

ЯКІСТЬ І БЕЗПЕКА ПРОМИСЛОВИХ ТОВАРІВ, СТАНДАРТИЗАЦІЯ, МЕТРОЛОГІЯ, СЕРТИФІКАЦІЯ ТА УПРАВЛІННЯ ЯКІСТЮ

УДК 499.86.676.034

DOI <https://doi.org/10.37734/2518-7171-2024-1-6>

ВИЗНАЧЕННЯ ЩІЛЬНОСТІ ОРГАНІЧНОЇ СИРОВИНИ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ БІОТЕПЛОІЗОЛЯЦІЙНОГО МАТЕРІАЛУ

Г. І. ГОЛОДУК, кандидат технічних наук, доцент;

Н. М. ГУРГУЛА, старший лаборант кафедри товарознавства та експертизи в митній справі
(Луцький національний технічний університет)

Анотація. Будівельний сектор рухається до нових підходів енергоефективного проектування, які включають не лише покращення теплових характеристик конструкцій, але й зменшення використаної енергії. Розробка теплоізоляційних матеріалів на основі відходів рослинництва сприяє таким підходам, оскільки їх використання може призвести до зменшення попиту на енергію, її використання, разом з іншими корисними екологічними аспектами, такими як скорочення виснаження невідновлюваних ресурсів та утворення відходів.

На сьогодні існує декілька комерційних прикладів використання біоматеріалів у будівництві, які здебільшого базуються на промислових волокнах (льон, конопі, кенаф тощо), деревині чи овечий вовні. Використання побічних продуктів харчових культур мени поширене, але може бути цікавою альтернативою для деяких країн, таких як Україна, де промислове виробництво волокна є дуже незначним. Ці побічні продукти, особливо солома зернових, використовувалися і все частіше використовуються в будівництві як армування композитних матеріалів, оздоблення палуб, внутрішніх перегородок або структурних перекриттів. У цьому дослідженні запропоновано їх використання в теплоізоляції будівель.

Дослідження спрямоване на вивчення можливості використання побічних продуктів, доступних в Україні, для розробки жорстких теплоізоляційних плит. У результаті для розробки було обрано три широко доступні побічні продукти рослинництва (ячмінну солому, кукурудзяну серцевину та рисове лушпиння).

Щільність і пористість, мабуть, є найбільш важливими фізичними властивостями при оцінці гігро-термічних характеристик матеріалів. Дослідження проводили до та після вибивання для кожного розміру частинок за масою та об'ємом. Випробування повторювали вісім разів для кожного зразка.

Після цього відкрити пористість усередині частинок разом із простором між частинками розраховували як 1 – об'ємна щільність/уявна щільність. Результати чітко показують різницю в пористості та формах частинок між матеріалами: у той час як видима щільність подібна, об'ємна щільність набагато більше варіюється.

Ключові слова: теплоізоляційні матеріали, біоматеріали, побічні продукти рослинництва, ячмінна солома, заповнювач серцевини кукурудзи, рисове лушпиння.

Постановка проблеми в загальному вигляді.

Будівельний сектор вимагає нових підходів до енергоефективного проектування, які включають не лише поліпшення теплотехнічних показників будівельних конструкцій, але й зменшення використаної енергії та матеріалів. Розробка теплоізоляційних матеріалів на органічній основі сприяє таким підходам, оскільки їх використання може призвести до зменшення як попиту на енергію, так і використання енергії разом з іншими корисними екологічними аспектами, такими, як зменшення використання невідновлюваних ресурсів і утворення відходів.

Таким чином, впровадження оптимізованих систем теплоізоляції розглядається як одна з основних стратегій підвищення їх енергоефективності та скорочення похідних викидів. Дійсно, використання теплоізоляційних матеріалів

у Європі значно зросло в попередні роки, що відкриває дискусію щодо впливу цих матеріалів не лише на споживання енергії та викиди парникових газів, але й на подальші екологічні проблеми. Як-от якість повітря в приміщенні, утворення відходів або виснаження природних ресурсів.

