

## ЕКОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ СПАЛЮВАННЯ БІОПАЛИВА: ВПЛИВ СКЛАДУ ПАЛИВА НА ЕМІСІЮ ШКІДЛИВИХ РЕЧОВИН

Отримано 13 лист. 2025 р.; рекомендовано до публікації 26 чер. 2026 р.  
Доступно онлайн 30 чер. 2026 р.

Шелешей Т. В.<sup>1</sup>, Беднарська І. С.<sup>2</sup>, Сиваченко В. А.<sup>3</sup>

Автор для кореспонденції: Шелешей Тетяна,  
e-mail: sheleshey\_tanya@ukr.net

**Анотація.** У статті досліджено екологічні аспекти спалювання біопалива різного походження з урахуванням впливу його хімічного складу на утворення шкідливих речовин. Актуальність роботи зумовлена необхідністю скорочення антропогенних викидів у процесі переходу енергетичного сектору до відновлюваних джерел енергії та досягнення вуглецевої нейтральності. Проаналізовано взаємозв'язок між елементним складом біомаси – вмістом вуглецю, водню, кисню, азоту, сірки, золи та вологи – та рівнем емісії основних забруднювачів: оксидів сірки ( $SO_2$ ), азоту ( $NO_x$ ), вуглецю ( $CO_2$ ) і твердих частинок (PM). Методологічною основою дослідження є порівняльний аналіз даних літератури й експериментальних даних, застосування масового балансу та стехіометричних співвідношень для оцінки питомих показників емісії. Визначено закономірності впливу вмісту сірки, азоту та зольності палива на інтенсивність утворення шкідливих речовин у процесах згоряння. Встановлено, що найменші викиди спостерігаються під час спалювання міскантусу, соломи пшениці, кукурудзяних решток і пелет з тирси, тоді як торф, лушпиння рису та соняшника характеризуються підвищеною емісією  $SO_2$  і PM. Для рідких біопалив виявлено, що спирти (біоетанол, біометанол) мають найменший вуглецевий слід, а біоолія та жиrowі похідні потребують вдосконалення технології згоряння. Газоподібні біопалива, зокрема біометан, демонструють мінімальні рівні утворення  $SO_x$ ,  $NO_x$  і CO. Наукова новизна роботи полягає в систематизації та порівнянні основних видів біопалив (твердих, рідких та газоподібних) за їх паливними та екологічними характеристиками, що дало змогу встановити взаємозв'язок між хімічним складом біопалива та рівнем утворення шкідливих викидів під час спалювання в енергетичних установках. Практичне значення отриманих результатів полягає у формуванні критеріїв вибору біопалива для енергетичних установок різного типу, розробленні рекомендацій щодо оптимізації режимів горіння та зменшення екологічного навантаження на атмосферу.

**Ключові слова:** біопаливо, склад палива, емісія, оксиди сірки, оксиди азоту, тверді частинки, екологічна безпека, декарбонізація.

**Вступ.** Сучасна енергетика перебуває в стані глибокої трансформації, зумовленої глобальними тенденціями декарбонізації, переходу до відновлюваних джерел енергії та необхідністю скорочення антропогенних викидів парникових газів. У цьому контексті біопаливо розглядається як одна з найперспективніших альтернатив традиційним викопним енергоносіям завдяки своїй відновлюваності, потенційній вуглецевій нейтральності та можливості використання локальної сировини. За оцінками Міжнародного енергетичного агентства, частка біоенергетики в глобальному енергобалансі поступово зростає, проте ефективність її застосування значною мірою визначається якістю та складом конкретних видів біомаси.

<sup>1</sup> канд. техн. наук

<https://orcid.org/0000-0002-7242-4107>

<sup>2</sup> д-р. філос.

<https://orcid.org/0000-0002-5558-4467>

<sup>3</sup> магістрантка

<https://orcid.org/0009-0006-2448-3301>

<sup>1, 2, 3</sup> Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Хімічний склад біопалива є ключовим чинником, який визначає як енергетичні, так і екологічні характеристики процесу згоряння. Вміст вуглецю (C) та водню (H) безпосередньо впливає на теплоту згоряння та утворення діоксиду вуглецю ( $CO_2$ ) і водяної пари ( $H_2O$ ), тоді як азот (N) та сірка (S) є основними джерелами оксидів азоту ( $NO_x$ ) і сірки ( $SO_x$ ), що належать до найнебезпечніших атмосферних забруднювачів. Висока зольність (A) та вологість (W) погіршують повноту згоряння, спричиняють утворення дрібнодисперсного пилу, шлакування та зниження ефективності теплогенераторів. Таким чином, детальний аналіз елементного складу біопалива є необхідною умовою для оцінки його енергетичного потенціалу, екологічної безпечності та

придатності до використання в системах енергопостачання.

Через різноманітність органічної сировини – від аграрних відходів до деревної біомаси та біогазу, – виникає потреба в систематизації даних щодо їх складу та порівнянні екологічних показників. Це дає змогу встановити взаємозв'язок між хімічними параметрами біопалива та рівнем утворення шкідливих речовин під час згоряння, що є основою для вибору оптимального виду палива з урахуванням енергетичної ефективності та вимог охорони довкілля.

**Огляд джерел літератури.** Зростання використання біомаси як відновлюваного енергетичного ресурсу обумовлює необхідність глибокого розуміння процесів утворення шкідливих речовин при її спалюванні та газифікації. Незважаючи на вуглецеву нейтральність біопалива, його склад – зокрема вміст азоту, сірки, хлору, золи та лужних елементів – істотно впливає на утворення оксидів азоту ( $\text{NO}_x$ ), сірки ( $\text{SO}_x$ ), твердих частинок (PM) і токсичних органічних сполук. Як зазначено в [1] та [2], головним джерелом  $\text{NO}_x$  під час згоряння біомаси є паливний азот, тоді як внесок термічних механізмів є другорядним. Вплив азоту й сірки на процеси газифікації та утворення  $\text{NO}_x/\text{SO}_x$  визначається як їх вмістом у вихідному паливі, так і режимом згоряння, що підтверджено дослідженнями [3, 4] під час спалювання біодизеля та його сумішей з дизельним паливом.

Важливу роль у формуванні викидів відіграє також мінеральний склад біопалива. Взаємодія лужних (Na, K) і лужноземельних (Ca, Mg) елементів з хлором і сіркою визначає механізми утворення субмікронного PM, хлоридів та сульфатів, що підсилюють корозію й токсичність золи [5–7]. Для палив з високим вмістом кремнезему, як-от рисове лушпиння, фазові перетворення  $\text{SiO}_2$  у золі істотно впливають на утворення дрібнодисперсного пилу та токсичних сполук [8, 9].

Попередня обробка біомаси – сушіння, торефікація, змішування різних видів палива або модифікація нанодобавками – розглядається як ефективний шлях зменшення емісії  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$  та PM. Як показано в [10] та [11], зміна елементного складу після термічної підготовки біомаси або спалювання різних фракцій з нижчим вмістом S/N/Cl сприяє зниженню шкідливих викидів. Нанодобавки в біодизель також впливають на механізми утворення  $\text{NO}_x$  і суспендованих твердих частинок [12], демонструючи потенціал оптимізації складу палива.

Особливу увагу приділяють газоподібним видам біопалива – біогазу, біометану та продуктам газифікації. За даними [13], домішки  $\text{NH}_3$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ , силосанів та вологи в біогазі істотно збільшують утворення  $\text{NO}_x$  і  $\text{SO}_x$ . У звіті [14] і огляді [15] підкреслено, що склад біогазу та вибір технологій очищення й апгрейду визначають рівень метанових втрат та загальну екологічну ефективність установок.

Залежність екологічних характеристик від типу біомаси підтверджено численними роботами. Для рисового лушпиння [16] виявлено низькі рівні NO, але високу схильність до утворення  $\text{SiO}_2$ -збагачених частинок. В огляді [17] узагальнено, що тип біомаси, концентрація домішок і умови горіння визначають профіль токсичних викидів – від важких металів до поліароматичних вуглеводнів (PAH) і летких органічних сполук (VOC). Супутниковий аналіз [18] підтверджує, що навіть природні пожежі біомаси демонструють залежність складу CO та інших продуктів згоряння від біохімічного складу рослини.

У наукових дослідженнях для оцінювання екологічних характеристик біопалив широко застосовуються підходи, що базуються на аналізі їх елементного складу та фізико-хімічних властивостей. У низці робіт встановлено наявність кореляційних залежностей між складом біопалива та рівнем утворення шкідливих викидів під час термохімічного перетворення, зокрема оксидів азоту та твердих частинок [18, 19].

Водночас результати досліджень свідчать, що величина емісії забруднювальних речовин визначається не лише елементним складом палива, але й умовами перебігу процесу – температурним режимом, коефіцієнтом надлишку повітря та конструктивними особливостями енергетичної установки [20]. У зв'язку з цим використання кореляційних залежностей між складом біопалива та утворенням шкідливих речовин є доцільним переважно для попереднього прогнозування екологічних показників, але потребує врахування технологічних параметрів процесу енергетичного використання палива.

Узагальнюючи, склад біомаси – як органічний (вміст C, H, O, N, S), так і неорганічний (мінеральні та зольні компоненти) – є визначальним чинником у формуванні структури та обсягів шкідливих викидів під час спалювання та газифікації. Тому оцінка взаємозв'язку між елементним і мінеральним складом біопалива та екологічними показниками процесу згоряння є ключовим напрямом сучасних досліджень у контексті сталого розвитку та енергетичного переходу [21–23].

**Постановка завдання.** Забруднення атмосферного повітря внаслідок спалювання біопалива залишається однією з ключових екологічних проблем сучасності. Викиди оксидів азоту ( $\text{NO}_x$ ), оксидів сірки ( $\text{SO}_x$ ), а також суспендованих твердих частинок (PM) значною мірою визначаються хімічним складом палива та умовами його згоряння. Біопаливо характеризується різним вмістом вуглецю, водню, кисню, азоту та сірки, а також присутністю мінеральних домішок і металів, що взаємодіють з продуктами згоряння. Тому завданням цього дослідження є:

1. Вивчення впливу складу біопалива на утворення основних шкідливих компонентів викидів –  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$ , CO, PM.

2. Формування рекомендацій щодо підбору біопалива та режимів його спалювання для мінімізації шкідливого впливу на навколишнє середовище та забезпечення екологічної безпеки енергетичних установок.

Реалізація цього завдання дає змогу не лише отримати науково обґрунтовані дані про зв'язок складу палива й викидів, а й сприяти розробці стратегій екологічно безпечного використання біопалива на промисловому та побутовому рівнях.

**Вклад основного матеріалу.** Для оцінки екологічних характеристик різних видів біопалива важливим є їх елементний склад, оскільки саме вміст основних елементів – вуглецю (C), водню (H), кисню (O), азоту (N), сірки (S), золи (A) та води (W) – визначає теплоту згоряння, рівень шкідливих викидів й екологічну безпечність спалювання.

У таблиці наведені дані щодо складу твердих, рідких і газоподібних біопалив, які широко застосовуються в енергетичних і промислових установках.

Високий вміст вуглецю та водню свідчить про значний енергетичний потенціал палива, тоді як підвищені концентрації азоту та сірки можуть призводити до збільшення викидів оксидів азоту ( $\text{NO}_x$ ) та сірки ( $\text{SO}_2$ ).

Отже, аналіз наведених даних дає змогу визначити, які види біопалива є найбільш екологічно безпечними і які, навпаки, супроводжуються підвищеними викидами шкідливих речовин, що є ключовим для вибору оптимального палива з погляду енергоефективності та охорони довкілля.

За даними таблиці, що відображає хімічний склад біопалива, було оцінено викиди основних забруднювачів –

$\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$ , CO та суспендованих твердих частинок (PM). Розрахунки проводилися на основі масового балансу та стехіометричних співвідношень під час згоряння з урахуванням вмісту азоту, сірки та мінеральних домішок у паливі, а також його теплотворної здатності. Отримані результати представлені графічно для демонстрації впливу складу біопалива та умов термохімічного перетворення (температурний режим, коефіцієнт надлишку повітря, режим горіння) на концентрації шкідливих речовин, що дає змогу оцінити відповідність емісії чинним екологічним нормативам і технологічну ефективність процесу.

