

Міністерство освіти і науки України

Луцький національний технічний університет
Факультет митної справи, матеріалів та технологій
Кафедра матеріалознавства

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
ЗА СТУПЕНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ «БАКАЛАВР»

Розробка технології виготовлення геополімерних
блоків наповнених тирсою /
Development of technology for manufacturing
geopolymer blocks filled with sawdust

спеціальність 132 Матеріалознавство

освітня програма «Індустріальний інжиніринг і менеджмент»

Виконав: здобувач вищої освіти
групи ПМ(ПМ)с-31

Каленик Андрій Ігорович

(підпис)

Керівник:

к.т.н., доцент

Мельничук Микола Дмитрович

Кваліфікаційну роботу

допущено до захисту

«11» червня 2025р.

к.т.н., доцент

Гарант освітньої програми:

Гусачук Дмитро Анатолійович

Луцьк – 2025 року

ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет митної справи, матеріалів та технологій
Кафедра матеріалознавства
Ступінь вищої освіти: бакалавр
Галузь знань: 13 Механічна інженерія
Спеціальність: 132 Матеріалознавство
Освітня програма: Індустріальний інжиніринг і менеджмент

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри

Мельничук М.Д.

“ 11 ” 02 2025 року

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ

Калешинку Андрію Горобича
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи “ Розробка технології виготовлення
геополімерних блоків цеглою тирею ”

керівник роботи к.т.н. доцент Мельничук М.Д.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затвержені наказом вищого навчального закладу від “ 07 ” 02 2025 року № 78/21-02

2. Строк подання здобувачем вищої освіти кваліфікаційної роботи
“ 05 ” 06 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи геополімер, тирея

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Вступ; аспекти сучасних досліджень геополімерних матеріалів; цеглою тирею; переваги; методи дослідження; висновки; список використаних джерел; додатки

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

10 сторінок

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Н.КОНТРОЛЬ	Масловач С.В. доц. к.т.н.	11.04.25	12.04.25

7. Дата видачі завдання « 07 » 02 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів кваліфікаційної роботи	Примітка
1.	Вступ; аналіз сучасних досліджень геологічних матеріалів; ценов. шогам з деревини; 2 слайди	23.04.2025	Виконано
2.	Матеріали та методи дослідження; 3 слайди	08.05.2025	Виконано
3.	Аналіз результатів дослідження; висновки; 5 слайдів	30.05.2025	Виконано

Здобувач вищої освіти

Керівник кваліфікаційної роботи

Колесник А.І.
(прізвище та ініціали)

Мельничук М.І.
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Каленик А.І. Розробка технології виготовлення геополімерних блоків наповнених тирсою





Кваліфікаційна робота бакалавра ОП «Індустріальний інжиніринг і менеджмент» спеціальності 132 Матеріалознавство. Луцький національний технічний університет. Луцьк, 2025.

Кваліфікаційна робота бакалавра складається з таких розділів: аналіз сучасних досліджень геополімерних матеріалів з наповнювачами з деревини, матеріали та методи дослідження, аналіз результатів дослідження.

В даній бакалаврській роботі досліджено вплив деревного наповнювача на властивості геополімеру на основі метакаоліну.

Дослідження, спрямовані на визначення найкращого способу виготовлення та використання цього деревного наповнювача для геополімерного композиту. Оскільки, згідно літературних даних подібні матеріали продемонструють потенціал у заміні звичайного портландцементу та потребують визначення характеру впливу різних видів деревини на властивості геополімерної матриці. Через складність та неоднорідність деревини, вплив екстрактивних речовин та зв'язування деревини з геополімерним композитом може відрізнитися залежно від породи деревини, впливаючи на механічні властивості. Однак, на відміну від золи-винесення, механічні властивості геополімерного бетону на основі метакаоліну та деревини не були належним чином досліджені.

Ключові слова: геополімери, деревна тирса, метакаолін, механічні характеристики.

БР 1025.00.00.000 ПЗ									
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Розробка технології виготовлення геополімерних блоків наповнених тирсою	Літ.	Арк.	Акрушів	
Розробила		Каленик		05.06				3	52
Перевірив		Мельничук		11.06					
Н. Контр		Мисковець		12.06.25					
Затв.		Мельничук		16.06					
ЛНТУ, каф. М, гр. ПМ(ІІМ)с-31									

ANNOTATION

Kalenyk A.I. Development of technology for manufacturing geopolymer blocks filled with sawdust

Bachelor's thesis in Industrial Engineering and Management, specialty 132 Materials Science. Lutsk National Technical University. Lutsk, 2025.

The bachelor's thesis consists of the following sections: analysis of current research on geopolymer materials with wood fillers, research materials and methods, analysis of research results.

This bachelor thesis investigates the influence of wood filler on the properties of metakaolin-based geopolymer.

The research aims to determine the best method for manufacturing and using this wood filler for geopolymer composites. According to the literature, such materials show potential for replacing conventional Portland cement, and it is necessary to determine the nature of the influence of different types of wood on the properties of the geopolymer matrix. Due to the complexity and heterogeneity of wood, the effect of extractives and the binding of wood with the geopolymer composite may vary depending on the wood species, affecting the mechanical properties. However, unlike fly ash, the mechanical properties of metakaolin- and wood-based geopolymer concrete have not been adequately studied.

Keywords: geopolymers, wood sawdust, metakaolin, mechanical characteristics.

					БП 1025.00.00.000 ПЗ	Арк.
						4
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ГЕОПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ З НАПОВНЮВАЧАМИ З ДЕРЕВИНИ.....	7
1.1 Будова та властивості геополімерних матеріалів	7
1.2 Сфера застосування геополімерів	16
1.3 Наповнювач геополімерів з деревини (тирси)	18
1.4 Мета дослідження	25
РОЗДІЛ 2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	27
2.1 Характеристика вихідних матеріалів.....	27
2.2 Методика виготовлення зразків.....	30
2.3 Методика визначення міцності на згин.....	33
2.4 Статистичний аналіз.....	34
РОЗДІЛ 3 АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	35
3.1 Результати визначення міцності на стиск	35
3.2 Результати міцності на згин.....	40
3.3 Залежність міцності на стиск від щільності зразка.....	44
3.4 Залежність міцності на згин від щільності зразка.....	45
Висновки.....	46
Список використаних джерел	49
Додатки	

					БР 1025.00.00.000.ПЗ	Арк
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		5

ВСТУП

Геоматеріали – це матеріали, отримані з мінералів земної кори та використовуються для будівництва в різних сферах. Геоматеріали є корисними геологічними матеріалами, які піддаються механічній обробці для більшості видів суспільної діяльності. Вони можуть складатися з промислових відходів, оброблених ґрунтів, гірських порід, глини, гранульованих матеріалів тощо [1], і більшість цих матеріалів мають мінеральне походження.

Хоча в цивільному будівництві традиційно використовуються вапно та цемент як основні в'язучі речовини, і з їх використанням часто готуються різні типи бетонних сумішей. Згідно з даними Геологічної служби США (2023), світове річне виробництво цементу у 2022 році становило 4,1 мільярда тонн, що призвело до викиду понад 4 мільярдів тонн вуглекислого газу в атмосферу [2]. Зусилля щодо зменшення виробництва CO₂ цементними компаніями є вкрай важливими для запобігання катастрофічним наслідкам. Сучасною стратегією зменшення навантаження на первинні ресурси є використання вторинних матеріалів, таких як відходи, що утворюються під час видобутку первинної сировини, та/або повторне використання існуючих конструкційних компонентів та переробка або даунсайклінг. Використання сільськогосподарських відходів, таких як біовугілля, виготовлене з трави, бамбука та бананового листа, відходів від переробки оливок та плантанів, таких як шкірка, кукурудзяні качани, соломи з пшениці та рису, у виробництві екологічно чистого цементу (звичайного портландцементу) та його замітника (геополімеру) є одним із новітніх методів створення бетонних матеріалів з нульовим викидом CO₂[3].

Для виготовлення бетонних матеріалів з нульовим викидом CO₂ розробляється вуглецево-нейтральний бетон, який передбачає заміну до 40

					БР 1025.00.00.000.ПЗ	Арк
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

відсотків вмісту цементу кремнеземом, виготовленим з вловлених промислових викидів, та мінералу олівіну, що поглинає вуглець.

Вільямс [4]. досліджував використання кремнієвих та вапняних мікрородоростей для декарбонізації виробництва цементу, замінюючи вапняк, який видобувався із земної кори. У той же час Хамада та ін. [5]. позитивно підтверджують можливість розробки бетону, виготовленого з використанням відходів морських мушель, які змішуються із сумішшю натуральних в'язучих речовин, таких як агар-агар.

Будівельний сектор значною мірою залежить від різних матеріалів та генерує значну кількість відходів. Поступове виснаження природних ресурсів, призвело до загострення проблеми накопичення відходів. Хоча цементно-зв'язані деревні композити домінують на ринку, все ще існує прогалина в дослідженнях геополімерного бетону з деревним наповнювачем та його властивостей застосування. Проводяться дослідження, спрямовані на визначення найкращого способу виготовлення та використання цього деревного наповнювача для геополімерного бетону [6], але жодне з них не змогло вказати на конкретний метод. Однак вони продемонстрували корисний потенціал у заміні звичайного портландцементу та вплив видів деревини на властивості геополімерної матриці. Через складність та неоднорідність деревини, вплив екстрактивних речовин та зв'язування деревини з геополімерним композитом може відрізнятись залежно від породи деревини, впливаючи на механічні властивості. Однак, на відміну від золи-винесення, механічні властивості геополімерного бетону на основі метакаоліну та деревини не були належним чином досліджені. Тому результати цього дослідження нададуть інформацію про властивості та придатність геополімерного композиту на основі деревини (тирси) для виробництва геополімерного бетону.

					БР 1025.00.00.000.ПЗ	Арк
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1
АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ГЕОПОЛІМЕРНИХ
МАТЕРІАЛІВ З ВОЛОКНАМИ ЦЕЛЮЛОЗИ

1.1. Будова та властивості геополімерних матеріалів

Термін «геополімер» був введений понад 30 років тому Джозефом Давідовіцем [6] як композитний матеріал, екологічно чистий будівельний матеріал з меншим викидом вуглекислого газу порівняно зі звичайним портландцементом. Такі споруди, як Велика піраміда Хеопса (Хуфу) в Єгипті, визнані спорудами, виготовленими з геополімерів, навіть частини історичної Великої Китайської стіни [7].

Геополімер — це тип неорганічного керамічного матеріалу або полімеру з 3D-каркасною структурою, виготовленою з $[\text{SiO}_4]^{4-}$ та $[\text{AlO}_4]^{4-}$, зшитих кисневими містками та утворених за допомогою хімічної реакції з використанням лугу/кислотного розчину як активатора та алюмінію та кремнію як основних компонентів [8].