Для опису поточної ситуації у світовій області теплоізоляції було проведено огляд літератури існуючих екологічно чистих ізоляційних матеріалів на основі природної сировини з різними виготовленими формами та властивостями. Все більшого поширення набувають сучасні екологічно чисті утеплювачі з рослинної сировини.

Пошук і створення ефективних теплоізоляційних матеріалів на основі дешевої сировини продовжує залишатися викликом. При цьому велике значення має критерій економії паливно-енергетичних ресурсів при виробництві

теплоізоляційних матеріалів. Залежно від складу речовин, з яких виготовлені теплоізоляційні матеріали, вони за певних умов можуть впливати на утеплені поверхні, навколишнє середовище та організм людини чи тварини.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. За останні роки вченими Л. Дядюша, Ю. Бобровим, В. Граневим, В. Курдюмовою, Н. Гончаровим, А. Люсевим велика увага приділялась широкому використанню відходів промисловості і сільськогосподарства в виробництві теплоізоляційних матеріалів. Основні методи розв'язання нетрадиційних задач теплопровідності розглядаються в роботах вчених України та зарубіжжя, а саме: В. В. Скопечького, І. В. Сергієнка, Г. А. Шинкаренка, Г. В. Залужної, П. В. Черпакова, Г. Н. Дулнева, С. О. Тихомірова, Y. Sakai, E. Мітчела, Р. Уейта, R. Barnhill, J. Cavendish, W. Gordon, G. Nielson та інших.

Формування цілей статті. Це дослідження має на меті зробити невеликий внесок у розробку нових будівельних матеріалів на органічній основі для використання в будівельному секторі. Його завдання полягає в тому, щоб вивчити можливість використання існуючих побічних продуктів рослинництва як сировини для інноваційних розробок матеріалів, запропонувавши та дослідивши нову ізоляційну плиту на органічній основі, виготовлену з будь-яких доступних побічних продуктів рослинництва.

Об'єкт дослідження. Новий теплоізоляційний будівельний матеріал, виготовлений з побічних продуктів рослинництва та біополімерів, перевага якого полягає в тому, що він заснований на доступних відновлюваних матеріалах і повністю компостується.

Методи дослідження. Аналітичні та експериментальні методи визначення щільності органічного матеріалу; метод порівняння результатів розрахунків щільності різними методами.

Виклад основного матеріалу дослідження з обґрунтуванням отриманих наукових результатів. Серед доступної сировини в Україні для дослідження обрано три: ячмінну солому, серцевину кукурудзи та рисове лушпиння. Матеріали відібрано через їхню доступність, а також тому, що вони мають значні морфологічні відмінності, які спонукають до їх аналізу та порівняння. Зображення кожного з досліджуваних побічних продуктів рослинництва подано на рисунку 1.



А Б В
Рис. 1. Досліджувані матеріали: А – волокна ячмінної соломи; Б – заповнювач серцевини кукурудзи; В – рисове лушпиння

У цій роботі була обрана ячмінна солома, оскільки вона є найпоширенішим побічним продуктом рослинництва України. Її було отримано від регіонального виробника органічної продукції, подрібнено за допомогою молоткового млина в лабораторії та просіяно для отримання груп волокон однакового діаметру.

В даний час тільки кукурудзяна серцевина не використовується в промисловості, хоча було знайдено патент, який пропонує процедуру розділення різних частин побічних продуктів кукурудзи для виробництва різних матеріалів, таких як паперова маса, спирт або енергія. Були зроблені спроби використати серцевину як будівельний матеріал.

Для дослідження ми обрали кукурудзяну серцевину, яка була надана регіональним виробником органічної продукції ТОВ «Волинь-зерно-продукт». Її вручну видаляли зі стебла, подрібнювали молотковим млином та просівали для отримання гранул трьох різних розмірів частинок: 2; 1 та 0,5 мм.