**Тверді біопалива.** Для оцінки екологічних характеристик твердих біопалив було досліджено хімічний склад 20 зразків біомаси включно з вмістом основних елементів (C, H, O, N, S), а також зольністю (A) і вологістю (W). Результати елементного аналізу наведені у таблиці. Визначення складу палива здійснювалося експериментальним шляхом у лабораторних умовах.

На основі отриманих даних виконано розрахунок питомих показників емісії шкідливих речовин ( $\text{kSO}_2$ ,  $\text{kNO}_x$ ,  $\text{kCO}_2$ , ктв). Розрахунки проведено методом масового балансу з використанням стехіометричних співвідношень між елементним складом палива та продуктами його термохімічного перетворення.

На рис. 1 представлено порівняльний аналіз показників емісії  $\text{kSO}_2$  для різних видів біопалива, отриманих із сільськогосподарських та деревних відходів. Дані свідчать про суттєву варіабельність рівня утворення діоксиду сірки залежно від виду палива та його хімічного складу. Найвищі показники емісії спостерігаються для торфу (сухого), де  $\text{kSO}_2$  перевищує 450 г/ГДж що пов'язано з підвищеним вмістом сірки у вихідній сировині.

**Таблиця. Склад твердих, рідких і газоподібних біопалив**

№	Паливо	C, %	H, %	O, %	N, %	S, %	A, %	W, %
<b>ТВЕРДІ БІОПАЛИВА</b>								
1	Лушпиння соняшника	48,25	5,84	41,03	0,81	0,24	3,83	11,85
2	Солома пшенична	47,2	5,8	39,56	0,7	0,17	6,4	10
3	Рештки кукурудзи (стебла, качани)	46,23	5,89	45,87	0,65	0,01	5,58	0
4	Лушпиння рису	38,92	5,55	37,94	0,35	0,02	17,13	10
5	Міскантус	48,6	6	42,72	0,3	0,08	2,3	8,6
6	Хвойна деревина (суміш)	53,15	6,68	36,79	0,19	0	3,19	37,3
7	Дуб білий	50,24	5,46	43,8	0,36	0,01	1,52	0
8	Ячмінь (ціла рослина)	45,86	5,92	42,97	0,43	0,2	4,26	6,2
9	Багаса цукрової тростини	49,99	5,86	43,92	0,15	0,08	0	0
10	Насіння манго (відходи харчової промисловості)	43,8	6,79	45,18	1,13	0,09	3,01	51,41
11	Солома ріпакова	46,5	6	43	0,8	0,2	6,5	10
12	Тирса (змішана)	51	6	42	0,2	0,02	1	10
13	Очерет звичайний	47,5	5,9	43,9	0,6	0,1	4	9
14	Лушпиння гречки	48	5,6	40	0,7	0,1	6	10
15	Кукурудзяні качани	46	6	44	0,6	0,1	5	8
16	Тріска деревна	50	6	43	0,2	0,02	1	15
17	Пелети з тирси	51	6	41	0,3	0,02	0,7	10
18	Відходи виноградної лози	49	5,9	43	1	0,1	4	8
19	Горіхова шкаралупа	52	6	40	0,3	0,05	2	9

20	Торф (сухий)	55	6	33	2	0,5	5	30
<b>РІДКІ БІОПАЛИВА</b>								
1	Біоетанол	52,17	13,04	34,78	0	0	0	0
2	Біодизель (метиловий ефір рапсової олії)	77	12	11	0,1	0,01	0	0
3	Біометанол	37,5	12,5	50	0	0	0	0
4	Біоолія (піролізна рідина)	55	6,5	38	0,5	0,05	0	15
5	Біооліфа з тваринних жирів	76	12	11	0,5	0,1	0	0
<b>ГАЗОПОДІБНІ БІОПАЛИВА</b>								
1	Біогаз (гній, кукурудзяний силос)	36	8	56	0	0	0	0
2	Біометан (очищений біогаз)	75	25	0	0	0	0	0
3	Газ деревного піролізу (синтез-газ)	20	10	69	0,9	0,01	0	0
4	Газ із соняшникової шкаралупи (газифікація)	25	14	60	0,9	0,09	0	0
5	Біогаз із харчових відходів	35	9	56	0	0	0	0
6	Газ із деревного вугілля (газифікація)	20	5	60	0	0	0	0

Високі значення також зафіксовані для лушпиння соняшника (~250 г/ГДж) та дубової деревини (~200 г/ГДж). Натомість солома пшениці, рештки кукурудзи, лушпиння рису, міскантус, а також хвойна деревина характеризуються мінімальними показниками емісії, які не перевищують 50 г/ГДж. Це вказує на їх екологічну перевагу як палива з низьким потенціалом утворення  $SO_2$ .

Серед комбінованих і промислових біовідходів помірні значення показника емісії мають тирса (змішана), солома ріпакова та відходи виноградної лози, де  $kSO_2$  становить 100–150 г/ГДж. Пелети з тирси та горіхова шкаралупа також демонструють відносно низький рівень емісії, що підтверджує ефективність гранульованого біопалива для екологічно безпечного спалювання. Узагальнюючи, можна зазначити, що тип біомаси істотно впливає на показник утворення  $SO_2$ , і вибір палива з низьким вмістом сірки (солома, міскантус, деревні відходи) є ключовим чинником для зниження екологічного навантаження енергетичних установок.

Отримані результати підтверджують, що величина показника емісії  $kSO_2$  значною мірою залежить від вмісту сірки в біомасі та умов термічного перетворення палива. Біомаса рослинного походження (солома, міскантус, кукурудзяні рештки, рисове лушпиння) формує мінімальні обсяги утворення діоксиду сірки завдяки низькому вмісту мінеральної сірки в клітинній структурі. Це робить такі види палива екологічно привабливими для використання в малих і середніх котельнях, орієнтованих на зменшення антропогенних викидів. Підвищені значення емісії для торфу, деревини твердих порід та соняшникового лушпиння пояснюються наявністю сполук органічної та сульфатної сірки, що під час згоряння частково переходять у газову фазу. Висока інтенсивність утворення  $SO_2$  під час спалювання таких матеріалів вимагає застосування систем очищення димових газів або оптимізації температурного режиму топки з метою мінімізації процесів окиснення сірки.

Зіставлення отриманих результатів з даними попередніх досліджень [19, 20] показує подібні тенденції: найнижчі викиди спостерігаються для енергетичних культур з низьким вмістом золи та сірки, тоді як органічні

відходи промислового походження характеризуються більшою варіабельністю показників емісії.

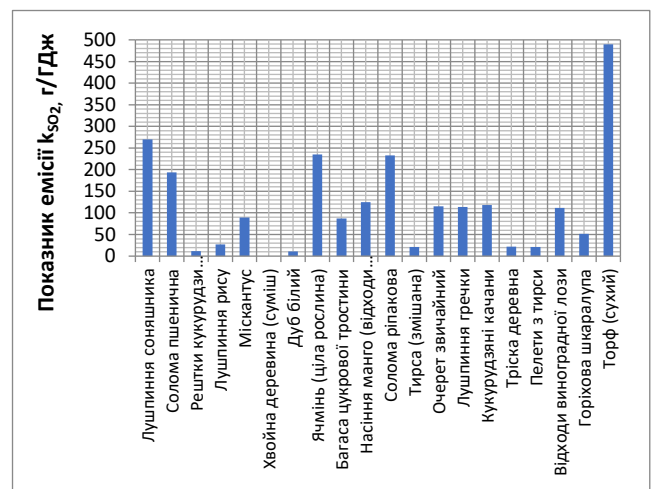


Рис. 1. Порівняльний аналіз показників емісії ( $kSO_2$ ) для різних видів твердого біопалива

На рис. 2 наведено результати порівняння питомих показників емісії діоксиду вуглецю  $kCO_2$  під час спалювання різних видів біомаси.

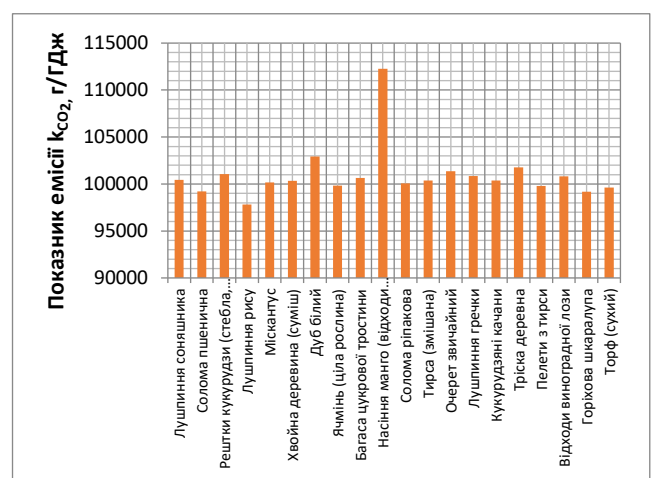


Рис. 2. Результати порівняння питомих показників емісії діоксиду вуглецю ( $kCO_2$ ) під час спалювання різних видів твердої біомаси

Як видно на рис. 2, значення  $\text{KCO}_2$  для більшості зразків перебувають у межах (95 000–105 000 г/ГДж), що узгоджується з типовими показниками для біопалива, яке характеризується майже нейтральним вуглецевим балансом, оскільки вуглець, який вивільняється під час спалювання, попередньо був засвоєний рослиною під час фотосинтезу. Найвищий рівень емісії виявлено для насіння манго (відходи) – понад 111 000 г/ГДж, що може бути зумовлено високим вмістом летких сполук вуглецю та неповним вигоранням при спалюванні. Дуб білий, лушпиння рису та солома ріпакова також демонструють дещо підвищені показники, що свідчить про наявність у структурі органічних речовин з більшою часткою вуглецю.

Найнижчі значення емісії  $\text{CO}_2$  спостерігаються для торфу (сухого) та горіхової шкаралупи, де  $\text{KCO}_2$  становить близько 93 000–9 000 г/ГДж. Це може бути пов'язано з високою теплою згорання та ефективнішим використанням вуглецю при термічному перетворенні цих матеріалів.

Найбільш екологічно доцільним з погляду співвідношення «викиди – енерговіддача» можна вважати міскантус, кукурудзяні рештки та солому пшениці, які характеризуються стабільними значеннями емісії за високого енергетичного потенціалу. Використання таких видів біомаси в промислових котлах дає змогу знизити сумарний вуглецевий слід енергетичних систем без втрати ефективності процесу згорання.

На рис. 3 подано порівняльний аналіз показників емісії оксидів азоту ( $\text{KNO}_x$ ) для різних видів біопалива.

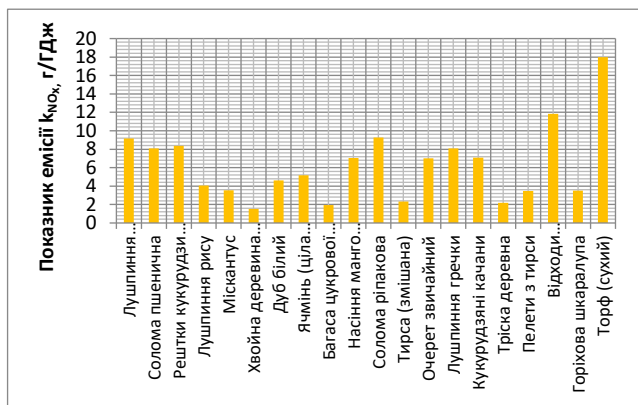


Рис. 3. Порівняльний аналіз показників емісії оксидів азоту ( $\text{KNO}_x$ ) для різних видів біопалива

Як видно на графіку, рівень утворення  $\text{NO}_x$  значно варіює залежно від походження та фізико-хімічних властивостей палива. Найвищі значення показника емісії зафіксовано для торфу (сухого), що свідчить про інтенсивне утворення оксидів азоту під час його згорання. Це пояснюється високим вмістом азотовмісних сполук у складі торфу. Високі показники також спостерігаються для деяких агровідходів, зокрема соломи ріпакової, відходів виноградної лози та кукурудзяних качанів. Натомість найнижчий рівень емісії характерний для деревних видів біопалива, зокрема дуба білого, хвойної деревини

(суміші) та пелет з тирси. Це свідчить про те, що деревна біомаса має кращі екологічні характеристики щодо утворення оксидів азоту під час спалювання. Помірні значення емісії спостерігаються для лушпиння соняшника, соломи пшениці та решток кукурудзи, що вказує на потенційну доцільність їх використання за належного контролю процесу горіння.