Наразі сфера їх застосування необмежена, і вони використовуються як цементні матеріали, волокнисті композити, а також матеріали для покриттів і клеїв [9]. Згідно з Давідовіцем геополімер визнаний цементом третього покоління, що утворюється в результаті реакції твердих речовин кремнезему та глинозему високої концентрації з лужним гідроксидом та лужним силікатом.

Каркас структури геополімеру складається з тетраедричних одиниць SiO_4 та AlO_4 , які по черзі пов'язані з полімерними прекурсорами шляхом включення кисневого замісника з алюмінієм Al у чотирикратному партнерстві, що є основою структури [10]. В результаті хімічний склад геополімеру - $(\text{Na,K})_n(\text{Si-O})_n(\text{Si-O-Al})_n$. Хоча мономерні отримують з

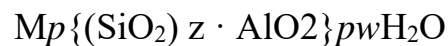
					БР 1025.00.00.000.ПЗ	Арк
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

алюмосилікатного походження, яке вважається двовимірною структурою, конструкція геополімеру є тривимірною [11].

Згідно з Давідовіцом, ці структури мають три пов'язані форми, що залежать від швидкості або співвідношення Si/Al, і це:

- полі(сіалат);
- полі(сіалат-силокс);
- полі(сіалат-дисилокс).

Сіалат також називають кремній-оксоалюмінатом. Термін «полі(сіалат)» стосується структури полімерного ланцюга або кільця, в якому Si_4^+ та Al_3^+ пов'язані з киснем у IV-подібному зв'язку. Як результат, використовуючи емпіричну формулу, що базується на фундаментальній номенклатурі Давідовіца :



де М – іон лугу (Na або K), p = ступінь поліконденсації, z – діапазон значень 1, 2 та 3.

Досягнення структурної нейтральності досягається шляхом використання катіонів, таких як Na, K, Li, Ca^{2+} , Ba^{2+} , NH_4^+ , H_3O^+ , які служать для балансування заряду. В результаті кінцева структура характеризується як така, що варіюється від аморфної до частково кристалічної.

Геополімерна система складається з двох різних фаз, а саме твердого стану та водного стану. Останній називається активатором, який відповідає за реакційну здатність системи. Тверда фаза – це матеріал, що складається з алюмосилікату, який демонструє високу схильність до розчинення кремнію та алюмінію в присутності сильнолужного водного розчину, що містить NaOH та $(Na_2O)_x$, $(SiO_2)_y$ [12].

Процес поліконденсації прискорюється присутністю Na_2O в активаторі, навіть якщо концентрація рідкого скла переважно SiO_2 . Це прискорення призводить до утворення складніших структур, більших кілець та полімерів. [13]. Твердий стан стосується алюмосилікатної речовини, отриманої або з

					БР 1025.00.00.000.ПЗ	Арк
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

промислового мінералу, такого як глина (наприклад, бентоніт, перліт та каолін), або з промислових побічних продуктів та відходів, таких як зола, метакаолін, хвости бентоніту та перліту, шлаки та матеріали від знесення будівель, серед іншого [14].

Геополімерні зв'язуючі речовини створюються за допомогою хімічного процесу, який називається геополімеризацією. Цей процес включає реакцію лужних активаторів з твердими алюмосилікатними попередниками, що призводить до утворення ізольованих алюмінатних та силікатних аніонів за допомогою гідроксид-іонів. Водні умови сприяють полімеризації за участю гідратованих катіонів для підтримки балансу заряду шляхом реформування алюмосилікатних зв'язків [15]. Процес геополімеризації є багатогранним і охоплює низку реакцій розчинення, переорієнтації та затвердіння, подібних до процесу синтезу цеоліту шляхом гідротермальної обробки твердих прекурсорів. Таким чином, процес геополімеризації включає хімічну реакцію, яка запускається або каталізатором, або нагріванням за певної температури.

Згідно з дослідженнями, проведеними Джаннопулу та Паніасом, Вангом та Кастільо, розчинення алюмосилікатних матеріалів у лужному розчині є першим кроком у виробництві геополімерів. Це відбувається в результаті розчинення пуцоланового матеріалу в лужному розчині, що призводить до іонного інтерфейсу між матеріалами та поступового розриву ковалентних зв'язків між Si-O-Al-O [16].

Утворення силіконового гелю включає реакцію полімеризації, лужний катіон у гелі врівноважує дефіцит зарядів навколо алюмінію для заміщення кремнію. Під час утворення геополімерів вода вивільняється під час хімічної реакції [17]. В результаті, вода, що виділяється, є побічним продуктом, який не сприяє геополімеризації, а навпаки, покращує оброблюваність суміші, на відміну від типового портландцементу, який страждає від реакцій гідратації,

					БР 1025.00.00.000.ПЗ	Арк
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

що призводять до утворення гідрату силікату кальцію та гідроксиду кальцію при додаванні води.

Механічні та хімічні характеристики геополімеру залежать від цього впливу, типу лужного елемента та умов твердіння [18], а також стадії конденсації-кристалізації мікрочастинок, що утворюються в результаті конденсації. Осадження утворених продуктів гідратації, поява кристалічної структури та зв'язування нерозчинених твердих частинок: Поява кристалічної структури є повільним процесом, але він стає надзвичайно важливим, коли кристалічна матриця та зародки, утворені з полімеризованого силікагелю, досягають критичної стадії та пов'язані зі швидкістю, з якою відбувається осадження [19]. Саме тому Джеффри та ін. стверджували, що геополімери, такі як геополімерний цемент, здебільшого відомі як цеолітні попередники, а не цеоліт; причина цього полягає в тому, що немає вільного часу для розвитку добре організованої кристалічної структури через хімічну реакцію між лужним та пуцолановим попелом.

Провіс провів дослідження з використанням золи-виносу та каустичної соди для вивчення кінетики синтезу геополімерів. Результати їхнього дослідження показали, що при низьких концентраціях активатора (тобто 3М гідроксиду натрію) швидкість часу індукції збільшується. Збільшуючи концентрацію до 9М, було можливе скорочення часу індукції, але він знову збільшувався через надлишок гідроксиду натрію, що призводить до осадження. Після закінчення цього часу всі доступні концентрації мають однаковий коефіцієнт або швидкість утворення гелю.

Результатом геополімеризації є цементна речовина, яка має напівкристалічну та аморфну природу, а не повністю кристалічну структуру. Розвиток структурного каркасу геополімеру відбувається у водному стані, де він взаємодіє з активними поверхневими центрами твердих частинок, зокрема силанольними ($>Si-OH$) та алюмінієвими ($>Al-OH$) групами. Ці групи реагують з нерозчинними частинками (типу $Si-O-Si$ та $Al-O-Si$),

					БР 1025.00.00.000.ПЗ	Арк
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

утворюючи кінцеву геополімерну структуру. Під час процесу твердіння надлишок води витісняється з геополімерної матриці, що може сприяти міцності та довговічності матеріалу [20].

Геополімери мають широкий спектр застосування завдяки своїм чудовим фізичним та хімічним властивостям, зокрема:

1. Стійкість до високих температур

Геополімери привернули значну увагу як потенційні сполучні речовини в вуглецевих волокнистих композитах та добавки в епоксидних системах. Їхня виняткова термостійкість робить їх особливо привабливими як високотемпературні матеріали. Геополімери демонструють високу стійкість до тепла та вогню, а також мають ендотермічні властивості. Ці матеріали придатні для використання в захисті залізобетонних конструкцій, включаючи будівлі та дорожні тунелі, від пожежної небезпеки. У дослідженні, проведеному Лухарем [21] було розглянуто термостійкість високотемпературного геополімербетону, що складається з золи-виносу. В дослідженні матеріал піддавали різному ступеню термічної обробки при 200 °С, 400 °С, 600 °С та 800 °С. Результати дослідження показали, що геополімери демонструють високі властивості термостійкості. У цьому дослідженні вивчався вплив катіону луку на поведінку геополімерів і золи-виносу за високих температур. Результати показують, що геополімер, активований гідроксидом калію, має помітне підвищення міцності на стиск (30...40%) порівняно з геополімером, активованим гідроксидом натрію.

2. Довговічність

Довговічність – це здатність матеріалу служити протягом певного часу, без руйнувань під дією факторів навколишнього середовища. Геополімери – це тип композитного матеріалу, відомого своєю довговічністю. Історичні приклади їх використання включають споруди, побудовані в Єгипті, такі як Велика піраміда Гізи, місце спочинку фараона Хуфу та частини оборонної споруди Великої Китайської стіни, які витримали випробування часом

					БР 1025.00.00.000.ПЗ	Арк
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

протягом тисячоліття. Ці матеріали демонструють виняткову стійкість до корозії, оскільки вони залишаються незмінними під впливом ультрафіолетового випромінювання, агресивних кислотних речовин та органічних розчинників .

Відомо, що геополімери демонструють вищу міцність та довговічність порівняно зі звичайним портландцементом. Однак конкретні властивості геополімерів залежать від використаних матеріалів для їхнього виготовлення. Використання геополімербетону як будівельного матеріалу для морського середовища дає кращі результати порівняно зі звичайним портландцементом. Крім того, завдяки впровадженню методу Тагучі було визначено ідеальний склад геополімерних бетонів на основі золи для впливу морських умов [21]

3. Проникність геополімеру

На проникність, або пористість структури, впливає те, як вода рухається через неї, як виглядає пориста структура та як рухаються частинки через неї. Об'єм, зв'язність, форма та розподіл розмірів пор всередині матеріалу є основними факторами, що впливають на проникність для води та іонів [22]. Міцність та довговічність геополімерів, активованих лугами, як будівельного матеріалу можна покращити, розуміючи взаємозв'язок між рухом води та параметрами мікроструктури, щоб оцінити їхню міцність та продовжити термін їхньої служби.

На характеристики геополімербетону впливає оцінка пористості, що впливає на процес насичення. Це, у свою чергу, впливає на мікроструктуру.

$$K_p = \frac{d^2V}{2ht}, V = \frac{m}{Ad\rho}$$

де K_p – коефіцієнт водопроникності, м/с;

d – глибина проникнення води в бетон, м;

V – пористість бетону;

h – гідравлічний напір води, м;

t – час перебування під тиском, с;

					БР 1025.00.00.000.ПЗ	Арк
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

m – приріст маси, г;

A – площа поперечного перерізу зразків, мм^2 ;

ρ – густина води (1000 кг/м^3).

4. Стійкість до кислотних та лужних середовищ

Наявність кальцію в алюмосилікатному джерелі індукує реакцію кремнезему в лужному середовищі. І навпаки, кисле середовище негативно впливає на геополімер, сприяючи обміну протонів на лужні катіони, що призводить до витоку Al з початкового гелю.