Також для дослідження ми обрали рисове лушпиння, яке зазвичай використовується для годівлі, рисове лушпиння є побічним продуктом, який зараз мало застосовується. Завдяки високому вмісту кремнезему (близько 20%) і лігніну воно повільно розкладаються, що обмежує їх повторне використання на полях. Оскільки рисове лушпиння має високу теплотворну здатність (близько 4000 ккал/кг), його дедалі більше використовують для виробництва енергії. Однак через високий вміст кремнезему у вигляді залишків утворюється велика кількість попелу.

Рисове лушпиння, використане в цьому дослідженні, отримано від фермерського господарства СВК «Маяк». Як і у випадку з соломою, деякі властивості лушпиння відрізняються в залежності від сорту. Рисове лушпиння просівали, щоб отримати групи однакових розмірів.

Щільність і пористість, мабуть, є найбільш важливими фізичними властивостями при оцінці гіротермічних характеристик матеріалів. Характеристика пористих матеріалів зазвичай передбачає визначення загального об'єму пористості і розподілу пор за розміром. Крім того, інші специфічні аспекти: площа поверхні, морфологія і взаємозв'язок пор також важливі. Такі аспекти впливають на гіротермічні характеристики матеріалів. У цій роботі пористість сировини та композитів досліджується за допомогою різних методів, описаних нижче.

Насипну щільність трьох різних матеріалів (ячмінної соломи, А; кукурудзяної серцевини, Б; і рисового лушпиння, В) у сипучому вигляді визначали за допомогою вібраційного столу. Перед випробуванням матеріали були подрібнені та просіяні на частинки трьох різних розмірів:

2, 1 та 0,5 мм відповідно, та просушені в печі протягом 24 годин при 60°C. Після цього мірний циліндр об'ємом 500 мл помістили на вібраційний стіл і заповнили кожним матеріалом. Щільність визначали до та після вибивання для кожного розміру частинок за масою та об'ємом. Випробування повторювали вісім разів для кожного зразка.

Після цього відкриту пористість усередині частинок разом із простором між частинками розраховували як 1– об'ємна щільність/уявна щільність. Результати представлені в таблиці 1.

Результати чітко показують різницю в пористості та формах частинок між матеріалами: у той час як видима щільність подібна, об'ємна щільність набагато більше варіюється. Середня видима щільність матеріалів становить $1509 \pm 105 \text{ кг/м}^3$. Однак значні відмінності були виявлені в насипній щільності матеріалу, які змінювалися більш ніж у 4 рази від одного матеріалу до іншого. Важливо відзначити, що насипна щільність сипких матеріалів пояснює пористу структуру всередині частинок разом із проміжками між частинками. Таким чином, форма частинок відіграє важливу роль у кінцевій щільності матеріалу та отриманих композитів. При цьому частинки ячмінної соломи мають волокнисту форму, частинки серцевини кукурудзи мають зернисту форму, а лушпиння рису має увігнуту форму, схожу на корпус човна. Це пояснює той факт, що у випадку рисового лушпиння на об'ємну щільність значно більше впливає форма частинок, ніж в інших випадках. При подрібненні рисового лушпиння втрачається увігнута форма. Дрібні частинки рисового лушпиння складаються з плоских пластивців, які здатні компактно розташовуватися, помітно збільшуючи загальну насипну щільність. Навпаки, форма волокон ячменю та гранул серцевини кукурудзи є іншою. Таким чином, їх щільність менше залежить від розміру частинок, особливо у випадку кукурудзяної серцевини, що має розташування, яке вважається більш однорідним через ізотропію частинок. Вибиті сипучі матеріали показали вищу щільність, ніж насипані, але знову ж таки, різниця була зменшена у випадку зразків кукурудзяної

серцевини. Загалом об'ємна щільність заповнювачів кукурудзяної серцевини менше залежить від розміру частинок і ущільнення, що може бути перевагою у виробництві композитів. Крім того, об'ємна щільність серцевини кукурудзи нижча, ніж у ячмінної соломи або рисового лушпиння. Оскільки щільність є рушійним фактором теплопровідності, це важливий аспект, який слід враховувати при розробці ізоляційних матеріалів.