Отримані результати підтверджують, що тип біопалива істотно впливає на рівень утворення  $\text{NO}_x$ , а використання деревних видів або пелет з тирси може бути ефективним шляхом мінімізації негативного впливу на атмосферне повітря.

На рис. 4 подано порівняльну діаграму показників емісії твердих частинок (ктв, г/ГДж) для різних видів біопалива.

Аналіз отриманих результатів свідчить про суттєві відмінності у рівнях утворення твердих забруднювальних речовин залежно від хімічного складу та зольності палива. Найвищі значення емісії спостерігаються для лушпиння рису (понад 90 г/ГДж), що вказує на інтенсивне утворення твердих частинок у процесі його спалювання. Підвищені показники характерні також для лушпиння соняшника, соломи пшениці, соломи ріпакової та лучних трав, що зумовлено високим вмістом золи та сполук кремнезему в їх складі. Натомість хвойна і листяна деревина, пелети, тирса й торф демонструють найнижчі рівні емісії (до 20 г/ГДж), що свідчить про їхню відносну екологічну безпечність і доцільність використання як палива з мінімальним впливом на атмосферне середовище. Проміжні значення показників характерні для кукурудзи, міскантуса, відходів переробки виноградної лози та горіхової шкаралупи, які можна віднести до групи біопалив з помірним рівнем твердих викидів.

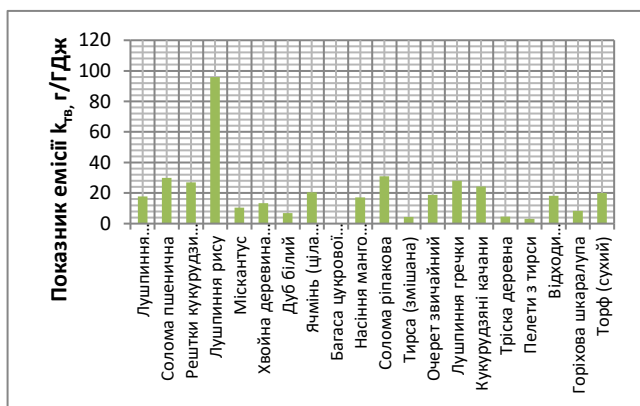


Рис. 4. Порівняльна діаграма показників емісії твердих частинок (ктв, г/ГДж) для різних видів твердого біопалива

Проведений порівняльний аналіз емісійних характеристик різних видів біопалива (рис. 1–4) засвідчив суттєвий вплив хімічного складу та зольності палива на рівень утворення основних забруднювальних компонентів ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}_2$  та твердих частинок). Найкращі екологічні показники продемонстрували міскантус, солома пшениці, кукурудзяні рештки, пелети з тирси та хвойна

деревина, для яких характерні низькі значення питомої емісії оксидів сірки й азоту (до 50 г/ГДж) та мінімальний вміст твердих частинок (до 20 г/ГДж). Такі види біомаси вирізняються стабільним вуглецевим балансом ( $\text{CO}_2 \approx 95\,000\text{--}105\,000$  г/ГДж), що свідчить про відносну передбачуваність утворення  $\text{CO}_2$  під час спалювання. Стабільність вуглецевого балансу забезпечує більш контрольовані умови горіння, знижує ризик перевищення гранично допустимих концентрацій шкідливих викидів і полегшує дотримання нормативних вимог до емісії як на промисловому, так і на побутовому рівні.

У малих та середніх котельнях, де технологічні параметри спалювання можуть бути менш регульованими, використання біомаси з передбачуваним вуглецевим балансом дає змогу забезпечити екологічно безпечну роботу обладнання, мінімізувати утворення  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_x$  та  $\text{SO}_2$  й оптимізувати тепловіддачу.

До групи біопалив з помірними показниками емісії належать солома ріпакова, лушпиння соняшника, відходи виноградної лози та горіхова шкаралупа, які потребують регулювання режиму горіння для мінімізації викидів  $\text{SO}_2$  та  $\text{NO}_x$ .

Найвищі рівні забруднення зафіксовано для торфу та лушпиння рису. У першому випадку це зумовлено підвищеним вмістом сполук сірки та азоту, що призводить до інтенсивного утворення  $\text{SO}_2$  і  $\text{NO}_x$  (понад 450 г/ГДж), тоді як у другому – високою зольністю та наявністю кремнезему, що спричиняє утворення значної кількості твердих частинок (> 90 г/ГДж). Такі види палива потребують застосування систем очищення димових газів або оптимізації температурного режиму згоряння для зниження екологічного навантаження.

Узагальнюючи, встановлено, що вибір біомаси з низьким вмістом сірки, азоту та золи є ключовим чинником для зменшення емісії шкідливих речовин і забезпечення екологічної ефективності енергетичних установок, що використовують тверде біопаливо.

**Рідкі біопалива.** Комплексне дослідження впливу складу біопалива на показники емісії є важливим як для твердих, так і для рідких його форм. Отримані результати для твердих матеріалів з біомаси дають змогу виявити закономірності між елементним складом, зольністю та утворенням забруднювальних речовин під час спалювання. Водночас аналогічні підходи можуть бути застосовані для оцінювання рідких біопалив, у яких процеси окиснення мають іншу кінетику, але визначаються тим самим фактором – хімічним складом вихідної сировини. Порівняння емісійних характеристик твердих і рідких біопалив забезпечує цілісне розуміння впливу природи палива на екологічні показники енергетичних систем та створює підґрунтя для оптимізації вибору палива залежно від типу установки й умов експлуатації.

Одним з ключових критеріїв екологічної ефективності біопалив є рівень емісії діоксиду вуглецю ( $\text{CO}_2$ ) під час їх спалювання. На рис. 5 представлено порівняльні

показники емісії  $\text{CO}_2$  (г/ГДж) для основних видів рідкого біопалива.

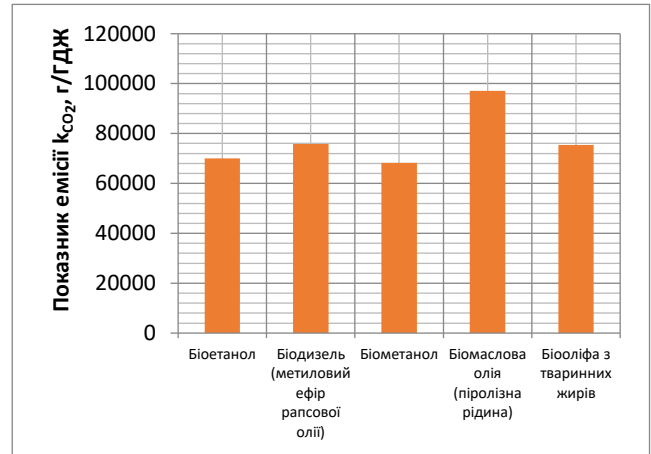


Рис. 5. Порівняльні показники емісії ( $\text{CO}_2$ , г/ГДж) для основних видів рідкого біопалива

Отримані результати свідчать, що показники емісії  $\text{CO}_2$  значно різняться залежно від хімічного складу палива й технології його одержання. Найвищий рівень емісії зафіксовано для біоолії (піролізної рідини) – близько 100 000 г/ГДж, що пояснюється високим вмістом вуглецю в її структурі. Дещо нижчі значення спостерігаються для біодизеля (метилового ефіру ріпакової олії) та біооліфи з тваринних жирів, де емісія становить приблизно 75 000–85 000 г/ГДж.

Біоетанол та біометанол характеризуються порівняно нижчими показниками емісії – на рівні 60 000–70 000 г/ГДж, що зумовлено меншим вмістом вуглецю в молекулярній структурі спиртів і повнішим згорянням цих речовин. Такі значення свідчать про менший внесок цих біопалив у викиди парникових газів за однакової енергетичної віддачі.

Таким чином, серед досліджених видів біопалива найменш вуглецеємними є біоетанол і біометанол, які можуть розглядатися як пріоритетні альтернативи для зниження вуглецевого сліду в енергетичних системах. Натомість використання біоолії потребує додаткових заходів з контролю емісій або оптимізації процесів згоряння для підвищення екологічної доцільності.

Дослідження екологічних характеристик біопалива є важливим етапом оцінювання його впливу на стан атмосферного повітря. На рис. 6 наведено порівняльні показники емісії оксидів сірки ( $\text{SO}_x$ ) та оксидів азоту ( $\text{NO}_x$ ) для основних видів біопалива: біоетанолу, біодизеля (метилового ефіру ріпакової олії), біометанолу, біоолії (піролізної рідини) та біооліфи з тваринних жирів.

Отримані результати свідчать, що біоетанол і біометанол практично не утворюють оксидів сірки, що зумовлено відсутністю сполук сірки в їх хімічному складі. Біодизель характеризується незначними викидами  $\text{SO}_x$  (приблизно 5 г/ГДж) та низьким рівнем  $\text{NO}_x$ , що свідчить про його відносну екологічну безпечність порівняно з іншими рідкими біопаливами.

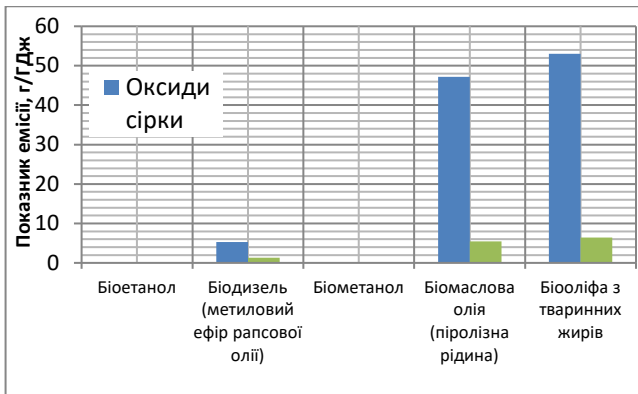


Рис. 6. Порівняльні показники емісії оксидів сірки (SO<sub>x</sub>) та оксидів азоту (NO<sub>x</sub>) для основних видів рідкого біопалива

Найвищі показники емісії спостерігаються для біоолії (піролізної рідини) та біооліфа з тваринних жирів, де концентрація оксидів сірки сягає 40–50 г/ГДж, а оксидів азоту – 8–10 г/ГДж. Така тенденція пояснюється підвищенням вмістом сірковмісних і азотовмісних сполук у вихідній сировині, а також складністю процесу згоряння цих видів палива.

Узагальнюючи результати, можна зробити висновок, що спиртові біопалива (біоетанол, біометанол) мають найкращі екологічні характеристики з-поміж досліджених зразків, тоді як біоолійні та жирові похідні потребують додаткової очистки або вдосконалення технологій спалювання для зменшення викидів SO<sub>x</sub> і NO<sub>x</sub>. Це підкреслює важливість урахування хімічного складу біопалива під час розроблення стратегій декарбонізації та переходу до низьковуглецевих енергетичних систем.

**Газоподібні палива.** Подальший етап дослідження стосується газоподібних біопалив, які посідають особливе місце серед відновлюваних енергоресурсів завдяки високій теплоті згоряння, низькому рівню емісії шкідливих речовин та універсальності застосування. До цієї групи належать біогаз, синтез-газ і водень, що можуть використовуватись як самостійні енергоносії або в суміші з природним газом. Газоподібні біопалива забезпечують найчистіший процес горіння, мінімізуючи утворення SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> і твердих частинок, а також відкривають перспективи для децентралізованого енергопостачання та низьковуглецевих технологій. Аналіз їх емісійних характеристик є важливим для оцінки потенціалу повного переходу на відновлювані джерела енергії та розроблення інтегрованих рішень у контексті сталого розвитку енергетики.