Дослідження показало, що коли геополімери піддавалися впливу 5% розчинів оцтової та сірчаної кислот, вони були міцнішими та менше руйнувалися, ніж ті, що були виготовлені зі звичайного портландцементу [23]. Згідно з дослідженням, геополімери демонструють більшу стабільність та стійкість до кислотного впливу порівняно з бетоном з портландцементу. Результати дослідження показують, що поверхня останнього має тенденцію до розм'якшення, тим самим піддаючи нижні бетонні шари потенційному руйнуванню. На кислотостійкість та лугостійкість досліджуваних геополімерів значно впливають зміни мінерального складу кальцинованого геополімеру. Крім того, розчинність геополімеру в кислих і лужних розчинах зменшується через часткову кристалізацію непрореагованих частинок у геополімері.

5. Механічні властивості геополімерів

У деяких випадках міцність геополімерів на стиск перевищує міцність портландцементу. Крім того, міцність геополімерів на розтяг у два-три рази більша, ніж у портландцементу, а їхня твердість коливається від 4 до 7 за шкалою Мооса

Крім того, звичайний цементний бетон демонструє втрату міцності вище $400 \text{ }^\circ\text{C}$, а при $800 \text{ }^\circ\text{C}$ міцність бетону на 20% нижча, ніж у бетону за кімнатної температури. Виявлено, що теплові та механічні властивості геополімерів

					БР 1025.00.00.000.ПЗ	Арк
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

кращі за високих температур, ніж у звичайного цементу, і часто більше пов'язані з їхніми складовими .

У дослідженні [23]. було виявлено, що міцність на стиск та міцність на розрив геополімеру з золи-виносу вища порівняно зі звичайним портландцементним бетоном(ОРС). Мікроструктура геополімеру щільніша та менш пориста, що є причиною збільшення міцності на стиск. Концентрація лужного активатора має значний вплив на міцність на стиск геополімерів.

6. Екологічно чистий та нетоксичний характер геополімерів

Геополімери вважаються екологічно чистим будівельним матеріалом, який виділяє меншу кількість парникових газів, і вони не виділяють шкідливих або токсичних газів за високих температур або під час синтезу. Виробництво цементу вимагає спалювання великої кількості палива та генерує значні викиди CO₂ через розкладання вапняку, що має величезний негативний вплив на навколишнє середовище: під час виробництва тонни цементу приблизно виділяється одна тонна CO₂. Отже, геополімери служать екологічною заміною цементу ОРС.

Оскільки геополімерні зв'язуючі матеріали можуть бути побічним продуктом переробки інших ресурсів і наразі викидаються як сміття, вони можуть утилізувати ці відходи. Отже, рідкі відходи, які оцінюються як небезпечні для здоров'я людини та навколишнього середовища, безпечно перетворюються на тверді відходи, а в невеликих кількостях катіони металів можуть бути включені в полімерну сітку, що потенційно призводить до набагато вищих швидкостей фільтрації, ніж у системах на основі бетону ОРС, де іони зазвичай відносно слабо зв'язані, а матриця легко руйнується під впливом кислотних дощів або ґрунтових вод.

Амран та ін. [24] дослідили золи-виносу як мінеральний наповнювач в бетоні і виявили, що геополімербетон на основі золи-виносу (FA-GPC) є унікально підібраним композитним матеріалом порівняно зі звичайним

					БР 1025.00.00.000.ПЗ	Арк
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

бетоном. Було також виявлено, що FA-GPC знижує рівень викидів парникових газів та усуває утилізацію FA як відходів на звалищах, що сприяє чистоті навколишнього середовища, забезпечуючи міцний та екологічно чистий нетоксичний будівельний матеріал.

1.2. Сфера застосування геополімерів

Геополімер – це інноваційний неорганічний керамічний полімер, який має широкий спектр застосування, виступаючи в ролі герметиків, кераміки, будівельних матеріалів, вогнестійких волокнистих композитів та покриттів. Застосування геополімерів, обумовлене такими характеристиками, як хімічна інертність (наприклад, стійкість до кислотної корозії), висока термічна стабільність, надійні механічні властивості та виняткова термостійкість. Насьогодні, геополімер є предметом академічних досліджень і застосовується в різних галузях, включаючи медичне застосування, термо- та вогнестійкі покриття, як заміна цементу та наповнювача в бетоні (геополімербетон), для адсорбції важких металів, токсичної та радіоактивної адсорбцію, як високотемпературна кераміку, клеї тощо.

Додаткові застосування геополімерів: використання як підкладки для оптичних цілей, таких як фотолюмінесцентні матеріали, та фотокаталітичного розкладання летких органічних сполук.

Результати дослідження показують, що геополімерні покриття добре зарекомендували себе як композити для морського бетону. Крім того, було виявлено, що ці покриття містять прекурсори, що складаються з кількох компонентів. У своєму дослідженні Чжан [14] та його колеги досліджували властивості композитів на основі геополімерів (MG) з використанням метакаоліну, модифікованих органічними сполуками та синтезованих з водорозчинною епоксидною смолою (WR) у різних пропорціях. Композити обробляли трьома різними типами силанових зв'язуючих агентів (SCA) у

					БР 1025.00.00.000.ПЗ	Арк
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

концентрації 1% кожен. Геополімер з метакаоліну продемонстрував високі характеристики, включаючи, але не обмежуючись, стійкістю до стирання, корозійну стійкість (особливо до хлоридів) та зменшення усадки. Крім того, силанові зв'язуючі агенти геополімерів метакаоліну демонструють високу довговічність при кондиціонуванні морською водою та карбонізацією. Геополімери це просторово організовані структури, що надає їм перевагу серед інших поверхневих покритті. Вони регулярно демонструють механічну цілісність, хімічну стабільність, непроникність та термостійкість.

Геополімерна матриця може покращуватися шляхом додавання домішок, що складаються з мікро- та нановолокна. Геополімерний композит покращується шляхом додавання різних наноматеріалів, таких як нанодіоксид титану (NT), вуглецеві нанотрубки (CNT), нанометакаолін (NMK), нановинсона зола (NFA), наноскляний порошок (NGP), багатостінні вуглецеві нанотрубки (MCNT), нанокарбонат кальцію (NCC) та нанокремнезем (NS).

Геополімери зайняли свою нішу і в електротехнічній промисловості завдяки своїм електричним характеристикам. Дослідження, проведене Крішною та його колегами [16], показало, що додавання графену до геополімерних композитів на основі золи-виносу призвело до підвищення електропровідності. Дослідження показує, що, незважаючи на нижчу електропровідність оксиду графіту, додавання геополімерів призводить до значного покращення електропровідності, значення якої досягають $7,72 \times 10^{-13} \text{ Ом}\cdot\text{мм}^{-1}$.

Властивості геополімеру з висококальцієвої золи покращуються завдяки додаванню геополімеру та багатостінних вуглецевих нанотрубок. Крім того, вплив геополімерів та багатостінних вуглецевих нанотрубок на електричний опір свідчить про те, що вони можуть мати потенційне застосування в технології п'єзоелектричних датчиків. П'єзоелектричне явище широко використовується в різних сферах застосування, таких як датчики

					БР 1025.00.00.000.ПЗ	Арк
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

вібрації, перетворювачі, виконавчі механізми та частотні регулятори. Використання синтезованих графен-геополімерних композитів (GGC) у майбутніх інфраструктурах має потенціал для виконання різних завдань, таких як самоконтроль стану, збір та зберігання енергії, відновлення навколишнього середовища, а також підвищення безпеки та сталого розвитку.

1.3. Наповнювач геополімерів з деревини (тирси)

Деревина (тирса) отримується з дерева та служить композитним матеріалом з анізотропною текстурою, що утворює вторинну ксилему, і здебільшого складається з лігніну (18–25%), геміцелюлози (20–30%) та волокна або целюлози (40–50%). Крім того, вона містить екстрактивні речовини та мінерали, що утворюють золу, які становлять 2–30% її складу. Класифікація деревини базується на двох різних категоріях, а саме: м'які та листяні породи деревини. Фундаментальна структура листяних порід деревини значно складніша порівняно з м'якими породами деревини, які мають менш різноманітну та простішу фундаментальну структуру. Обидві демонструють набагато більшу кількість основних різновидів клітин та вищий рівень клітинної гетерогенності. Заболонь та ядра дерева – це окремі області, присутні як у м'яких, так і у листяних породах деревини, що характеризуються своїми функціональними відмінностями. Заболонь живих дерев виконує кілька функцій, зокрема діє як канал для соку, забезпечує місце зберігання фотосинтету та сприяє біохімічному виробництву. Найглибший шар стовбура дерева, який є неактивним і відрізняється від зовнішньої заболоні, називається серцевиною.

Хоча варіації кольору у кількох видів обмежені, серцевина зазвичай характеризується темнішим відтінком порівняно із заболонню. Серцевина довгий час служила сховищем біохімічних речовин. Різні породи деревини

					БР 1025.00.00.000.ПЗ	Арк
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

містять різні типи біохімічних сполук. Термін «екстрактні речовини» стосується колективної групи біохімічних сполук, що містяться в заболоні та листяних породах деревини [17].

М'яка деревина складається переважно з трахеїдних клітин, які становлять 90–95% клітинного складу, а променеві клітини складають решту 5–10%. Волокна м'якої деревини характеризуються як деревні трахеїди. Трахеїди відповідають за транспортування води та забезпечення механічної підтримки м'якій деревині, зокрема пізньодеревинним трахеїдам, які мають товсті стінки. Волокна м'якої деревини запаяні на своїх кінцях. Деревина містить воду у двох різних станах: по-перше, вона зв'язана з целюлозою всередині клітинних стінок, а по-друге, вона присутня у вільному стані всередині та між міжклітинними просторами. Явище руху вільної води в напрямку, протилежному волокнам деревини, пояснюється капілярним ефектом, тоді як рух зв'язаної води відбувається у вигляді пари через коливання температури, вологості та вмісту води[6].

Під час сушіння вільна вода в деревині усувається, в результаті чого клітинні стінки насичуються та перебувають у рівновазі з навколишнім середовищем. Хоча можуть бути варіації в порозі насичення волокон деревини між різними видами, спостерігається, що цей поріг досягається при вмісті вологи приблизно 30%. Середня довжина волокон фінської сосни та ялини становить приблизно 3 мм. М'яку деревину зазвичай називають довговолонистою через її видовжені волокна. Сосни – це дерева, що характеризуються здерев'янілими стеблами та видовженим голкоподібним листям, яке демонструє стійку зелень протягом року. Зразки зазвичай класифікуються як деревні утворення, хоча вони можуть проявляти характеристики чагарників (з більш ніж одним стеблом). Сосни класифікуються як голонасінні рослини, які характеризуються відсутністю плодолистків та плодів на відміну від покритонасінних. Насіння сосен не закриті і зазвичай називається "голим насінням". У багатьох інших регіонах,

					БР 1025.00.00.000.ПЗ	Арк
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

що характеризуються величезними лісами, сосни є основним видом. Сосна звичайна має чітко виражену заболонь щільністю близько 550 кг/м³. Ця заболонь має блідо-жовтувато-білий або білий відтінок. Однак ядро сосни звичайної відрізняється світлим червонувато-коричневим кольором.