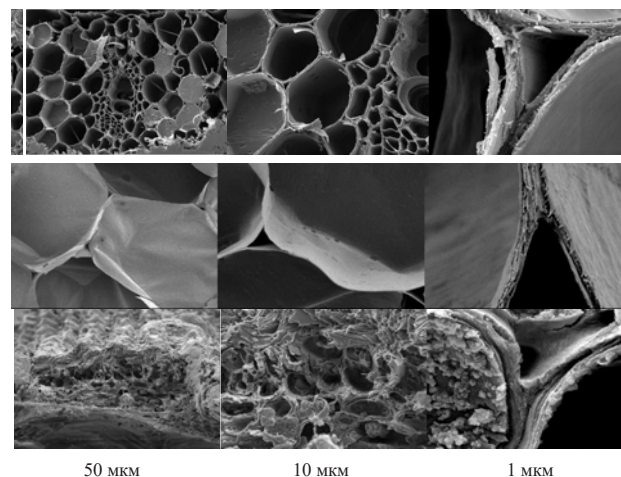


Рис. 2. Зображення тканин, присутніх у стеблах ячменю (А), стеблах кукурудзи (Б) і рисовому лушпинні (В), яке отримали за допомогою скануючого електронного мікроскопа

Відкриту пористість сипучих матеріалів розраховували за об'ємною та насипною щільністю. Як обговорювалося раніше, така пористість сильно залежить від розташування частинок і не пояснює відмінності в пористій структурі матеріалів. Таким чином, пористість усередині частинок аналізували за допомогою скануючого електронного мікроскопа. Зразки розрізали лезом, щоб спостерігати поперечний та поздовжній розріз. На рисунку 2 показано пористу структуру вихідних матеріалів при 500-, 1500- і 15-кратному збільшенні (зліва направо).

Таблиця 1

Щільність і пористість відходів рослинництва

Побічний продукт рослинництва	Розмір, мм	Видима щільність, кг/м ³	Об'ємна щільність, кг/м ³		Пористість	
			насип	ущільнення	насип	ущільнення
Волокна ячмінної соломи (А)	2	1404	44,9±0,9	58±1	0,96	0,96
	1		54±2	68±2	0,96	0,95
	0,5		64±2	80±2	0,95	0,94
Заповнювач серцевини кукурудзи (Б)	2	1584	37±1	42±1	0,98	0,97
	1		36±1	41±1	0,98	0,97
	0,5		37,8±0,8	42,9±0,7	0,98	0,97
Рисове лушпиння (В)	2	1539	99±5	121±5	0,94	0,92
	1		138±3	167±3	0,91	0,89
	0,5		230±4	277±4	0,85	0,82

Ячмінна солома утворена сумішшю тканин стебла та листя, які утворені паренхіматичними клітинами діаметром від 25 до 45 мкм і кількома судинними пучками волокнистої структури. Загальна товщина клітинної стінки та плазматичної мембрани паренхіматичних клітин становить приблизно 0,6 мкм, а міжклітинний простір має діаметр приблизно 3 мкм. З іншого боку, серцевина кукурудзи в основному утворена паренхіматозними клітинами, оскільки судинні пучки, які в основному присутні в кортикальній частині стебла, видаляються шляхом декортикації. Цей факт пояснює, що подрібнені частинки мають волокнисту форму у випадку ячменю та зернисту у випадку серцевини. Клітини, що утворюють тканину паренхіми, більші у кукурудзяної серцевини (діаметр близько 100–140 мкм), а клітинні стінки тонші (ширина близько 0,4 мкм), що вказує на більш високу макропористість цього матеріалу. Міжклітинні простори також більші, ніж у ячмінної соломи, з діаметром близько 10 мкм. Клітини з'єднані між собою плазмодесмами діаметром близько 2 мкм. Рисове лушпиння має менш пористу структуру з клітинами діаметром від 2 до 5 мкм і товщиною стінок 3 мкм. Крім того, поверхня клітинних стінок рисового лушпиння значно відрізняється від поверхні ячмінної соломи та серцевини кукурудзи, оскільки вони мають велику кількість виступів, що відповідають кремнеземним інкрустаціям.