На рис. 7 зображено порівняння емісій оксидів сірки та оксидів азоту для різних типів біогазів і газових палив.

За показником емісії оксидів сірки найвищі значення спостерігаються для біогазу з харчових відходів (понад 100 г/ГДж), тоді як біогаз з інших джерел, зокрема кукурудзяний, очищений біогаз (біометан) і газ з деревного вугілля, практично не продукують цих сполук. Газ деревного піролізу та біогаз із соняшникової сировини характеризуються помірним рівнем емісії оксидів сірки

(приблизно 20 г/ГДж). Щодо оксидів азоту, їхній рівень значно нижчий у всіх розглянутих варіантах, проте спостерігається тенденція до підвищення емісії в тих самих зразках, де зростає кількість оксидів сірки. Це свідчить про взаємозв'язок між вмістом домішок у вихідній сировині та інтенсивністю утворення оксидів під час згоряння. Таким чином, найекологічнішими за показниками емісії шкідливих сполук є біометан та біогаз із кукурудзяної сировини, тоді як біогаз із харчових відходів потребує додаткового очищення або вдосконалення технологій згоряння для зниження викидів.

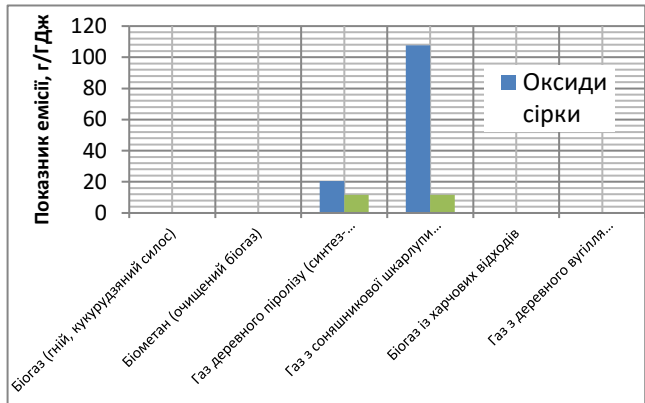


Рис. 7. Порівняльні показники емісії оксидів сірки (SO<sub>x</sub>) та оксидів азоту (NO<sub>x</sub>) для різних типів біогазів і газових палив

На рис. 8 відображено порівняння показників емісії оксидів вуглецю для різних видів біогазів і газових палив.

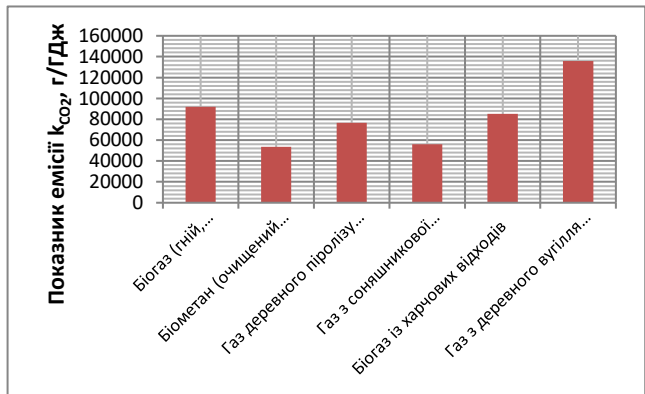


Рис. 8. Порівняння показників емісії оксидів вуглецю для різних видів біогазів і газових палив

Найвищі викиди оксидів вуглецю спостерігаються під час використання газу з деревного вугілля, де показник емісії перевищує 140 000 г/ГДж. Значні викиди також фіксуються для біогазу з гною та кукурудзяної сировини (понад 90 000 г/ГДж) і для біогазу з харчових відходів (близько 85 000 г/ГДж). Натомість біометан (очищений біогаз) демонструє найнижчий рівень утворення оксидів вуглецю – близько 55 000 г/ГДж. Подібні значення спостерігаються для газу із соняшникової сировини та газу деревного піролізу, що свідчить про порівняно чистіші процеси згоряння в цих видах палива.

Отримані результати вказують на значний вплив якості очищення біогазу та складу вихідної сировини на

інтенсивність утворення сполук азоту. Біометан, завдяки високому ступеню очищення, виявляється найекологічнішим з-поміж розглянутих варіантів. Натомість використання газу з деревного вугілля потребує додаткових технологічних заходів для зниження рівня емісії оксидів вуглецю, що є важливою умовою дотримання екологічних стандартів у процесах енергетичного використання біопалива.

Додатковий аналіз джерел літератури [5–7, 19–20] свідчить, що температура згоряння та режимні параметри котельних установок істотно впливають на інтенсивність утворення оксидів сірки й азоту. Підвищення температури сприяє окисненню сірковмісних сполук до  $\text{SO}_2$ , тоді як надлишок повітря збільшує частку термічного  $\text{NO}_x$ . Для біомаси з низьким вмістом азоту (солома, міскантус) цей ефект є незначним, однак для палив з підвищеним вмістом N і S (торф, лушпиння соняшника) висока температура згоряння посилює утворення полютантів. Таким чином, поєднання низькотемпературного горіння з контролем коефіцієнта надлишку повітря є ефективним шляхом зменшення емісії  $\text{SO}_2$  і  $\text{NO}_x$ , що підтверджує взаємозв'язок складу палива з термічними параметрами процесу.

На основі проведеного аналізу можна сформулювати практичні рекомендації щодо вибору біопалива та режимів його спалювання. Для забезпечення мінімальної емісії оксидів сірки та азоту доцільно використовувати біомасу з низьким вмістом S і N (солома пшениці, міскантус, кукурудзяні рештки, пелети з тирси). Оптимальні режими горіння, що передбачають підтримання температури в межах 850–950 °C та коефіцієнта надлишку повітря 1,1–1,3, наведені на основі аналізу даних літератури щодо ефективного спалювання твердих біопалив та мінімізації утворення шкідливих викидів [24, 25]. Ці параметри відповідають умовам, за яких забезпечується повніше згоряння палива з мінімальним утворенням  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_x$  та  $\text{SO}_2$ , що узгоджується з нормами екологічної безпеки для малих та середніх котельних установок. Застосування цих підходів сприятиме зниженню екологічного навантаження та підвищенню ефективності енергетичних установок, що працюють на біопаливі.

### Висновки

Проведене дослідження доводить, що елементний та мінеральний склад біопалива є визначальним чинником у формуванні його екологічних характеристик. Встановлено, що концентрації сірки, азоту та зольних компонентів безпосередньо корелюють з рівнями емісії  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}_2$  та твердих частинок, тоді як вміст вуглецю та водню визначає енергетичну ефективність процесу згоряння. Комплексний аналіз твердих, рідких і газоподібних біопалив засвідчив, що біомаса з низьким вмістом S, N і A (зокрема міскантус, солома пшениці, кукурудзяні рештки, пелети з тирси) характеризується мінімальними питомими показниками емісії та стабільним вуглецевим балансом, що робить її придатною для

застосування в котельнях малої й середньої потужності без потреби в складних системах очистки газів.

Рідкі біопалива спиртового типу (біоетанол, біометанол) виявилися найменш вуглецеємними з-поміж досліджених зразків, тоді як біоолії та жиrowі похідні потребують технологічної оптимізації для зниження рівнів  $\text{SO}_x$  і  $\text{NO}_x$ . Газоподібні біопалива, зокрема біометан, продемонстрували найвищу екологічну ефективність за рахунок відсутності сірковмісних домішок і повнішого згоряння.

Отримані результати дають змогу сформулювати рекомендації щодо вибору біопалива з оптимальним елементним складом і режимів його спалювання для забезпечення мінімального рівня емісії  $\text{SO}_2$  та  $\text{NO}_x$ .

Наукова новизна роботи полягає у створенні узагальненої методології оцінювання екологічних показників біопалива на основі його елементного складу з подальшою можливістю прогнозування емісії забруднювачів без проведення повномасштабних експериментів. Отримані результати розширюють наукове уявлення про механізми впливу складу біомаси на процеси термічного окиснення та утворення полютантів, що є важливим для розвитку концепції «чистого згоряння» (Clean Combustion).

Практична значущість дослідження полягає у формуванні бази даних для вибору оптимальних видів біопалива залежно від умов експлуатації енергетичних установок, а також у можливості використання результатів для вдосконалення моделей оцінки викидів у системах енергетичного моніторингу та екологічної сертифікації палива.

Перспективи подальших досліджень передбачають розроблення чисельних моделей взаємодії хімічного складу біопалива з режимними параметрами горіння, вивчення впливу нанодобавок на процеси окиснення та експериментальну перевірку прогнозованих емісійних залежностей у реальних енергетичних системах.

## ПОСИЛАННЯ

1. Hameed, R., Khan, M., & Abdullah, S. (2025). Influence of fuel bound nitrogen on NO<sub>x</sub> formation in multi scale biomass combustion systems. *Renewable Energy*, 242, 118–130. DOI: 10.1016/j.renene.2024.12.
2. IEA Bioenergy Task 32. (2025). NO<sub>x</sub> formation and control in biomass combustion: Thematic report. IEA Bioenergy.
3. Nguyen, H. T., & Pham, T. M. (2021). Emission characteristics of biodiesel combustion: Influence of ester composition and flame temperature. *Fuel Processing Technology*, 215, 106–119. DOI: 10.1016/j.fuproc.2021.106119
4. Al Farsi, R., Al Haj, A., & Al Abri, A. (2025). Diesel/biodiesel blends: Emission trends and sensitivity to fuel composition. *Energy Conversion and Management*, 305, 118568. DOI: 10.1016/j.enconman.2025.118568
5. Wang, Y., Li, X., & Zhang, C. (2024). Migration of Cl and S and their interactions with alkali/alkaline earth elements during biomass combustion. *Fuel*, 356, 129502. DOI: 10.1016/j.fuel.2024.129502
6. Xu, L., Chen, J., & Yang, F. (2024). Combined effects of chlorine, sulfur, and alkali metals on submicron particle formation during biomass firing. *Energy & Fuels*, 38(3), 1221–1235. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.3c03860
7. Liu, Q., Zhao, Z., & Fang, M. (2023). Migration and control of alkali metals in biomass combustion: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 183, 113490. DOI: 10.1016/j.rser.2023.113490
8. Li, S., Wang, H., & Zhao, Y. (2024). Phase transformation of silica in rice husk ash and its effect on particulate matter emissions. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 12(1), 110121. DOI: 10.1016/j.jece.2023.110121
9. Miah, M. A., Rahman, S., & Chowdhury, T. (2023). Combustion behavior and emission characteristics of rice husk under varying thermal regimes. *Energy Reports*, 9, 2112–2124. DOI: 10.1016/j.egy.2023.08.068
10. Dutta, A., Banerjee, S., & Ghosh, P. (2020). Effect of biomass pretreatment on emission characteristics during combustion. *Bioresource Technology*, 301, 122784. DOI: 10.1016/j.biortech.2019.122784
11. El Sayed, M., Ali, H., & Hassan, M. (2023). Co combustion of multi biomass blends: Effect on NO<sub>x</sub> and SO<sub>2</sub> emissions. *Fuel*, 345, 128911. DOI: 10.1016/j.fuel.2022.128911
12. Singh, R., Verma, P., & Gupta, A. (2024). Nanofuel additives in biodiesel: Mechanistic insights and emission reduction potential. *Journal of Cleaner Production*, 431, 138745. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.138745  
UDC 621.311.22:665.76
13. Grochowicz, M., Kowalski, J., & Nowak, D. (2022). Impurities in biogas and their influence on combustion emissions. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 44(10), 2523–2536. DOI: 10.1080/15567036.2020.1840557
14. JRC. (2024). Methane emissions in EU biogas and biomethane supply chains: Methodological review. Joint Research Centre, European Commission.
15. Fagerström, J., Pettersson, A., & Backman, R. (2025). Methane slip and gas composition effects in European biogas upgrading systems: A review. *Renewable Energy*, 252, 117922. DOI: 10.1016/j.renene.2024.117922
16. Zhang, T., Liu, Z., & Chen, Y. (2024). Rice husk combustion in circulating fluidized bed: Emission and ash behavior. *Fuel*, 352, 129302. DOI: 10.1016/j.fuel.2024.129302
17. Zhou, P., & Luo, D. (2022). Toxic emissions from biomass combustion: Heavy metals, PAH, and VOC formation pathways. *Science of the Total Environment*, 834, 155247. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.155247
18. Huang, X., Zhao, M., & Wang, L. (2024). Satellite based analysis of CO emissions from global biomass burning. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 24, 10211–10225. DOI: 10.5194/acp 24 10211 2024
19. Cobb, J., Adams, R., & Taylor, K. (2020). Comparative combustion of pyrolysis gas, bio oil, and coal: Emission characteristics. *Fuel*, 276, 118065. DOI: 10.1016/j.fuel.2020.118065
20. Rickard, C., Smith, L., & Johnson, M. (2025). Influence of domestic biomass combustion conditions on organic aerosol composition. *Atmospheric Environment*, 320, 120175. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2024.120175
21. IEA Bioenergy. (2023). Review of emission reduction strategies for biomass combustion. IEA Bioenergy.
22. Zhang, Y., Gao, X., & Li, P. (2022). Fuel nitrogen conversion during biomass pyrolysis: A comprehensive review. *Fuel Processing Technology*, 228, 107178. DOI: 10.1016/j.fuproc.2022.107178
23. Rahman, M., Alam, F., & Hossain, S. (2024). Sustainability and emission profile of biodiesel fuels: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 188, 113749. DOI: 10.1016/j.rser.2024.113749
24. Jenkins B.M., Baxter L.L., Miles T.R., Miles T.R. Jr. Combustion properties of biomass. *Fuel Processing Technology*, 1998, 54(1), 17–46. [https://doi.org/10.1016/S0378-3820\(97\)00059-7](https://doi.org/10.1016/S0378-3820(97)00059-7)
25. Van Loo S., Koppejan J. *The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing*. London: Earthscan, 2008, 400 p. ISBN 978-1-84407-555-2