Сосни класифікуються як голонасінні, тип рослин, які мають «голе насіння», на відміну від покритонасінних, які дають насіння, вкладене в плодолистки, утворюючи плід. Середні розміри соснових волокон становлять 3 мм у довжину та 30 мкм у ширину. Сосни є основним деревним видом на великих лісових масивах у певних регіонах, тоді як у багатьох інших місцевостях вони домінують разом з хвойними деревами та іноді з покритонасінними. Дослідження, проведене Роневічем та ін. [9], показало, що видалення летких речовин під час піролізу призводить до змін об'єму, маси, щільності та форми соснової деревини, тим самим спричиняючи значні зміни її внутрішньої структури.

Деревина може використовуватися для багатьох різних цілей, таких як підлогові покриття, балансова деревина, будівельні матеріали, стовпи та опори комунальних служб тощо. Композит – це будь-яка група з двох або більше частин, які утримуються разом матрицею. Згідно з визначенням Матуани та Гайдена [8] деревні композити – це група матеріалів, що містять різні деревні компоненти, що скріплюються разом зв'язуючим агентом. Деревні композити були класифіковані Старком та ін. [11] та Ірлом та ін. [12] на різні групи. Вони включають деревні шпоновані композити, такі як деревно-пластикові композити та неорганічні скріплені композити, ламінати, деревоволокнисті плити, деревостружкові плити та орієнтовано-стружкові плити, компоненти, такі як балки та напружені панелі, а також матеріали на основі шпону, такі як фанера та ламінований шпон.

Процес виробництва деревних композитів дозволяє задавати їхні властивості та експлуатаційні характеристики, що є значною перевагою. Деревина може виготовлятися різної товщини, сортів, розмірів та стійкості

					БР 1025.00.00.000.ПЗ	Арк
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

до впливу факторів, що може призвести до отримання матеріалів з більшою структурною міцністю та стабільністю порівняно з традиційною деревиною. Додаткові переваги, пов'язані з розробкою деревних композитів, включають потенційне використання економічно ефективних матеріалів та уникнення фінансових втрат, пов'язаних з управлінням відходами, шляхом повторного використання або переробки деревних залишків від інших обробних операцій. Крім того, варто відзначити створення більш однорідних компонентів, виробництво композитів з вищою міцністю порівняно з масивною деревиною та можливість виготовляти композити в різноманітних конфігураціях. Вміст вологи в поверхнях та серцевині панелі є критичним параметром, який суттєво впливає на характеристики композиту. Незважаючи на неоптимальні адгезійні властивості, технологія пресування може ефективно покращити матрицю [13].

На основі кількох досліджень термічно модифікованої букової деревини, яка була просочена наносупензією срібла для визначення динамічних властивостей деревного композиту [21] також досліджували кореляцію між цими властивостями та кристалічністю целюлози. Супензію наносрібла з концентрацією 400 ppm наносили на зразки. Для порівняння, оброблені термічно модифіковані зразки деревини мали такі ж властивості, як і композит (міцність на розтяг та інші механічні властивості) відхилення від контрольних зразків були не значні.

У 2019 році Го та його колеги досліджували деревний композитний матеріал, що складається із заболоні сосни звичайної, модифікованої активованою глюкозою та лимонною кислотою. Спостерігалось збільшення вагового відсотка та зменшення коефіцієнта вилуговування комбінованого агента вказували на можливий синергетичний вплив між двома компонентами та їх закріплення всередині деревини.

Акоста та ін. [25] досліджували властивості синтезованих деревних композитів, зокрема деревини сосни, просоченої метилметакрилатом (ММА).

					БР 1025.00.00.000.ПЗ	Арк
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У дослідженні ММА використовувався для аналізу зразків, зібраних з молодих та старих сосен. Були оцінені морфологічні, механічні, хімічні, теплові та фізичні властивості ознак. Порівняно з незмінними зразками, фізичні, механічні (за винятком крихкості) та теплові характеристики деревини, обробленої ММА, виявилися найкращими як у молодих, так і у зрілих дерев. Молода деревина демонструвала кращу оброблюваність порівняно зі зрілою деревиною завдяки збільшеному внутрішньо- та міжклітинному простору.

Композити з деревини та цементу

Композитні матеріали можна виготовляти шляхом змішування деревної тирси з неорганічними речовинами, що призводить до появи унікальних властивостей. Цей процес робить неорганічну матрицю жорсткою, що призводить до міцного композитного матеріалу, дуже стійкого до механічної деформації [26]. Деякі неорганічні композитні матеріали не здатні сприяти росту цвілі, комах або інших небажаних організмів, більшість з них демонструють значну стійкість.

Цементно-зв'язані дерев'яні композити останнім часом стали популярним варіантом для різних конструкцій. Ці композити перевершують традиційно зв'язані композити завдяки своїй міцності, твердості, високій розмірній стабільності та стійкості до факторів навколишнього середовища [24]. Дослідження, проведене Назеріаном, Галехно та Гозалі [27] показало, що збільшення розміру частинок деревних порід у деревно-цементних композитах, зокрема у цементно-стружкових плитах, призвело до збільшення коефіцієнта усадки, тоді як загальна щільність та питома зовнішня щільність зменшилися. Хоча плита демонструвала вищу здатність до водопоглинання, її механічні властивості покращилися.

Включення недеревних лігноцелюлозних матеріалів до цементних матриць призводить до тривалого процесу гідратації цементу, що призводить до виробництва структурно слабких продуктів. Для вирішення цієї проблеми

					БР 1025.00.00.000.ПЗ	Арк
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

як хімічний каталізатор використовували CaCl_2 та MgCl_2 . Крім того, деревину промивали гарячою водою для видалення екстрактивних речовин, а геміцелюлози обробляли м'яким лугом та гідроксидом натрію.

Фактори, що впливають на цементно-зв'язані деревні композити:

– механізми склеювання: як водневі зв'язки, так і гідроксильні містки, або будь-які з них важливі для склеювання цих композитів через хімічну морфологію цементу та целюлози. Неорганічна адгезія, як передбачається, виникає через фізичні механізми склеювання, а також механічне зчеплення, подібно до адгезії синтетичного клею.

– тверднення та сумісність композиту (деревина та цемент): зерна цементу, які ще не гідратовані, оточені голчастими гідратами, коли вони тверднуть. Непроникні гідрати утворюються навколо негідратованих зерен цементу в присутності цукрових кислот, цукрів та лігносульфонатів, які або уповільнюють, або перешкоджають склеюванню цементу.

– види деревини: деякі види деревини, такі як ялина та ялиця, часто не створюють серйозних проблем з гідратацією цементу. Однак, як це часто буває, з кожного правила є винятки. На сумісність деревини з цементом впливає низка факторів, зокрема середовище проживання, сезон збору врожаю та інші.

Деревний геополімер

Деревні геополімерні композитні матеріали складаються з двох основних компонентів, а саме деревини та геополімеру. Властивості деревно-геополімерного композитного матеріалу варіюються залежно від відносної кількості деревних та геополімерних складових, присутніх у композиті. Вирішальні ролі, які деревина відіграє в композитних матеріалах, включають зменшення загальної ваги матеріалу, зменшення його теплопровідності та виконання ролі структурного компонента. Геополімери в основному використовуються для різних цілей, таких як склеювання деревних частинок, підвищення вогнестійкості, забезпечення підвищеної механічної міцності,

					БР 1025.00.00.000.ПЗ	Арк
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

покращення стійкості до вологості та захист від пошкоджень, спричинених цвіллю [28].

Подібно до інших типів неорганічних зв'язаних деревних композитів, геополімерні деревні композити використовують деревину для зменшення ваги та підвищення теплопровідності. Берзінс та ін. [28] провели дослідження, яке включало додавання та змішування глинистого порошку після змішування силікату натрію та води для отримання композитного матеріалу на основі деревних геополімерів. Після додавання деревної тирси суміш перемішують приблизно 15 хвилин. Після приготування амальгамації їй надають форму відповідного розміру.

Тирса – це широко відомий залишковий матеріал, що утворюється як побічний продукт у деревообробній промисловості та сільському господарстві. Під час механічного подрібнення пиломатеріалів утворюються відходи, оскільки матеріал перетворюється на різні форми та розміри. Регулярна переробка деревних відходів та їх ефективне використання в цементних композитах та бетоні мають вирішальне значення для забезпечення екологічно безпечної утилізації.

Вплив включення тирси до геополімерного бетону на його оброблюваність досліджувався в дослідженні, проведеному Дуаном та ін. [29]. Було виявлено значну лінійну кореляцію між щільністю та вмістом тирси, а збільшення вмісту тирси позитивно пов'язане з міцністю на згин. Дослідження виявило негативну кореляцію між вмістом тирси та часом тужавіння (часом на перетворення рідкої маси в тверду). Отже, рівень пористості зменшується зі збільшенням кількості доданої тирси, що призводить до більш щільної матриці.

Арункумар та ін. [30] у своєму дослідженні використовували деревну золу, яка містить калій і її легко отримати. Результати дослідження показують, що оптимізована суміш є якісною заміною геополімерів із золи-виносу, і таким чином зменшуються витрати на лужні активатори, а також

					БР 1025.00.00.000.ПЗ	Арк
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

можна пом'якшити вплив на навколишнє середовище. Отримані результати узгоджуються з попередніми дослідженнями, які вказують на те, що збільшення міцності на стиск в результаті заміни золи відходів деревини (тирси) до 30% позитивно вплинуло на покращення механічних властивостей. Крім того, включення золи відходів деревини з вмістом золи 30% або вище призвело до зниження досягнутої міцності. Таким чином, було виявлено, що використання золи відходів деревини, такої як тирса, як заміна, у кількості максимум 30% позитивно впливає на покращення міцності на згин. Дослідження механічних властивостей деревно-геополімерних композитів і виявили, що на механічні параметри, що кваліфікують деревно-геополімерні композити, впливають метод виробництва та склад деревно-геополімерних композитів.

Мехді та ін. [31] досліджували доцільність заміни тирси як наповнювача в геополімербетоні, виготовленому з золи-виносу (FA) та гранульованого доменного шлаку (GBFS). Для оцінки впливу тирси на свіжі та затверділі властивості геополімербетону було створено традиційний геополімербетон на основі (FA- GBFS) з заповнювачем та різним вмістом тирси (25, 50, 75 та 100%). Результати випробувань показали зниження міцності на стиск на 35% при використанні 100% тирси замість природного заповнювача. Хоча теплопровідність знизилася майже в 4,5 рази один раз, а в діапазоні частот 1800–2500 Гц спостерігалася різке зростання коефіцієнта звукопоглинання.

