або зростання вартості проекту на 20% знижує рівень рентабельності проекту до IRR на рівні 15%.
- Такий же ступінь зниження рентабельності може бути при збільшенні ціни на покупну сировину в проекті на 24 - 27%, з 31,4 до 39 - 40 євро/т, з ПДВ.

Публікації за тематикою:

Всього: > **30** наукових статей

в т.ч. **13 статей** в наукових виданнях, що індексуються в **Scopus / Web of Science**

Апробація результатів:

> **10 виступів** з презентаціями на наукових та науково-практичних конференціях і семінарах

Дякую за увагу!