## ENVIRONMENTAL ASPECTS OF BIOFUEL COMBUSTION: INFLUENCE OF FUEL COMPOSITION ON POLLUTANT EMISSIONS

Received Nov. 13, 2026; accepted Jun. 26, 2026  
Available online June. 30, 2026

Sheleshey T.<sup>1</sup>, Bednarska I.<sup>2</sup>, Syvachenko V.<sup>3</sup>

Author for correspondence: Sheleshey Tetiana,  
e-mail: sheleshey\_tanya@ukr.net

<sup>1</sup> Cand. of Techn. Sciences  
<https://orcid.org/0000-0002-7242-4107>

<sup>2</sup> PhD  
<https://orcid.org/0000-0002-5558-4467>

<sup>3</sup> Master's Student  
<https://orcid.org/0009-0006-2448-3301>

<sup>1, 2, 3</sup> National Technical University of  
Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic In-  
stitute", Kyiv, Ukraine

**Abstract.** *The article investigates the environmental aspects of biofuel combustion with a focus on the influence of fuel composition on the formation of harmful emissions. The study's relevance stems from the global need to reduce anthropogenic air pollution and greenhouse gas emissions in the context of the transition to renewable energy sources and carbon neutrality goals. The relationship between the elemental composition of biomass—namely carbon, hydrogen, oxygen, nitrogen, sulfur, ash, and moisture content—and the emission levels of major pollutants such as sulfur oxides (SO<sub>2</sub>), nitrogen oxides (NO<sub>x</sub>), carbon dioxide (CO<sub>2</sub>), and particulate matter (PM) is analyzed. The methodological framework of the research combines literature data, experimental results, and stoichiometric calculations to assess specific emission indices. The obtained results reveal consistent correlations between the content of sulfur, nitrogen, and ash in biofuels and the intensity of pollutant formation during combustion. The lowest emission levels were recorded for miscanthus, wheat straw, corn residues, and sawdust pellets, whereas peat, rice husk, and sunflower husk demonstrated higher SO<sub>2</sub> and PM emissions. For liquid biofuels, alcohol-based fuels (bioethanol, biomethanol) exhibited the lowest carbon footprint, while pyrolysis bio-oil and animal-fat derivatives showed elevated emissions, requiring optimized combustion control. Among gaseous biofuels, biomethane demonstrated the best ecological performance, characterized by minimal formation of SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, and CO. The scientific novelty of the work lies in the comprehensive comparison of solid, liquid, and gaseous biofuels based on their chemical and environmental characteristics. The practical significance of the study consists in the development of selection criteria for eco-efficient biofuels and recommendations for optimizing combustion parameters to minimize environmental impact and enhance air quality in energy systems operating on renewable fuels.*

**Keywords:** *biofuel, fuel composition, emissions, sulfur oxides, nitrogen oxides, particulate matter, environmental safety, decarbonization.*

**Introduction.** Modern energy systems are undergoing a profound transformation driven by global trends of decarbonization, the transition to renewable energy sources, and the need to reduce anthropogenic greenhouse gas emissions. In this context, biofuels are considered one of the most promising alternatives to conventional fossil energy carriers due to their renewability, potential carbon neutrality, and the possibility of utilizing locally available feedstock. According to estimates by the International Energy Agency, the share of bioenergy in the global energy balance is gradually increasing; however, the efficiency of its application is largely determined by the quality and composition of specific types of biomass.

The chemical composition of biofuels is a key factor that determines both the energy and environmental characteristics of the combustion process. The content of carbon (C) and hydrogen (H) directly affects the calorific value and the formation of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) and water vapor (H<sub>2</sub>O), whereas nitrogen (N) and sulfur (S) are the primary sources

of nitrogen oxides (NO<sub>x</sub>) and sulfur oxides (SO<sub>x</sub>), which are among the most hazardous atmospheric pollutants. High ash content (A) and moisture content (W) deteriorate combustion completeness, lead to the formation of fine particulate matter, slagging, and reduced efficiency of heat-generating units. Thus, a detailed analysis of the elemental composition of biofuels is a necessary prerequisite for assessing their energy potential, environmental safety, and suitability for use in energy supply systems.

Given the diversity of organic feedstock—from agricultural residues to woody biomass and biogas—there is a need to systematize data on their composition and to compare their environmental performance indicators. This makes it possible to establish the relationship between the chemical parameters of biofuels and the level of harmful substance formation during combustion, which forms the basis for selecting the optimal type of fuel with regard to energy efficiency and environmental protection requirements.

**Literature Review.** The increasing use of biomass as a renewable energy resource necessitates a comprehensive understanding of the processes of harmful substance formation during its combustion and gasification. Despite the carbon neutrality of biofuels, their composition—particularly the content of nitrogen, sulfur, chlorine, ash, and alkali elements—significantly influences the formation of nitrogen oxides (NO<sub>x</sub>), sulfur oxides (SO<sub>x</sub>), particulate matter (PM), and toxic organic compounds. As noted in [1] and [2], the primary source of NO<sub>x</sub> during biomass combustion is fuel-bound nitrogen, whereas the contribution of thermal mechanisms is secondary. The influence of nitrogen and sulfur on gasification processes and NO<sub>x</sub>/SO<sub>x</sub> formation is determined both by their content in the original fuel and by combustion conditions, as confirmed by studies [3,4] on the combustion of biodiesel and its blends with diesel fuel.

The mineral composition of biofuels also plays an important role in emission formation. The interaction of alkali (Na, K) and alkaline earth (Ca, Mg) elements with chlorine and sulfur determines the mechanisms of formation of sub-micron particulate matter, chlorides, and sulfates, which enhance ash corrosivity and toxicity [5–7]. For fuels with high silica content, such as rice husk, phase transformations of SiO<sub>2</sub> in ash significantly affect the formation of fine particulate matter and toxic compounds [8,9].

Pre-treatment of biomass—such as drying, torrefaction, blending of different fuel types, or modification with nano-additives—is considered an effective approach to reducing emissions of NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, and PM. As demonstrated in [10] and [11], changes in elemental composition following thermal pre-treatment of biomass or the combustion of fractions with lower S/N/Cl content contribute to the reduction of harmful emissions. Nano-additives in biodiesel also influence the mechanisms of NO<sub>x</sub> and suspended particulate formation [12], demonstrating the potential for optimizing fuel composition.

Particular attention is paid to gaseous biofuels—biogas, biomethane, and gasification products. According to [13], impurities such as NH<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>S, siloxanes, and moisture in biogas significantly increase the formation of NO<sub>x</sub> and SO<sub>x</sub>. Report [14] and review [15] emphasize that the composition of biogas and the selection of purification and upgrading technologies determine the level of methane losses and the overall environmental performance of the systems.

The dependence of environmental characteristics on the type of biomass has been confirmed by numerous studies. For rice husk [16], low NO levels but a high tendency for the formation of SiO<sub>2</sub>-enriched particles have been identified. Review [17] generalizes that the type of biomass, impurity concentrations, and combustion conditions determine the profile of toxic emissions—from heavy metals to polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and volatile organic compounds (VOCs). Satellite-based analysis [18] confirms that even natural biomass fires exhibit a dependence of CO composition and other combustion products on the biochemical composition of vegetation.

In scientific studies, approaches based on the analysis of elemental composition and physicochemical properties are widely used to assess the environmental characteristics of

biofuels. A number of works have established the presence of correlation relationships between biofuel composition and the level of harmful emissions generated during thermochemical conversion, particularly nitrogen oxides and particulate matter [18–19].

At the same time, research findings indicate that the magnitude of pollutant emissions is determined not only by the elemental composition of the fuel but also by process conditions—namely the temperature regime, excess air coefficient, and design features of the energy installation [20]. In this regard, the use of correlation relationships between biofuel composition and the formation of harmful substances is appropriate primarily for preliminary prediction of environmental indicators, but it requires consideration of the technological parameters of the fuel's energy conversion process.

In summary, the composition of biomass—both organic (content of C, H, O, N, S) and inorganic (mineral and ash components)—is a determining factor in the formation of the structure and volume of harmful emissions during combustion and gasification. Therefore, assessing the relationship between the elemental and mineral composition of biofuels and the environmental performance of the combustion process is a key direction of contemporary research in the context of sustainable development and the energy transition [21–23].

**Problem Statement.** Atmospheric air pollution resulting from biofuel combustion remains one of the key environmental challenges of our time. Emissions of nitrogen oxides (NO<sub>x</sub>), sulfur oxides (SO<sub>x</sub>), and suspended particulate matter (PM) are largely determined by the chemical composition of the fuel and the conditions of its combustion. Biofuels are characterized by varying contents of carbon, hydrogen, oxygen, nitrogen, and sulfur, as well as the presence of mineral impurities and metals that interact with combustion products. Therefore, the objectives of this study are:

1. To investigate the influence of biofuel composition on the formation of major harmful emission components—NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, CO, and PM.
2. To develop recommendations for the selection of biofuels and their combustion regimes in order to minimize environmental impact and ensure the environmental safety of energy systems.

The implementation of these objectives makes it possible not only to obtain scientifically substantiated data on the relationship between fuel composition and emissions, but also to contribute to the development of strategies for the environmentally safe use of biofuels at both industrial and domestic levels.

**Main Body.** For assessing the environmental characteristics of various types of biofuels, their elemental composition is of primary importance, since the content of the main elements—carbon (C), hydrogen (H), oxygen (O), nitrogen (N), sulfur (S), ash (A), and moisture (W)—determines the calorific value, the level of harmful emissions, and the environmental safety of combustion.

Table presents data on the composition of solid, liquid, and gaseous biofuels that are widely used in energy and industrial installations.

A high content of carbon and hydrogen indicates a significant energy potential of the fuel, whereas elevated concentrations of nitrogen and sulfur may lead to increased emissions of nitrogen oxides (NO<sub>x</sub>) and sulfur dioxide (SO<sub>2</sub>).

Thus, the analysis of the presented data makes it possible to determine which types of biofuels are the most environmentally safe and which, on the contrary, are associated with increased emissions of harmful substances, which is crucial for selecting the optimal fuel from the standpoint of energy efficiency and environmental protection.