1.4. Мета дослідження

Дослідження має на меті визначити механічні властивості геополімеру наповненого деревними відходами, а саме:

- визначити міцність на стиск геополімербетону наповненого тирсою;

					БР 1025.00.00.000.ПЗ	Арк
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- визначити модуль пружності геополімербетону наповненого тирсою;
- визначити модуль розриву геополімербетону наповненого тирсою;
- визначити вплив додавання тирси на механічні властивості деревного геополімерного композиту

Важливими питаннями для з'ясування є визначення наскільки суттєво вплине додавання деревини на механічні властивості деревного геополімерного композиту, а також чи збільшення щільності суттєво вплине на міцність на стиск деревно-геополімерного композиту.

					БР 1025.00.00.000.ПЗ	Арк
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1. Характеристика вихідних матеріалів

Для експерименту було використано заболонь сосни звичайної (рисунок 2.1). Деревину подрібнювали на класи розміру частинок 1 мм, 2 мм та 4 мм за допомогою лабораторного відцентрового млина (рисунок 2.2)



Рисунок 2.1 – Лігноцелюлозні матеріали після подрібнення на фракції розміром 1 мм, 2 мм та 4 мм.

Мінеральною сировиною для геополімеру в цьому експерименті був використаний метакаолін МК-40.

Дегідроксилювання глинистого мінералу каолініту дає метакаолін, одну з цементних сполук, що використовуються в бетоні як в'язуча речовина замість цементу. Частинки метакаоліну не такі малі, як кремнеземний пил, але дрібніші, ніж частинки цементу.

					БР 1025.00.00.000.ПЗ	Арк
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

Лужними активаторами були розчин силікату натрію: SiO_2 : 26,5% та Na_2O : 10,6%. А також гідроксид натрію концентрацією 99,4%. Також використовувалася деіонізована вода.



Рисунок 2. 2 – Ультравідцентровий млин (Retch ZM 200).

Приготування суміші проводилося за допомогою гомогенізатора ІКА Ultraturrax Т 10 (рисунок 2.3). Геополімерний композитний бетон був виготовлений з використанням метакаоліну, силікату натрію (Na_2SiO_3), гідроксиду натрію (NaOH) та деревних частинок, які використовувалися як піноутворювачі (таблиці 2). Процедура включає вимірювання та поєднання певних кількостей NaOH (38,7), розчину силікату натрію (313,2) та води (81) у співвідношенні 4:1:1:23, що призводить до загальної маси 643,5 г. Перемішувався вміст у герметичному контейнері протягом 24 годин використовуючи гомогенізатор Ultraturrax. Для активації препарату рекомендується перемішувати розчин за допомогою Ultraturrax зі швидкістю 3000 об/хв протягом 10 хвилин.

					БР 1025.00.00.000.ПЗ	Арк
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Метакаолін додавали до зразка у відміряній кількості 180 г протягом 5 хвилин. Потім зразок накривали та перемішували протягом 20 хвилин за допомогою гомогенізатора Ultraturrah. Зразок геополімеру зберігали в умовах низької температури.



Рисунок 2.3 – Гомогенізатор Ultra Turrah

Таблиця 3.1 – Склад зразків геополімерів, розмір частинок та концентрація, додані до геополімерного композиту

Зразок	Розмір частинок, мм	Концентрації, %
a10	1	10
a20	2	20
a30	4	30
б10	1	10
б20	2	20
б30	4	30
в10	1	10
в20	2	20
в30	4	30

2.2. Методика виготовлення зразків

Зразки геополімеру на основі метакаоліну відливали за допомогою пластикових форм розміром 40 мм×40 мм ×40 мм та 12 мм×140 мм ×140 мм (рисунок 2.4) для випробування на міцність на стиск та розтяг, які були внутрішньо викладені поліетиленом низької щільності після того, як суміш була однорідна.



Рисунок 2.4. – Пластикові форми для лиття деревних геополімерів.

Для лиття геополімерів зазвичай рекомендується використовувати пластикові форми, щоб уникнути непередбачуваної реакції між геополімером та металевою формою. Форму стискали вручну після заповнення двома шарами геополімерної пасти. Щоб позбутися повітряних пор, метакаоліновий геополімер у формах струшували. Після цього для вирівнювання верхньої поверхні форми використовували гладкий шпатель. Було виготовлено вісім паралельних зразків для кожної рецептури.

Використовуючи для вимірювання геополімерні деревні композити, щільність зразків вимірювали в кг/м³.

					БР 1025.00.00.000.ПЗ	Арк
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30

$$\rho = \frac{M}{V}$$

де ρ – густина (кг/м³), M – маса (кг) та V – об'єм (м³)

Після лиття зразки геополімеру були упаковані в поліетиленові пакети, щоб запобігти втраті вологи. Протягом цілого дня герметичні зразки витримували при кімнатній температурі. Після цього часу зразки виймали з форми, після чого проводили подальше тверднення. Після періоду затвердіння зразки залишали при кімнатній температурі. Щоб запобігти зневодненню, зразки потім поміщали в поліетиленові пакети та зберігали там до проведення випробування.

Випробувальні зразки визначали через 28 днів після лиття за допомогою випробувальних кубів зі стандартним кубічним зразком розміром 140 × 20 мм х 20 мм. Міцність на стиск визначали за допомогою статичної випробувальної машини (рисунок 2.5).



Рисунок 2.5 – Різні пропорції деревного геополімербетону

Загалом було досліджено 80 зразків, а саме геополімери з різною кількістю деревної тирси: 10%, 20% та 30%, а також контрольні зразки (рисунок 2.6) були досліджені за допомогою:

					БР 1025.00.00.000.ПЗ	Арк
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$CS = \frac{F_{max}}{A}$$

де CS – міцність на стиск кубічних зразків, МПа, F_{max} – максимальне прикладене навантаження (Н), А – площа поперечного перерізу (мм²)



Рисунок 2.6 – Кубічні зразки деревного геополімербетону.

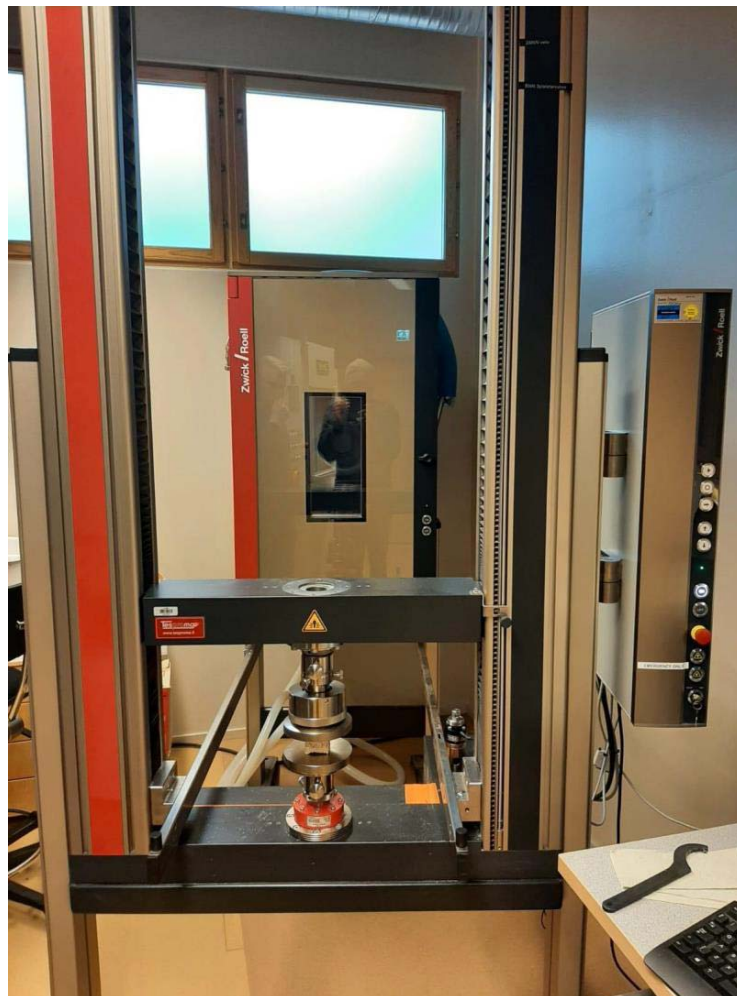


Рисунок 2.7 – Статична випробувальна машина для матеріалів Zwick Roell.

					БР 1025.00.00.000.ПЗ	Арк
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

2.3. Методика визначення міцності на згин

Випробування міцності на згин полімеризованого деревного метаколінового геополімеру було проведено згідно з ISO 516-1959. Загалом було відліто вісімдесят балок розміром 122 мм × 21 мм × 20 мм та випробувано на міцність на згин з витримкою 28 днів. Міцність на згин (FS) прямокутних зразків (20 мм × 20 мм × 122 мм) було розраховано за формулою:

$$F = 3f'_{max} \frac{1}{2}bh^2$$

де F – міцність на згин, МПа,

f'_{max} – прикладене навантаження (Н),

l – проліт між опорами (60 мм),

b – ширина (20 мм),

h – товщина (20 мм).

Межа міцності зразка на розрив відома як модуль розриву, або скорочено MOR (також відома як міцність на згин). Швидкість навантаження становила 3 мм/хв, а відстань між опорами – 140 мм. Таким чином, MOR (МПа) розраховувався як:

$$F_r = \frac{3 \cdot F_{max} \cdot 122.5 \text{ (mm)}}{2 \cdot b \cdot d \cdot (a_0)^2} \text{ [MPa]}^{a_0}$$

де F_r – модуль розриву,

F_{max} – навантаження (сила) в точці розриву (Н),

b – ширина зразка,

d – товщина зразка.

Результати були введені як дані в таблицю, а стандартна похибка була використана для подальшого аналізу даних за формулою нижче:

					БР 1025.00.00.000.ПЗ	Арк
						33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$S. E = \frac{S}{\sqrt{n}} = \frac{STDev (AA, AB)}{\sqrt{8}}$$

де S.E – стандартна похибка,

S – стандартне відхилення вибірки,

n – кількість зразків, ST

Dev – стандартне відхилення проаналізованих зразків.

Визначення модуля пружності

Згідно зі стандартом, зразки попередньо нагрівають за відносної вологості повітря 60% та температурі 23 °C перед випробуваннями на вигин та стиск. Розміри форми зразка становлять 140 x 20 x 20 мм, а для визначення модуля пружності використовувалося обладнання для статичних випробувань матеріалів Zwick Roell. Розмір зразка становить 122,5 мм x 20 мм x 20 мм, а швидкість навантаження – 1 мм, 2 мм та 4 мм.