Розподіл пор матеріалів за розміром визначали за допомогою методики ртутної порозиметрії. Діапазон аналізованих розмірів пор коливається від 10 нм до 100 мкм. Важливо відзначити, що використана техніка базується на простій пористій моделі. Вважається, що пориста структура утворена з'єднаними між собою сферичними порами різного розміру. Таким чином, результати показують розподіл розмірів еквівалентних сферичних пор, а не їх фактичний розмір. Однак результати корисні для порівняння. З результатів можна помітити, що рисове лушпиння має меншу пористість, ніж решта матеріалів. Пористість рисового лушпиння унімодальна, з піком у 8 мікрон, що, ймовірно, відповідає діаметру клітинного просвіту, що спостерігається на зображеннях скануючого електронного мікроскопа. В інших діапазонах він практично непористий. Навпаки, ячмінна солома та серцевина кукурудзи мають високу пористість. Обидва матеріали мають бімодальну пористість з піками приблизно 0,5 і 10 мікрон у випадку ячменю та 2 і 10 мікрон у випадку серцевини кукурудзи. Такі піки відповідають діаметрам плазмодесми та міжклітинних просторів відповідно. Форма піків вказує на більш однорідну пористу структуру у випадку серцевини кукурудзи, ніж у випадку соломи ячменю, що узгоджується із спостереженнями скануючого

електронного мікроскопа. Результати показують, що середній діаметр пор зразків кукурудзяної серцевини вищий, ніж у ячмінної соломи та рисового лушпиння, що видно із зображень електронного мікроскопа.

Площа поверхні матеріалів на одиницю маси та на одиницю об'єму представлені в таблиці 2.

Таблиця 2
Результати дослідження площі поверхні матеріалів на одиницю маси та на одиницю об'єму

Побічний продукт рослинництва	Площа поверхні матеріалів	
	м ² /г	м ² /м ³
А	0,463	0,034
Б	2,211	0,032
В	0,451	0,014

Незважаючи на виразну пористість, ячмінна солома та рисове лушпиння мають однакову площу поверхні на одиницю маси. Навпаки, кукурудзяна серцевина має найбільшу площу поверхні, яка майже у 5 разів більша, ніж у двох інших матеріалів. Це вказує на можливу більш високу реакційну здатність матеріалу зі зв'язуючими і більшу гігроскопічність. Результати, виражені на одиницю об'єму, показують, що площа поверхні ячмінної соломи та серцевини кукурудзи однакова, тоді як площа поверхні рисового лушпиння становить приблизно одну третину від двох інших матеріалів.

Висновок із зазначених проблем і перспективи подальших досліджень у поданому напрямі. Основною метою дослідження була розробка нового теплоізоляційного будівельного матеріалу, виготовленого з побічних продуктів рослинництва.