Based on the data presented in the Table reflecting the chemical composition of biofuels, emissions of the main pollutants—NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, CO, and suspended particulate matter (PM)—were evaluated. The calculations were performed using mass balance and stoichiometric relationships during combustion, taking into account the content of nitrogen, sulfur, and mineral impurities in the fuel, as well as its calorific value. The obtained results are presented graphically to demonstrate the influence of biofuel composition and thermochemical conversion conditions (temperature regime, excess air coefficient, combustion regime) on

the concentrations of harmful substances, which makes it possible to assess compliance with current environmental standards and the technological efficiency of the process.

**Solid Biofuels.** To assess the environmental characteristics of solid biofuels, the chemical composition of 20 biomass samples was investigated, including the content of the main elements (C, H, O, N, S), as well as ash content (A) and moisture content (W). The results of the elemental analysis are presented in Table. The determination of fuel composition was carried out experimentally under laboratory conditions.

Based on the obtained data, the specific emission indicators of harmful substances (kSO<sub>2</sub>, kNO<sub>x</sub>, kCO<sub>2</sub>, kTV) were calculated. The calculations were performed using the mass balance method with the application of stoichiometric relationships between the elemental composition of the fuel and the products of its thermochemical conversion.

Figure 1 presents a comparative analysis of the emission indicator kSO<sub>2</sub> for various types of biofuels derived from agricultural and wood residues. The data indicate significant variability in the level of sulfur dioxide formation depending on the type of fuel and its chemical composition. The highest emission values are observed for peat (dry), where kSO<sub>2</sub> exceeds 450 g/GJ, which is associated with an increased sulfur content in the original feedstock.

**Table. Composition of solid, liquid and gaseous biofuels**

№	Fuel	C, %	H, %	O, %	N, %	S, %	A, %	W, %
<b>SOLID BIOFUELS</b>								
1	Sunflower husk	48,25	5,84	41,03	0,81	0,24	3,83	11,85
2	Wheat straw	47,2	5,8	39,56	0,7	0,17	6,4	10
3	Corn residues (stalks, cobs)	46,23	5,89	45,87	0,65	0,01	5,58	0
4	Rice husk	38,92	5,55	37,94	0,35	0,02	17,13	10
5	Miscanthus	48,6	6	42,72	0,3	0,08	2,3	8,6
6	Softwood (mixed)	53,15	6,68	36,79	0,19	0	3,19	37,3
7	White oak	50,24	5,46	43,8	0,36	0,01	1,52	0
8	Barley (whole plant)	45,86	5,92	42,97	0,43	0,2	4,26	6,2
9	Sugarcane bagasse	49,99	5,86	43,92	0,15	0,08	0	0
10	Mango seeds (food industry waste)	43,8	6,79	45,18	1,13	0,09	3,01	51,41
11	Rapeseed straw	46,5	6	43	0,8	0,2	6,5	10
12	Sawdust (mixed)	51	6	42	0,2	0,02	1	10
13	Common reed	47,5	5,9	43,9	0,6	0,1	4	9
14	Buckwheat husk	48	5,6	40	0,7	0,1	6	10
15	Corn cobs	46	6	44	0,6	0,1	5	8
16	Wood chips	50	6	43	0,2	0,02	1	15
17	Sawdust pellets	51	6	41	0,3	0,02	0,7	10
18	Grapevine residues	49	5,9	43	1	0,1	4	8
19	Nut shells	52	6	40	0,3	0,05	2	9
20	Peat (dry)	55	6	33	2	0,5	5	30
<b>LIQUID BIOFUELS</b>								
1	Bioethanol	52,17	13,04	34,78	0	0	0	0
2	Biodiesel (rapeseed oil methyl ester)	77	12	11	0,1	0,01	0	0

№	Fuel	C, %	H, %	O, %	N, %	S, %	A, %	W, %
3	Biomethanol	37,5	12,5	50	0	0	0	0
4	Bio-oil (pyrolysis liquid)	55	6,5	38	0,5	0,05	0	15
5	Bio-based oil from animal fats	76	12	11	0,5	0,1	0	0
GASEOUS BIOFUELS								
1	Biogas (manure, corn silage)	36	8	56	0	0	0	0
2	Biomethane (purified biogas)	75	25	0	0	0	0	0
3	Wood pyrolysis gas (syngas)	20	10	69	0,9	0,01	0	0
4	Gas from sunflower husk (gasification)	25	14	60	0,9	0,09	0	0
5	Biogas from food waste	35	9	56	0	0	0	0
6	Charcoal-derived gas (gasification)	20	5	60	0	0	0	0

High values are also observed for sunflower husk (~250 g/GJ) and oak wood (~200 g/GJ). In contrast, wheat straw, corn residues, rice husk, miscanthus, as well as softwood are characterized by minimal emission levels not exceeding 50 g/GJ. This indicates their environmental advantage as fuels with a low SO<sub>2</sub> formation potential.

Among combined and industrial bio-wastes, moderate emission values are observed for mixed sawdust, rapeseed straw, and grapevine residues, where kSO<sub>2</sub> amounts to 100–150 g/GJ. Sawdust pellets and nut shells also demonstrate relatively low emission levels, confirming the effectiveness of pelletized biofuels for environmentally safe combustion. In general, it can be noted that the type of biomass significantly affects the SO<sub>2</sub> formation indicator, and the selection of fuels with low sulfur content (straw, miscanthus, wood residues) is a key factor in reducing the environmental impact of energy installations.

The obtained results confirm that the value of the kSO<sub>2</sub> emission indicator largely depends on the sulfur content in biomass and the conditions of its thermal conversion. Biomass of plant origin (straw, miscanthus, corn residues, rice husk) generates minimal amounts of sulfur dioxide due to the low content of mineral sulfur in the cellular structure. This makes such fuels environmentally attractive for use in small and medium-sized boiler units aimed at reducing anthropogenic emissions. Increased emission values for peat, hardwood, and sunflower husk are explained by the presence of organic and sulfate sulfur compounds, which partially transition into the gas phase during combustion. The high intensity of SO<sub>2</sub> formation during the combustion of such materials requires the implementation of flue gas cleaning systems or optimization of the furnace temperature regime in order to minimize sulfur oxidation processes.

A comparison of the obtained results with data from previous studies [19–20] shows similar trends: the lowest emissions are observed for energy crops with low ash and sulfur content, whereas organic wastes of industrial origin are characterized by greater variability in emission indicators.

Figure 2 presents the results of a comparison of the specific emission indicators of carbon dioxide (kCO<sub>2</sub>) during the combustion of various types of biomass.

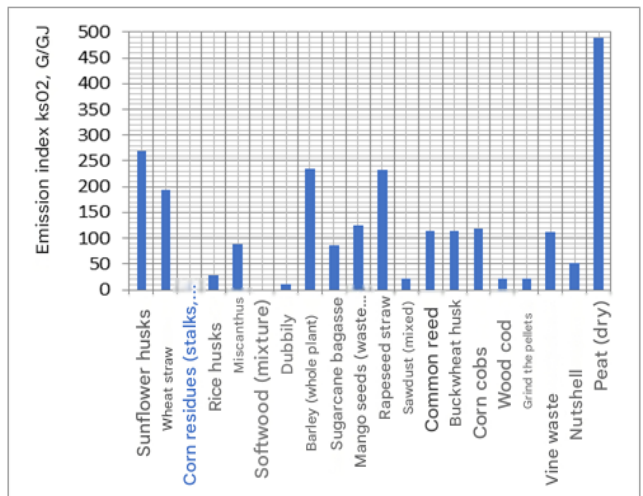


Fig. 1. Comparative analysis of (kSO<sub>2</sub>) emission indicators for different types of solid biofuels

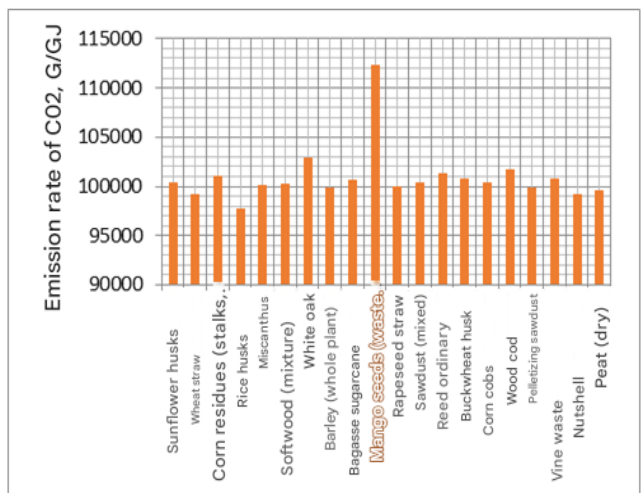


Fig. 2. Results of comparison of specific carbon dioxide emission indicators (kCO<sub>2</sub>) when burning different types of solid biomass: sunflower husk, wheat straw, corn residues (stalks, cobs), rice husk, miscanthus, mixed softwood, white oak, barley (whole plant), sugarcane bagasse, mango seeds (food industry waste), rapeseed straw, mixed sawdust, common reed, buckwheat husk, corn cobs, wood chips, sawdust pellets, grapevine residues, nut shells, and dry peat.

As shown in Figure 2, the  $kCO_2$  values for most samples fall within the range of 95,000–105,000 g/GJ, which is consistent with typical indicators for biofuels characterized by a nearly neutral carbon balance, since the carbon released during combustion was previously absorbed by the plant during photosynthesis. The highest emission level is observed for mango seeds (waste) —exceeding 111,000 g/GJ, which may be attributed to a high content of volatile carbon compounds and incomplete combustion. White oak, rice husk, and rapeseed straw also demonstrate slightly elevated values, indicating the presence of organic compounds with a higher carbon fraction in their structure. The lowest  $CO_2$  emission values are observed for peat (dry) and nut shells, where  $kCO_2$  is approximately 93,000–95,000 g/GJ. This may be associated with a higher calorific value and more efficient carbon utilization during the thermochemical conversion of these materials.

From the standpoint of the “emissions–energy output” ratio, miscanthus, corn residues, and wheat straw can be considered the most environmentally optimal, as they exhibit stable emission values combined with high energy potential. The use of such types of biomass in industrial boilers allows for a reduction in the overall carbon footprint of energy systems without compromising combustion efficiency. Figure 3 presents a comparative analysis of nitrogen oxides emission indicators ( $kNO_x$ ) for various types of biofuels.

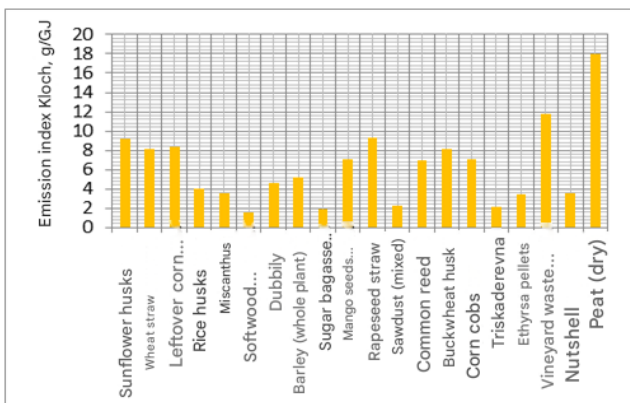


Fig. 3. Comparative analysis of nitrogen oxide emission indicators ( $kNO_x$ ) for different types of biofuels: sunflower husk, wheat straw, corn residues (stalks, cobs), rice husk, miscanthus, mixed softwood, white oak, barley (whole plant), sugarcane bagasse, mango seeds (food industry waste), rapeseed straw, mixed sawdust, common reed, buckwheat husk, corn cobs, wood chips, sawdust pellets, grapevine residues, nut shells, and dry peat.