2.4. Статистичний аналіз

Для проведення статистичного аналізу було використано програму IBM SPSS. За допомогою дисперсійного аналізу (ANOVA) було визначено, чи були суттєві відмінності в міцності зразків на стиск. Щоб остаточно визначити, які групи відрізняються, одна від одної, було проведено post-hoc аналіз. Порівняння середніх значень було проведено за допомогою В-тесту Тьюкі з рівнем значущості 5%.

Результати цього дослідження представлені у вигляді середніх значень з смугами похибки, призначеними для відображення стандартних відхилень. Середні значення, що мають однакові літери в одній групі, статистично значуще не відрізняються; $p > 0,05$.

					БР 1025.00.00.000.ПЗ	Арк
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 3

АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

3.1. Результати визначення міцності на стиск

У таблиці 3.1 наведено середнє значення стандартного відхилення міцності на стиск геополімерних композитів, наповнених деревиною, з відповідною густиною.

Міцність на стиск та щільність зразка а30 становлять 30% деревної тирси геополімерного композиту розміром 1 мм.

Таблиця 3.1 – Результати щільності та міцності на стиск деревних геополімерних композитів

Зразок	Міцність на стиск (Н/мм ²)	Щільність (кг/м ³)
a10	25,10±0,83 ^a	1371,39±39,96 ^e
a20	2,11±0,21 ^b	788,20±15,88 ^f
a30	-	-
б10	19,40±0,8 ^a	1434,24±19,25 ^e
б20	3,03±0,44 ^b	730,36±8,26 ^f
б30	0,35±0,03 ^c	627,36±16,65 ^f
в10	6,97±1,54 ^d	1381,07±18,77 ^e
в20	2,43±0,14 ^b	928,57±42,75 ^g
в30	1,16±0,08 ^c	544,16±14,83 ^f
Контрольний	17,80±1,49 ^a	1939,30±33,18 ^h

Примітка: дані представлені як середнє значення стандартного відхилення. Значення з однаковими літерами у верхньому індексі показують, що вони суттєво не відрізняються за $p > 0,05$.

Як видно з таблиці 3.1 міцність на стиск та щільність деревного геополімерного композиту впливає розмір дерев'яної тирси (1 мм, 2 мм та 4 мм) та її концентрація(10%, 20% та 30%).

Для тирси розміром 1 мм міцність на стиск зменшується зі збільшенням її концентрації від 10% до 20%, досягнувши значень 25,10 Н/мм² та 2,11 Н/мм² відповідно. Також зменшується міцність на стиск для тирси розміром 2 мм, значення міцності на стиск становить 19,40 Н/мм², 3,03 Н/мм² та 0,35 Н/мм² для концентрацій 10%, 20% та 30% відповідно. Для тирси розміром 4 мм значення міцності на стиск становить 6,97 Н/мм², 2,43 Н/мм² та 1,16 Н/мм² для концентрацій 10%, 20% та 30% відповідно (рисунок 3.1).

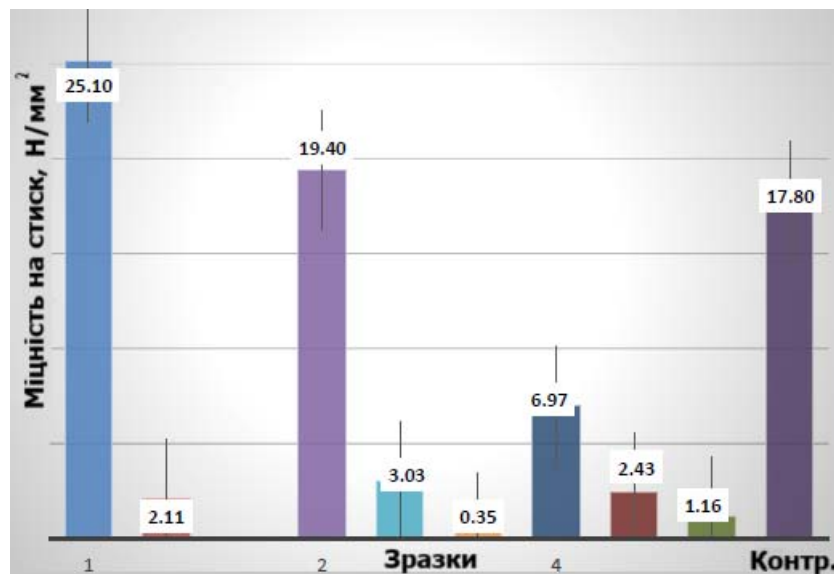


Рисунок 3.1 – Міцність на стиск деревно-геополімерного композиту.

Зразок a10 з міцністю на стиск 25,10 Н/мм² та b10 з міцністю на стиск 19,40 Н/мм² мали кращу міцність на стиск, ніж контрольний зразок з міцністю на стиск 17,80 Н/мм². Це свідчить про те, що збільшення концентрації деревної тирси в бетоні може зменшити міцність на стиск. Результат цього дослідження подібний до результатів Кхеннана та ін. [23], які зазначили, що деревна тріска без обробки знижує міцність на стиск геополімерних деревних композитів, починаючи з 16,09 до 6,12 Н/мм².

Однак, у тому ж дослідженні спостерігалось збільшення міцності на стиск геополімерних деревних композитів, оскільки оброблену/знежирену деревну тріску, оброблену хромом, міддю, миш'яком, додавали до

геополімеру, і міцність на стиск одночасно збільшувалася, починаючи з 7 Н/мм^2 до 27 Н/мм^2 . Таким чином, оброблена деревина, як правило, має більшу міцність на стиск. Що може бути пов'язано з розмірами деревної тріски, хоча в цьому дослідженні менші розміри деревної тріски (тобто 1 мм) мали кращу міцність на стиск, ніж деревна тріска розміром 2 мм та 4 мм відповідно за різних пропорцій.

Порівнюючи значення міцності на стиск для різних розмірів та концентрацій тирси, розмір тирси 1 мм за концентрації 10% має найвищу міцність на стиск ($25,10 \text{ Н/мм}^2$), тоді як розмір тирси 4 за концентрації 30% має найнижчу міцність на стиск ($1,16 \text{ Н/мм}^2$).

Однак, міцність на стиск та щільність зразка а30, який представляє концентрацію 30% деревної тирси розміром 1 мм на геополімерний композит, не вдалося визначити.

Причину цього можна пояснити співвідношенням деревина/геополімерне зв'язуюче, тобто зв'язок між гелем геополімеру та агрегатом був слабким, оскільки деревного композиту було значно більше, ніж геополімеру. Через це міцність деревного геополімеру на стиск була слабкою, а форма була зруйнована, тому міцність на стиск, міцність на вигин та щільність не визначалися. Дисперсійний аналіз також виявив статистично значуще ($p < 0,05$) значення, яке підтверджує зниження міцності на стиск зі збільшенням вмісту деревини.

Також це спостереження було подібним до результатів інших досліджень, які спостерігали, що міцність на стиск геополімерних композитів зменшується зі збільшенням вмісту деревини.

Також Фуртос та ін. [28], спостерігали найвищу міцність на стиск близько $38,4 \text{ Н/мм}^2$ максимум, що було вище, ніж міцність на стиск, $25,10 \text{ Н/мм}^2$ у цьому дослідженні. Ці результати підтверджують, що вплив розміру тирси на міцність на стиск є більш вираженим, ніж вплив концентрації. Менші розміри тирси зазвичай призводять до вищих значень

					БР 1025.00.00.000.ПЗ	Арк
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

міцності на стиск, тоді як вищі концентрації можуть призвести до збільшення або зниження міцності залежно від розміру тирси. Однак вплив був більш вираженим у цьому дослідженні, особливо в діапазоні 30 та 40%, де зниження міцності було більшим, ніж у діапазоні 10%.

Згідно з Асанте та ін. [29], кількість та тип екстрактивних речовин деревини, присутніх у суміші, як це спостерігається в цементі, можуть бути визначальним фактором впливу на міцність на стиск, оскільки специфічні для сосни екстрактивні речовини можуть перешкоджати процесу геополімеризації та, як наслідок, знижувати міцність. Це також підтверджується попередньою роботою Асанте яка виявила, що деревина евкаліпта матиме більшу питому міцність на стиск, ніж деревина сосни в геополімерній деревній матриці.

У той же час, за даними Аль Рім [31] падіння міцності пов'язане зі слабким зв'язком, що утворюється в результаті недостатнього покриття деревної тирси сполучною речовиною та зниження щільності. Результат цього дослідження підкреслює потенціал геополімерного бетону на основі деревини як стійкої альтернативи звичайному бетону. Однак, необхідні подальші дослідження для повного розуміння факторів, що впливають на його міцність, та для оптимізації його характеристик для конкретних застосувань.

Також результат показав, що міцність на стиск коливається від $0,35 \text{ Н/мм}^2$ до $25,10 \text{ Н/мм}^2$. У порівнянні з міцністю на стиск геополімербетону, виготовленого з золи-виносу, після 28 днів твердіння, було відзначено, що максимальна міцність на стиск їхнього геополімербетону становила 29,34 МПа при концентрації 14 М NaOH, при цьому значення міцності на стиск коливалися від 2,10 МПа до 25,10 МПа, залежно від розміру крихти та концентрації NaOH. Жодна із сумішей не наближається до максимальної міцності на стиск, про яку повідомляли автори [32]. Крім того, відповідно до результатів досліджень найбільше

					БР 1025.00.00.000.ПЗ	Арк
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

збільшення міцності на стиск відбулося при концентрації 12 М NaOH, зі збільшенням на 32,56%.

Щільність деревних геополімерних композитів (рисунок 3.2) та відсоток деревної тріски змінювалися статистично значущим чином. Розмір деревної тріски 1 мм та 2 мм відповідає тенденції, яка полягає в тому, що збільшення відсотка концентрації деревини зменшує щільність. Тобто, чим вище вміст деревної тріски порівняно з геополімером, тим нижча щільність.