З цією метою проведений аналіз наявності різних побічних продуктів рослинництва в Україні згідно з гіпотезою, що це має відношення до будівельної галузі та що експлуатація такої сировини може бути здійснена стійким способом без шкоди для продуктивності ґрунтів або харчового виробництва. Через складність встановлення надійних значень для аналізу було прийнято досить консервативний підхід, коли наявні побічні продукти рослинництва відповідають лише 37% щорічно вироблених побічних продуктів. Виявлено, що побічні продукти ячменю, пшениці, кукурудзи, рису та соняшнику є найпоширенішими, що становить 77% від загальної кількості доступних побічних продуктів рослинництва в Україні (6,6 млн т·на рік). Аналіз показує, що стале виробництво ізоляційних матеріалів на основі побічних продуктів рослинництва є можливим, оскільки кількість побічних продуктів рослинництва, доступних щорічно, у 5 разів перевищує кількість побічних

продуктів рослинництва, необхідних для виробництва ізоляції для всього попиту будівельного сектору в Україні.

Перспективою подальших досліджень є вивчення можливості промислового виробництва

ізоляційних плит на основі побічних продуктів рослинництва та їх якісних характеристик. Проведення оцінки нового матеріалу у порівнянні з комерційно доступними біоматеріалами та іншими звичайними ізоляційними матеріалами.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Голодюк Г. І., Дудла І. О., Мікуліч А. Б. Огляд ринку теплоізоляційних матеріалів на основі рослинної сировини. Товарознавчий вісник : зб. наук. праць ЛНТУ. 2018. Вип. 11. С.92–100.
2. Голодюк Г. І., Гургула Н. М. (2022). Дослідження теплоізоляційних властивостей матеріалів на основі рослинної сировини. *Науковий вісник Полтавського університету економіки і торгівлі. Серія «Технічні науки»*, (1), 54–59.
3. Передові системи термомодернізації будівель і споруд: навч. посіб. / Надія Іволжатова, Тетяна Дрімко, Тарас Холеван та ін. Київ : Видавничий дім «Гельветика», 2020. 16 с.
4. Muthuraj R, Lacoste C, Lacroix P and Bergeret A. 2019 Sustainable thermal insulation biocomposites from rice husk, wheat husk, wood fibres and textile waste fibres: Elaboration and performances evaluation. *Industrial Crops and Products*, Elsevier 35 pp. 238–245.
5. Bakatovich A, Davydenko N and Gaspar F 2018 Thermal insulating plates produced on the basis of vegetable agricultural waste *Energy & Buil.* 180 pp 72–82.
6. Tůmová E, Drochytka R, Černý V and Čada P 2017 Development of organic and biodegradable insulating material for ETICS 18th Int. Conf. CRRB Pro. Eng. 195 pp. 81–7.
7. Cosentino L., Fernandes J., Mateus R. A Review of Natural Bio-Based Insulation Materials. *Energies* 2023, 16, 4676. <https://doi.org/10.3390/en16124676>.
8. Види утеплювачів їх властивості та характеристики : веб-сайт. URL: <https://blokbud.lviv.ua/blog/vudutepluvachiv/> (дата звернення 21.03.2024).
9. Основи виробництва стінових та оздоблювальних матеріалів : конспект лекцій / уклад.: Гелевера О.Г. Київ: КНУБА, 2023. 224 с.
10. Latif Eshrar, Bevan Rachel, Woolley Tom Thermal Insulation Materials for Building Applications. 2019. 208 p. URL: <https://www.icevirtuallibrary.com/isbn/9780727763518>.