As shown in the graph, the level of  $NO_x$  formation varies significantly depending on the origin and physicochemical properties of the fuel. The highest emission values are recorded for peat (dry), indicating intensive formation of nitrogen oxides during its combustion. This is explained by the high content of nitrogen-containing compounds in peat. Elevated values are also observed for certain agricultural residues, in particular rapeseed straw, grapevine residues, and corn cobs. In contrast, the lowest emission levels are characteristic of woody biofuels, including white oak, softwood

(mixture), and sawdust pellets. This indicates that woody biomass has more favorable environmental characteristics in terms of nitrogen oxide formation during combustion. Moderate emission values are observed for sunflower husk, wheat straw, and corn residues, suggesting the feasibility of their use under proper control of the combustion process.

The obtained results confirm that the type of biofuel significantly affects the level of  $NO_x$  formation, and the use of woody biomass or sawdust pellets can be an effective way to minimize the negative impact on atmospheric air.

Figure 4 presents a comparative diagram of particulate matter emission indicators ( $kTb$ , g/GJ) for various types of biofuels.

The analysis of the obtained results indicates significant differences in the levels of particulate pollutant formation depending on the chemical composition and ash content of the fuel. The highest emission values are observed for rice husk (over 90 g/GJ), indicating intensive formation of particulate matter during its combustion. Elevated levels are also characteristic of sunflower husk, wheat straw, rapeseed straw, and meadow grasses, which is due to high ash content and the presence of silica compounds in their composition.

In contrast, coniferous and deciduous wood, pellets, sawdust, and peat demonstrate the lowest emission levels (up to 20 g/GJ), indicating their relative environmental safety and suitability as fuels with minimal impact on the atmosphere. Intermediate values are characteristic of corn, miscanthus, grapevine processing residues, and nut shells, which can be classified as biofuels with a moderate level of particulate emissions.

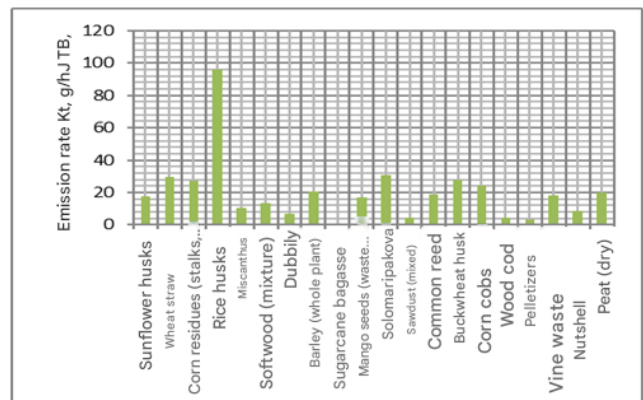


Fig. 4. Comparative diagram of particulate matter emission rates ( $kTb$ , g/GJ) for different types of solid biofuels: sunflower husk, wheat straw, corn residues (stalks, cobs), rice husk, miscanthus, mixed softwood, white oak, barley (whole plant), sugarcane bagasse, mango seeds (food industry waste), rapeseed straw, mixed sawdust, common reed, buckwheat husk, corn cobs, wood chips, sawdust pellets, grapevine residues, nut shells, and dry peat.

The conducted comparative analysis of emission characteristics of various types of biofuels (Figs. 1–4) has demonstrated a significant influence of the chemical composition

and ash content of the fuel on the level of formation of the main pollutant components ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}_2$ , and particulate matter). The best environmental performance was demonstrated by miscanthus, wheat straw, corn residues, sawdust pellets, and softwood, which are characterized by low specific emissions of sulfur and nitrogen oxides (up to 50 g/GJ) and minimal particulate matter content (up to 20 g/GJ). These types of biomass are distinguished by a stable carbon balance ( $k\text{CO}_2 \approx 95,000\text{--}105,000$  g/GJ), indicating relatively predictable  $\text{CO}_2$  formation during combustion. The stability of the carbon balance ensures more controlled combustion conditions, reduces the risk of exceeding permissible emission limits, and facilitates compliance with regulatory requirements at both industrial and domestic levels.

In small and medium-sized boiler units, where combustion process parameters may be less regulated, the use of biomass with a predictable carbon balance allows for environmentally safe equipment operation, minimizes the formation of  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_x$ , and  $\text{SO}_2$ , and optimizes heat output.

The group of biofuels with moderate emission indicators includes rapeseed straw, sunflower husk, grapevine residues, and nut shells, which require combustion regime control to minimize  $\text{SO}_2$  and  $\text{NO}_x$  emissions.

The highest pollution levels are recorded for peat and rice husk. In the first case, this is due to an increased content of sulfur and nitrogen compounds, leading to intensive formation of  $\text{SO}_2$  and  $\text{NO}_x$  (over 450 g/GJ), whereas in the second case, it is associated with high ash content and the presence of silica, resulting in the formation of a significant amount of particulate matter (>90 g/GJ). Such fuels require the implementation of flue gas cleaning systems or optimization of the combustion temperature regime to reduce environmental impact.

In summary, it has been established that the selection of biomass with low sulfur, nitrogen, and ash content is a key factor in reducing harmful emissions and ensuring the environmental efficiency of energy systems using solid biofuels.

**Liquid Biofuels.** A comprehensive study of the influence of biofuel composition on emission indicators is important for both solid and liquid forms. The results obtained for solid biomass materials make it possible to identify relationships between elemental composition, ash content, and the formation of pollutants during combustion. At the same time, similar approaches can be applied to the assessment of liquid biofuels, in which oxidation processes exhibit different kinetics but are governed by the same determining factor—the chemical composition of the initial feedstock.

A comparison of the emission characteristics of solid and liquid biofuels provides a comprehensive understanding of the influence of fuel nature on the environmental performance of energy systems and creates a basis for optimizing fuel selection depending on the type of installation and operating conditions.

One of the key criteria for the environmental efficiency of biofuels is the level of carbon dioxide ( $\text{CO}_2$ ) emissions

during their combustion. Figure 5 presents comparative indicators of  $k\text{CO}_2$  emissions (g/GJ) for the main types of liquid biofuels.

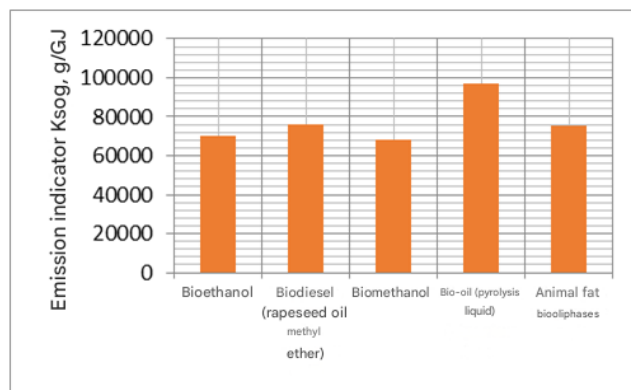


Fig. 5. Comparative emission indicators ( $k\text{CO}_2$ , g/GJ) for the main types of liquid biofuels: bioethanol, biodiesel (rapeseed oil methyl ester), biomethanol, bio-oil (pyrolysis liquid), bio-based oil from animal fats

The obtained results indicate that  $\text{CO}_2$  emission indicators vary significantly depending on the chemical composition of the fuel and the technology of its production. The highest emission level is recorded for bio-oil (pyrolysis liquid) — about 100,000 g/GJ, which is explained by the high carbon content in its structure. Slightly lower values are observed for biodiesel (rapeseed oil methyl ester) and bio-oil from animal fats, where emissions are approximately 75,000–85,000 g/GJ.

Bioethanol and biomethanol are characterized by relatively lower emission values—at the level of 60,000–70,000 g/GJ, which is due to a lower carbon content in the molecular structure of alcohols and more complete combustion of these substances. These values indicate a smaller contribution of these biofuels to greenhouse gas emissions at equal energy output.

Thus, among the studied types of biofuels, bioethanol and biomethanol are the least carbon-intensive and can be considered priority alternatives for reducing the carbon footprint in energy systems. In contrast, the use of bio-oil requires additional emission control measures or optimization of combustion processes to improve environmental performance.

The study of environmental characteristics of biofuels is an important stage in assessing their impact on atmospheric air quality. Figure 6 presents comparative indicators of sulfur oxides ( $\text{SO}_x$ ) and nitrogen oxides ( $\text{NO}_x$ ) emissions for the main types of biofuels: bioethanol, biodiesel (rapeseed oil methyl ester), biomethanol, bio-oil (pyrolysis liquid), and bio-oil from animal fats.

The results obtained show that bioethanol and biomethanol practically do not produce sulfur oxides, which is explained by the absence of sulfur compounds in their chemical composition. Biodiesel is characterized by low  $\text{SO}_x$  emissions (approximately 5 g/GJ) and a low level of  $\text{NO}_x$ ,

indicating its relative environmental safety compared to other liquid biofuels.

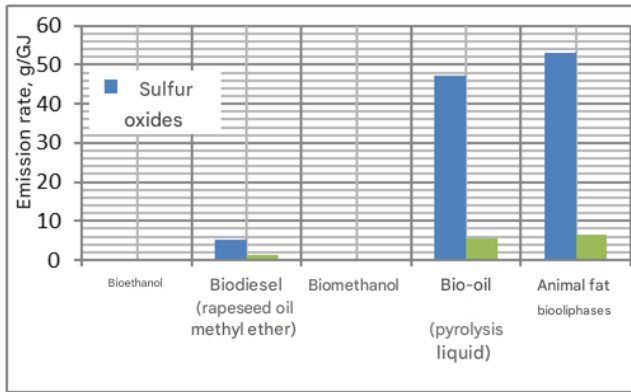


Fig. 6. Comparative emission indicators of sulfur oxides (SO<sub>x</sub>) and nitrogen oxides (NO<sub>x</sub>) for the main types of liquid biofuels: bioethanol, biodiesel (rapeseed oil methyl ester), biomethanol, bio-oil (pyrolysis liquid), bio-based oil from animal fats

The highest emission levels are observed for bio-oil (pyrolysis liquid) and bio-oil from animal fats, where the concentration of sulfur oxides reaches 40–50 g/GJ and nitrogen oxides 8–10 g/GJ. This trend is explained by the elevated content of sulfur- and nitrogen-containing compounds in the initial feedstock, as well as the complexity of the combustion process for these types of fuel.

In summary, it can be concluded that alcohol-based biofuels (bioethanol, biomethanol) exhibit the best environmental performance among the studied samples, whereas bio-oil and fat-derived fuels require additional purification or improvements in combustion technologies to reduce SO<sub>x</sub> and NO<sub>x</sub> emissions. This emphasizes the importance of considering the chemical composition of biofuels when developing decarbonization strategies and transitioning to low-carbon energy systems.

**Gaseous Fuels.** The next stage of the study concerns gaseous biofuels, which occupy a special place among renewable energy resources due to their high calorific value, low levels of harmful emissions, and versatility of application. This group includes biogas, syngas, and hydrogen, which can be used as standalone energy carriers or in mixtures with natural gas. Gaseous biofuels ensure the cleanest combustion process, minimizing the formation of SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, and particulate matter, and also open prospects for decentralized energy supply and low-carbon technologies. The analysis of their emission characteristics is important for assessing the potential for a complete transition to renewable energy sources and for developing integrated solutions in the context of sustainable energy development.

Figure 7 shows a comparison of sulfur oxide and nitrogen oxide emissions for different types of biogases and gaseous fuels.

In terms of sulfur oxide emissions, the highest values are observed for biogas derived from food waste (exceeding 100 g/GJ), whereas biogas from other sources—particularly

corn-based biogas, purified biogas (biomethane), and gas from charcoal—practically does not produce these compounds. Gas from wood pyrolysis and biogas derived from sunflower feedstock are characterized by moderate levels of sulfur oxide emissions (approximately 20 g/GJ).