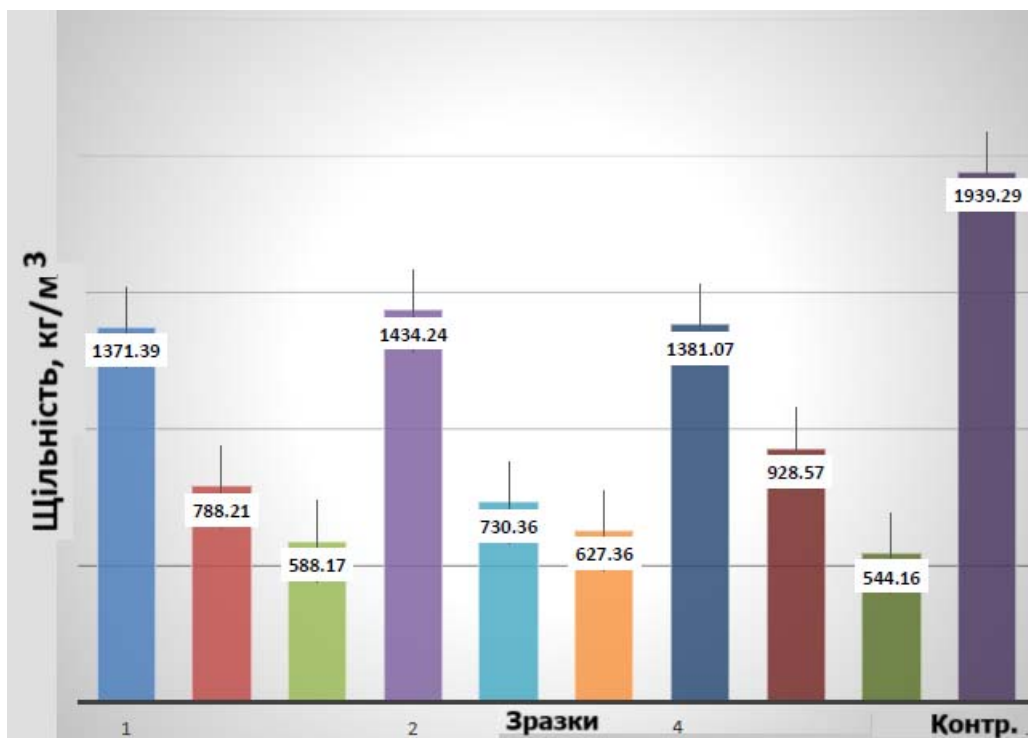


Рисунок 3.2 – Щільність деревно-геополімерних композитів

Щільність деревини залежить від кількості матеріалу клітинної стінки, присутнього в певному об'ємі, була визначена як один з факторів, що впливають на загальну щільність. Вважається, що екстрактивні речовини становлять від 1 до 20% сухої ваги деревини, що може змінити щільність деревини. Виходячи з частки, доданої до геополімерного бетону, ймовірно, що вміст екстрактів змінює щільність деревних матеріалів, що могло вплинути на щільність геополімерного деревного композиту.

Значення стандартної похибки щільності, наведені в таблиці, є невеликими, що вказує на те, що результати є послідовними та надійними. Однак, як і у випадку з результатами міцності на стиск, важливо пам'ятати, що ці результати базуються на обмеженому наборі експериментів і можуть не бути репрезентативними для всіх варіацій розміру тирси, концентрації та часу затвердіння. Крім того, щільність тирси також може впливати на її механічні та теплові властивості. Наприклад, тирса з вищою щільністю може мати кращу теплопровідність, тоді як тирса з нижчою щільністю може мати кращі звукоізоляційні властивості. Значення щільності, наведені в таблиці, також показують, що контрольна тирса має найвище значення щільності (1849,62 кг/м³) серед усіх стружок. Це може бути пов'язано з тим, що контрольна тирса була виготовлена без певного відсотка деревної тирси.

3.2. Результати міцності на згин

У таблиці 3.2 показано середнє стандартне відхилення середнього значення модуля пружності та границя міцності деревно-геополімерного композиту відносно їхньої середньої щільності. МОЕ (модуль пружності) відноситься до жорсткості матеріалу, яка відображає величину деформації, що виникає у відповідь на прикладену силу.

З таблиці видно, що значення стандартної похибки невеликі для МОЕ, MOR та щільності. Це вказує на те, що середні значення вибірки, ймовірно, близькі до справжніх середніх значень сукупності. З наведеної вище таблиці видно, що існує взаємозв'язок між розміром тирси та властивостями матеріалу.

Зокрема, було відзначено, що МОЕ геополімерного композиту після додавання деревної тирси товщиною 1 мм, 2 мм та 4 мм при концентрації 10%, 20% та 30% була нижчою, ніж у контрольній групі, на 0,00387 ГПа (рисунки 3.3).

					БР 1025.00.00.000.ПЗ	Арк
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 3.2 – Результати модуля пружності та модуля згину деревного геополімерного композиту

Зразок	МОЕ , ГПа	MOR, МПа	Щільність (кг/м ³)
a10	0,0021±2,2x10 ⁻⁰⁴ a	8,03±0,51 ^f	1371,39±39,96 ^k
a20	0,0004±2,0x10 ⁻⁰⁴ b	1,12±0,10 ^g	788,20±15,88 ^l
a30	-	0.09±0.01 ^h	588,17±16,81 ^m
б10	0,0034±5,4x10 ⁻⁰⁴ c	9,47±0,43 ^f	1434,24±19,25 ^k
б20	0,0004±4,3x10 ⁻⁰⁵ d	1,50±0,12 ^g	730,36±8,26 ^l
б30	-	0,21±0,05 ⁱ	627,36±16,65 ^l
в10	0,0025±5,2x10 ⁻⁰⁴ a	7,13±1,06 ^j	1381,07±18,77 ^k
в20	0,0008±3,5x10 ⁻⁰⁵ e	2,38±0,22 ^g	928,57±42,75 ^g
в30	-	0,14±0,02 ⁱ	544,16±14,83 ^f
Контрольний	0,0039±0,0013 ^c	3.61±0.35 ^g	1939,30±33,18 ⁿ

Примітка: дані представлені як середнє значення ± стандартне відхилення. Значення з однаковими літерами у верхньому індексі показують, що вони суттєво не відрізняються при $p > 0,05$.

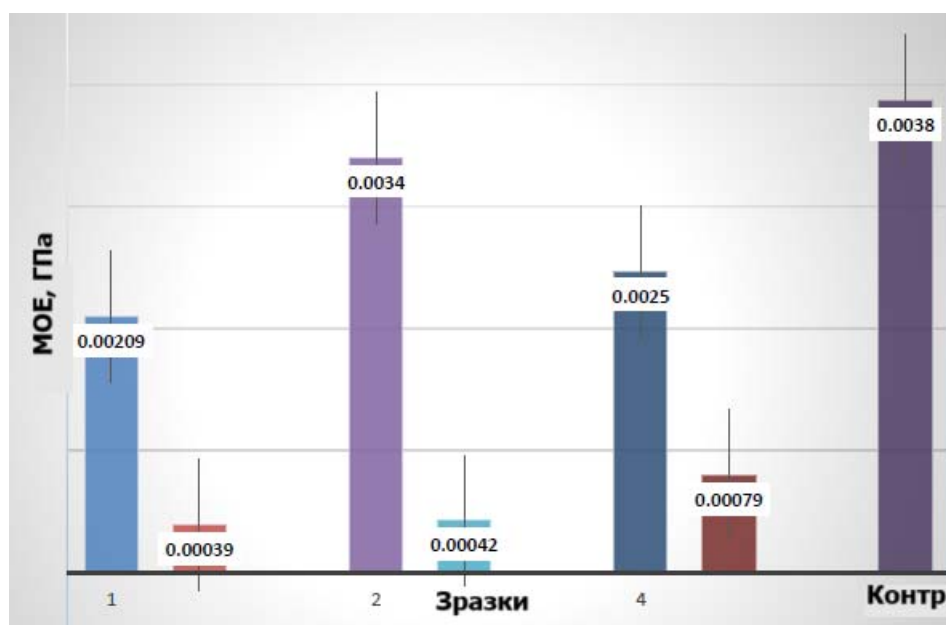


Рисунок 3.3 – Модуль пружності деревно-геополімерного композиту

З додаванням тріски деревний геополімербетон не продемонстрував очікуваної виняткової міцності на згин. Цей результат дослідження пов'язаний зі збільшенням кількості коротких волокон, що призводить до зниження міцності на згин.

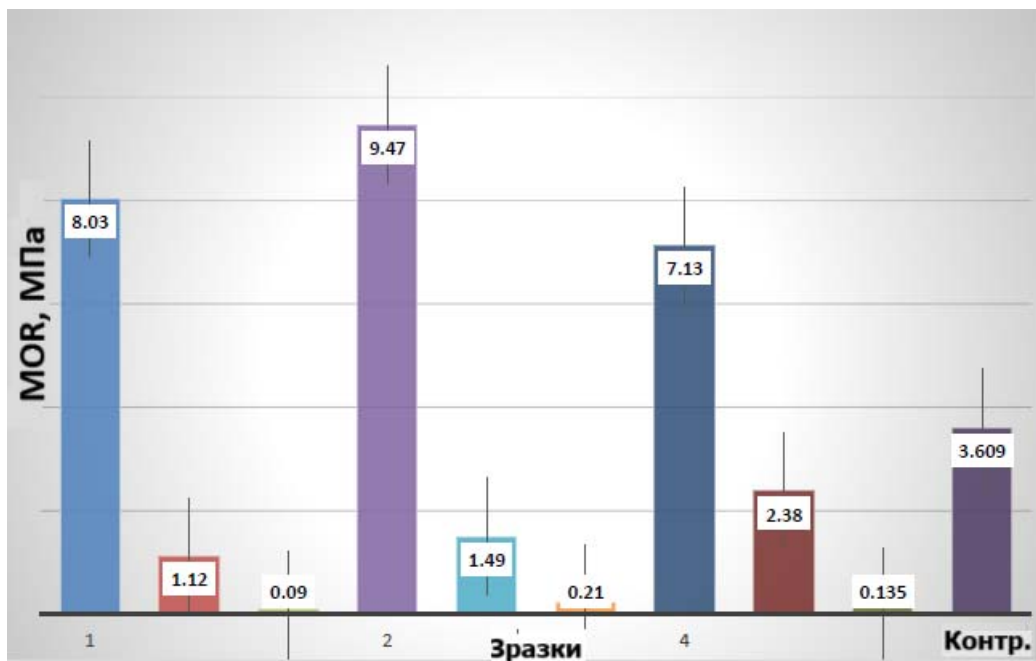


Рисунок 3.4 – Залежність модуля згину деревно-геополімерного композиту від щільності.

Таким чином, отримані результати узгоджуються з результатами попередніх досліджень Шібата та ін. [25], які спостерігали аналогічні результати.

Результати цього дослідження мають порівнянні властивості згинання з результатами [27], в яких досліджувалися механічні властивості деревної тріски та жому цукрової тростини, оброблених за допомогою молоткового млина з ситом 1 мм, а однофазний геополімер базувався на основі GGBS, тоді як двофазний прекурсор складається з золи-виносу класу F та метаксаоліну. Результати показали, що незначне покращення показника MOE та зниження показника MOR плит порівняно з контролем. Значення MOR коливалося від 1,68 МПа до 9,228 МПа, що подібно до результатів цього дослідження.