REFERENCES

1. Holodiuk, H. I., Dudla, I. O. & Mikulich, A. B. (2018). Ohliad rynku teploizoliatsiinykh materialiv na osnovi roslynnoi syrovyny [Overview of the market of thermal insulation materials based on vegetable raw materials]. *Tovarnoznavchyi visnyk : zb. nauk. prats.* Collected papers. (11), pp. (92–100). Lutsk : LNTU [in Ukrainian].
2. Holodiuk, H. I. & Hurchula, N. M. (2022). Doslidzhennia teploizoliatsiinykh vlastyvostei materialiv na osnovi roslynnoi syrovyny [Study of heat-insulating properties of plant-based materials]. *Naukovyi visnyk Poltavskoho universytetu ekonomiky i torhivli.* Collected papers. Series: Tekhnichni nauky, (1), (pp. 54–59). Poltava: PUET [in Ukrainian].
3. Ivolzhatova, N., Drimko T., Kholevan T., Berkuta V., Pyvovarova O., & Borysiuk M, et al. (2020). *Peredovi systemy termomodernizatsii budivel i sporud: [navch. posib.]*. Kyiv : Vydavnychiy dim «Helvetyka» [in Ukrainian].
4. Muthuraj, R., Lacoste, C., Lacroix, P. & Bergeret, A. (2019). Sustainable thermal insulation biocomposites from rice husk, wheat husk, wood fibres and textile waste fibres: Elaboration and performances evaluation. *Industrial Crops and Products*, Elsevier, 35, 238–245.
5. Bakatovich, A., Davydenko, N. & Gaspar, F. (2018). Thermal insulating plates produced on the basis of vegetable agricultural waste *Energy & Buil.* 180, 72–82.
6. Tůmová, E., Drochytka, R., Černý, V. & Čada, P. (2017). Development of organic and biodegradable insulating material for ETICS. *18th Int. Conf. CRRB Pro. Eng.*, 195, 81–7.
7. Cosentino, L., Fernandes, J. & Mateus, R. (2023). A Review of Natural Bio-Based Insulation *Materials*. *Energies*, 16, 4676. <https://doi.org/10.3390/en16124676>
8. Vidy utepluvachiv yikh vlastyvoosti ta kharakterystyky : veb-sait. URL: <https://blokbud.lviv.ua/blog/vudutepluvachiv/> (accessed 21 May 2024) [in Ukrainian].
9. Helevera, O. H. (Eds.). (2023). *Osnovy vyrobnytstva stinovykh ta ozdoblivalnykh materialiv [Basics of reliability of wall and finishing materials]*: Kyiv: KNUBA [in Ukrainian].
10. Latif Eshrar, Bevan Rachel, Woolley Tom Thermal Insulation Materials for Building Applications. 2019. 208 p. URL: <https://www.icevirtuallibrary.com/isbn/9780727763518>.

G. Golodyuk, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor; **N. Gurgula**, Laboratory Assistant (Lutsk National Technical University). **Determination of the density of organic raw material for the manufacture of bio thermal insulation material**

Abstract. The construction sector is moving towards new energy-efficient design approaches, which include not only improving the thermal performance of structures, but also reducing the energy used. The development of thermal insulation materials based on crop production waste contributes to such approaches, as their use can lead

to a reduction in both energy demand and use, along with other beneficial environmental aspects, such as reducing the depletion of non-renewable resources and the generation of waste.

To date, there are several commercial examples of the use of biomaterials in construction, which are mostly based on industrial fibers (flax, hemp, kenaf, etc.), wood or sheep's wool. The use of by-products of food crops is less common, but can be an interesting alternative for some countries, such as Ukraine, where industrial fiber production is very small. These by-products, especially cereal straw, have been and are increasingly being used in construction as reinforcement for composite materials, decking, interior partitions, or structural overlays. This study proposes their use in thermal insulation of buildings.

The study is aimed at studying the possibility of using by-products available in Ukraine for the development of rigid thermal insulation boards. As a result, three widely available plant by-products (barley straw, corn kernel and rice husk) were selected for development.

Density and porosity are probably the most important physical properties when evaluating the hygrothermal characteristics of materials. Studies were performed before and after knocking out for each particle size by mass and volume. The test was repeated eight times for each sample.

The open porosity within the particles together with the interparticle space was then calculated as $1 - \text{bulk density} / \text{apparent density}$. The results clearly show the difference in porosity and particle shapes between the materials: while the apparent density is similar, the bulk density varies much more.

Key words: heat-insulating materials, biomaterials, plant by-products, barley straw, corn core filler, rice husk.