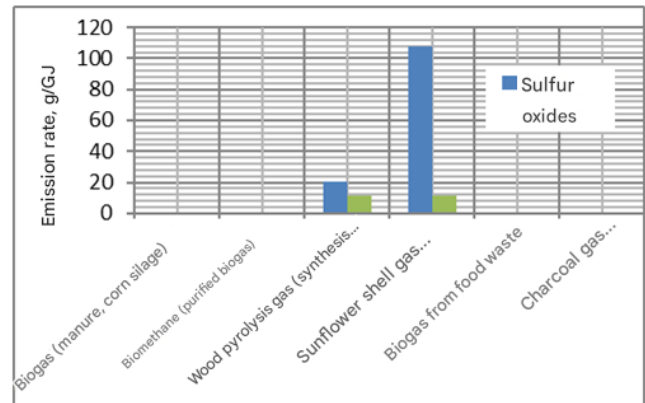


Fig. 7. Comparative emission indicators of sulfur oxides (SO<sub>x</sub>) and nitrogen oxides (NO<sub>x</sub>) for different types of biogas and gaseous fuels: biogas (manure, corn silage), biomethane (purified biogas), wood pyrolysis gas (syngas), gas from sunflower husk (gasification), biogas from food waste, charcoal-derived gas (gasification)

Regarding nitrogen oxides, their levels are significantly lower across all considered options; however, there is a noticeable trend of increasing emissions in the same samples where sulfur oxide levels rise. This indicates a correlation between the impurity content in the original feedstock and the intensity of oxide formation during combustion.

Thus, biomethane and corn-based biogas are the most environmentally favorable in terms of harmful emission indicators, whereas biogas from food waste requires additional purification or improvements in combustion technologies to reduce emissions.

Figure 8 presents a comparison of carbon oxide emission indicators for various types of biogas and gaseous fuels.

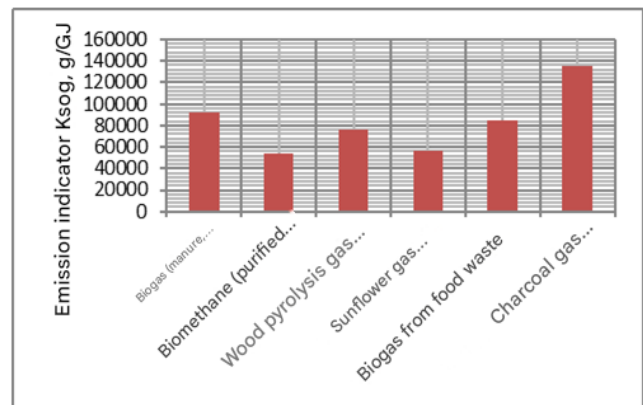


Fig. 8. Comparison of carbon oxide emission rates for different types of biogas and gaseous fuel: biogas (manure, corn silage), biomethane (purified biogas), wood pyrolysis gas (syngas), gas from sunflower husk (gasification), biogas from food waste, charcoal-derived gas (gasification)

The highest carbon oxide emissions are observed during the use of gas derived from charcoal, where the emission factor exceeds 140,000 g/GJ. Significant emissions are also recorded for biogas from manure and corn feedstock (over 90,000 g/GJ), as well as for biogas from food waste (approximately 85,000 g/GJ). In contrast, biomethane (purified biogas) demonstrates the lowest level of carbon oxide formation—about 55,000 g/GJ. Similar values are observed for gas derived from sunflower feedstock and wood pyrolysis gas, indicating relatively cleaner combustion processes for these fuel types.

The obtained results indicate a significant influence of biogas purification quality and feedstock composition on the intensity of nitrogen compound formation. Biomethane, due to its high degree of purification, proves to be the most environmentally friendly among the considered options. In contrast, the use of charcoal-derived gas requires additional technological measures to reduce carbon oxide emissions, which is an important condition for compliance with environmental standards in the energy utilization of biofuels.

Additional analysis of literature sources [5–7, 19–20] indicates that combustion temperature and operating parameters of boiler units significantly affect the intensity of sulfur and nitrogen oxide formation. An increase in temperature promotes the oxidation of sulfur-containing compounds to SO<sub>2</sub>, while excess air increases the fraction of thermal NO<sub>x</sub>. For biomass with low nitrogen content (straw, miscanthus), this effect is negligible; however, for fuels with elevated N and S content (peat, sunflower husk), high combustion temperatures intensify pollutant formation. Thus, the combination of low-temperature combustion with control of the excess air coefficient is an effective approach to reducing SO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> emissions, confirming the relationship between fuel composition and thermal process parameters.

Based on the conducted analysis, practical recommendations for the selection of biofuels and their combustion regimes can be formulated. To ensure minimal emissions of sulfur and nitrogen oxides, it is advisable to use biomass with low S and N content (wheat straw, miscanthus, corn residues, sawdust pellets). Optimal combustion conditions—maintaining temperatures within the range of 850–950 °C and an excess air coefficient of 1.1–1.3—are derived from an analysis of literature data on efficient solid biofuel combustion and the minimization of harmful emissions [24–25]. These parameters correspond to conditions under which more complete fuel combustion is achieved with minimal formation of CO, NO<sub>x</sub>, and SO<sub>2</sub>, consistent with environmental safety standards for small and medium-sized boiler units. The application of these approaches will contribute to reducing environmental impact and improving the efficiency of biofuel-based energy systems.

**Conclusions.** The conducted study demonstrates that the elemental and mineral composition of biofuel is a determining factor in shaping its environmental characteristics. It has been established that the concentrations of sulfur,

nitrogen, and ash-forming components directly correlate with the emission levels of SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub>, and particulate matter, while the carbon and hydrogen content determines the energy efficiency of the combustion process. A comprehensive analysis of solid, liquid, and gaseous biofuels has shown that biomass with low S, N, and ash (A) content (in particular, miscanthus, wheat straw, corn residues, and sawdust pellets) is characterized by minimal specific emission indicators and a stable carbon balance, making it suitable for use in small- and medium-capacity boiler systems without the need for complex gas cleaning systems.

Liquid biofuels of the alcohol type (bioethanol, biomethanol) were found to be the least carbon-intensive among the studied samples, whereas bio-oils and lipid-derived fuels require technological optimization to reduce SO<sub>x</sub> and NO<sub>x</sub> levels. Gaseous biofuels, particularly biomethane, demonstrated the highest environmental efficiency due to the absence of sulfur-containing impurities and more complete combustion.

The obtained results make it possible to formulate recommendations for selecting biofuels with an optimal elemental composition and appropriate combustion regimes to ensure minimal emissions of SO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub>.

The scientific novelty of this work lies in the development of a generalized methodology for assessing the environmental performance of biofuels based on their elemental composition, with the subsequent possibility of predicting pollutant emissions without conducting full-scale experiments. The results expand the scientific understanding of the mechanisms by which biomass composition influences thermal oxidation processes and pollutant formation, which is important for the development of the “Clean Combustion” concept.

The practical significance of the study lies in the creation of a database for selecting optimal types of biofuels depending on the operating conditions of energy systems, as well as in the possibility of applying the results to improve emission assessment models in energy monitoring systems and environmental certification of fuels.

Prospects for further research include the development of numerical models describing the interaction between the chemical composition of biofuels and combustion parameters, the study of the effects of nano-additives on oxidation processes, and the experimental validation of predicted emission relationships in real energy systems.

## REFERENCES

1. Hameed, R., Khan, M., & Abdullah, S. (2025). Influence of fuel bound nitrogen on NO<sub>x</sub> formation in multi scale biomass combustion systems. *Renewable Energy*, 242, 118–130. DOI: 10.1016/j.renene.2024.12.
2. IEA Bioenergy Task 32. (2025). NO<sub>x</sub> formation and control in biomass combustion: Thematic report. IEA Bioenergy.

3. Nguyen, H. T., & Pham, T. M. (2021). Emission characteristics of biodiesel combustion: Influence of ester composition and flame temperature. *Fuel Processing Technology*, 215, 106–119. DOI: 10.1016/j.fuproc.2021.106119
4. Al Farsi, R., Al Haj, A., & Al Abri, A. (2025). Diesel/biodiesel blends: Emission trends and sensitivity to fuel composition. *Energy Conversion and Management*, 305, 118568. DOI: 10.1016/j.enconman.2025.118568
5. Wang, Y., Li, X., & Zhang, C. (2024). Migration of Cl and S and their interactions with alkali/alkaline earth elements during biomass combustion. *Fuel*, 356, 129502. DOI: 10.1016/j.fuel.2024.129502
6. Xu, L., Chen, J., & Yang, F. (2024). Combined effects of chlorine, sulfur, and alkali metals on submicron particle formation during biomass firing. *Energy & Fuels*, 38(3), 1221–1235. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.3c03860
7. Liu, Q., Zhao, Z., & Fang, M. (2023). Migration and control of alkali metals in biomass combustion: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 183, 113490. DOI: 10.1016/j.rser.2023.113490
8. Li, S., Wang, H., & Zhao, Y. (2024). Phase transformation of silica in rice husk ash and its effect on particulate matter emissions. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 12(1), 110121. DOI: 10.1016/j.jece.2023.110121
9. Miah, M. A., Rahman, S., & Chowdhury, T. (2023). Combustion behavior and emission characteristics of rice husk under varying thermal regimes. *Energy Reports*, 9, 2112–2124. DOI: 10.1016/j.egyr.2023.08.068
10. Dutta, A., Banerjee, S., & Ghosh, P. (2020). Effect of biomass pretreatment on emission characteristics during combustion. *Bioresource Technology*, 301, 122784. DOI: 10.1016/j.biortech.2019.122784
11. El Sayed, M., Ali, H., & Hassan, M. (2023). Co combustion of multi biomass blends: Effect on NO<sub>x</sub> and SO<sub>2</sub> emissions. *Fuel*, 345, 128911. DOI: 10.1016/j.fuel.2022.128911
12. Singh, R., Verma, P., & Gupta, A. (2024). Nanofuel additives in biodiesel: Mechanistic insights and emission reduction potential. *Journal of Cleaner Production*, 431, 138745. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.138745
13. Grochowicz, M., Kowalski, J., & Nowak, D. (2022). Impurities in biogas and their influence on combustion emissions. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 44(10), 2523–2536. DOI: 10.1080/15567036.2020.1840557
14. JRC. (2024). Methane emissions in EU biogas and biomethane supply chains: Methodological review. Joint Research Centre, European Commission.
15. Fagerström, J., Pettersson, A., & Backman, R. (2025). Methane slip and gas composition effects in European biogas upgrading systems: A review. *Renewable Energy*, 252, 117922. DOI: 10.1016/j.renene.2024.117922
16. Zhang, T., Liu, Z., & Chen, Y. (2024). Rice husk combustion in circulating fluidized bed: Emission and ash behavior. *Fuel*, 352, 129302. DOI: 10.1016/j.fuel.2024.129302
17. Zhou, P., & Luo, D. (2022). Toxic emissions from biomass combustion: Heavy metals, PAH, and VOC formation pathways. *Science of the Total Environment*, 834, 155247. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.155247
18. Huang, X., Zhao, M., & Wang, L. (2024). Satellite based analysis of CO emissions from global biomass burning. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 24, 10211–10225. DOI: 10.5194/acp 24 10211 2024
19. Cobb, J., Adams, R., & Taylor, K. (2020). Comparative combustion of pyrolysis gas, bio oil, and coal: Emission characteristics. *Fuel*, 276, 118065. DOI: 10.1016/j.fuel.2020.118065
20. Rickard, C., Smith, L., & Johnson, M. (2025). Influence of domestic biomass combustion conditions on organic aerosol composition. *Atmospheric Environment*, 320, 120175. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2024.120175
21. IEA Bioenergy. (2023). Review of emission reduction strategies for biomass combustion. IEA Bioenergy.
22. Zhang, Y., Gao, X., & Li, P. (2022). Fuel nitrogen conversion during biomass pyrolysis: A comprehensive review. *Fuel Processing Technology*, 228, 107178. DOI: 10.1016/j.fuproc.2022.107178
23. Rahman, M., Alam, F., & Hossain, S. (2024). Sustainability and emission profile of biodiesel fuels: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 188, 113749. DOI: 10.1016/j.rser.2024.113749
24. Jenkins B.M., Baxter L.L., Miles T.R., Miles T.R. Jr. Combustion properties of biomass. *Fuel Processing Technology*, 1998, 54(1), 17–46. [https://doi.org/10.1016/S0378-3820\(97\)00059-7](https://doi.org/10.1016/S0378-3820(97)00059-7)
25. Van Loo S., Koppejan J. *The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing*. London: Earthscan, 2008, 400 p. ISBN 978-1-84407-555-2