Отже, можна зробити висновок, що значення MOR позитивно корелює з розміром тирси. Значне збільшення MOR в результаті збільшення розміру деревної тирси можна пояснити тим, що більша тирса містить більшу кількість волокон, які розміщені в напрямку прикладеної сили, що призводить до збільшення жорсткості.

Порівнюючи різні розміри тирси, спостерігалось, що за концентрації 10% та розміру тирси 1 мм матеріал мав найвищі значення MOE та MOR, тоді як розмір тирси 4 мм мав найнижчі значення MOE та MOR. Це вказує на те, що розмір тирси 1 мм є найефективнішим для армування композитного матеріалу, тоді як розмір тирси 4 мм є найменш ефективним. Навпаки, розмір тирси 4 мм мав найвищу щільність, тоді як розмір тирси 1 мм мав найнижчу щільність. Це можна пояснити тим, що більший розмір тирси має меншу площу поверхні на одиницю об'єму, що призводить до більшого об'єму матричного матеріалу на одиницю об'єму. Результати нашого дослідження узгоджуються з існуючими дослідженнями про композитні матеріали. Загальновідомо, що на механічні властивості композитних матеріалів впливає розмір та концентрація армуючих частинок. Спостерігається, що збільшення концентрації армуючих частинок зазвичай призводить до збільшення MOR.

Однак подальше збільшення концентрації армуючих частинок з 20% до 30% не призводить до значного збільшення MOE або MOR, також спостерігається, що зміна розміру тирси армуючих частинок може суттєво вплинути на механічні властивості композитного матеріалу. Наприклад, для тирси розміром 1 мм збільшення концентрації тирси з 10 до 20 призводить до зменшення MOE з 0,0021 ГПа до 0,00039 ГПа та зменшення MOR з 8,03 МПа до 1,12 МПа. Однак збільшення концентрації тирси з 20 до 30 не призводить до суттєвої зміни MOE або MOR. Крім того, спостерігається, що на щільність композитного матеріалу впливає як розмір тирси, так і концентрація армуючих частинок. Наприклад, для тирси розміром 1 мм,

					БР 1025.00.00.000.ПЗ	Арк
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

збільшення концентрації армуючих частинок з 10% до 20% призводить до зменшення щільності з 1371 кг/м^3 до 788 кг/м^3 . Аналогічно, збільшення розміру тирси з 10 до 20 призводить до зменшення щільності з 1371 кг/м^3 до 788 кг/м^3 . Ці спостереження дають розуміння того, як можна оптимізувати механічні властивості композитного матеріалу для різних застосувань. Наприклад, якщо потрібен високоміцний композитний матеріал, збільшення концентрації армуючих частинок може бути корисним. З іншого боку, якщо бажаний легкий композитний матеріал, зменшення концентрації армуючих частинок та вибір крихти малого розміру може бути більш доцільним.

3.3. Залежність міцності на стиск від щільності зразка

На рисунку 3.5 представлено лінійний графік залежності значень міцності на стиск від середньої щільності різних зразків.

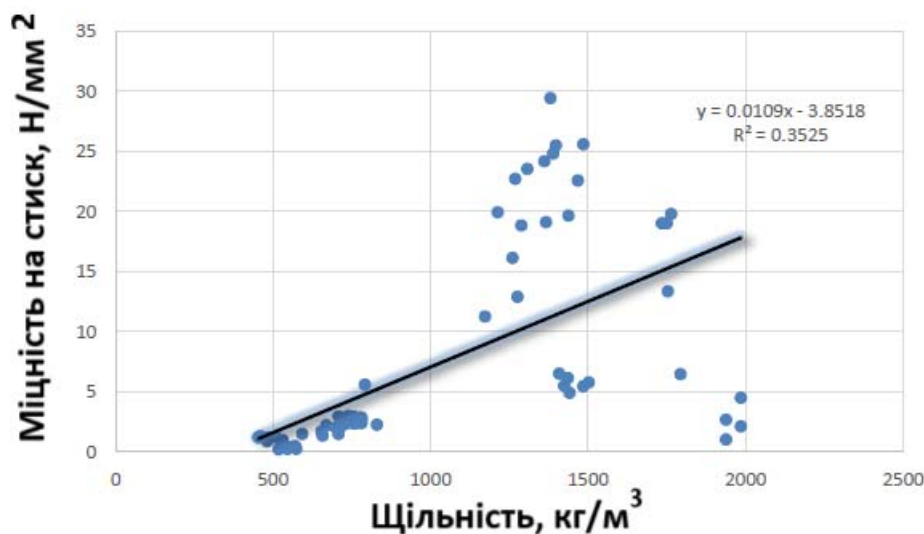


Рисунок 3.5 – Залежність міцності на стиск деревно-геополімерного композиту від щільності.

Спостерігається слабка тенденція, що міцність деревини та геополімеру на стиск може залежати від щільності ($R^2 = 0,35$). Можна зробити висновок, що міцність деревини та геополімеру на стиск може бути зменшена шляхом

збільшення щільності або, навпаки, збільшена шляхом зменшення щільності композиту.

3.4 Залежність міцності на згин від щільності зразка

Наведені нижче рисунки представляють лінійний графік залежності міцності на згин від щільності зразка. Зокрема, на рисунку 3.6 зображено лінійний графік залежності границі міцності композиту деревина-геополімер від щільності, а на рисунку 3.7 зображено залежність модуля пружності композиту деревина-геополімер від щільності.

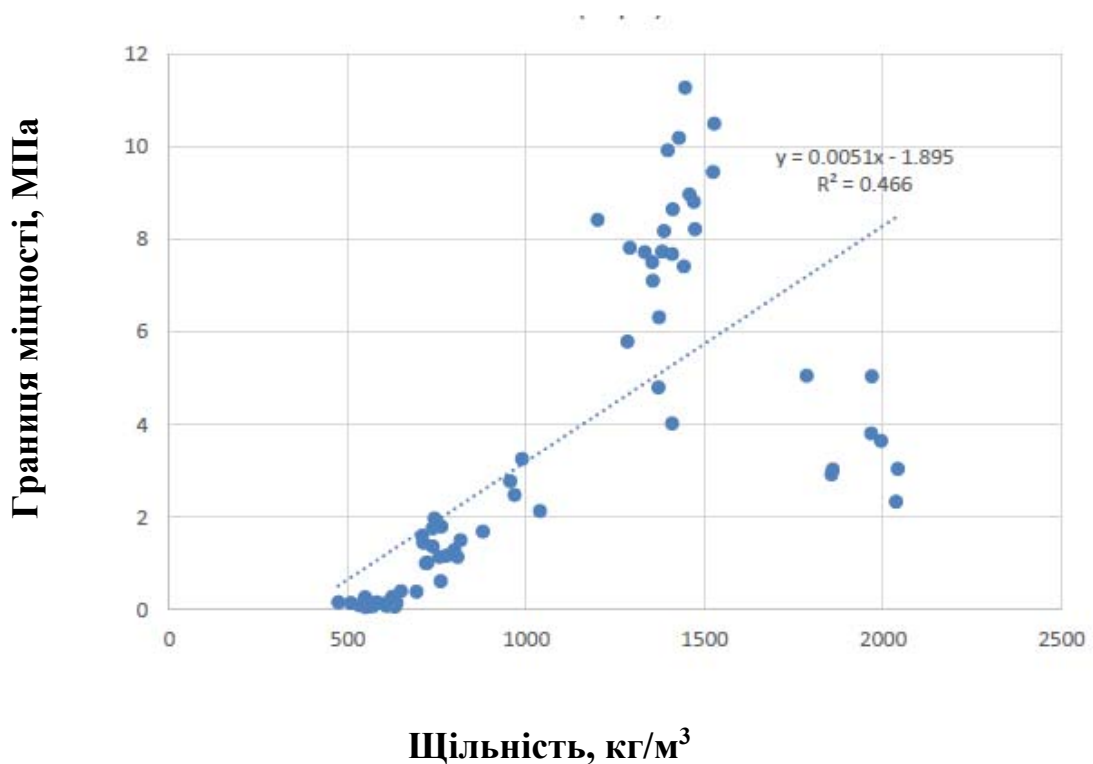


Рисунок 3.6 Залежність границі міцності на згин деревно-геополімерного композиту від щільності.

На рисунку 3.6 показано лінійний графік залежності границі міцності від густини (щільності). Можна зробити висновок, що щільність не суттєво впливає на модуль розриву, $R^2 = 0,466$.

					БР 1025.00.00.000.ПЗ	Арк
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

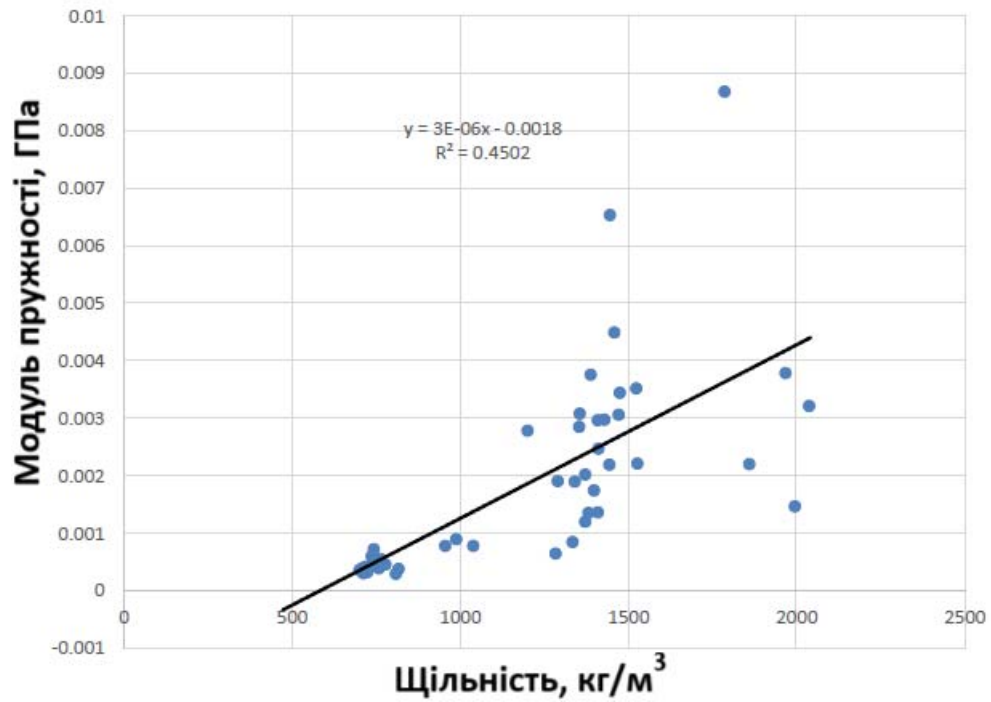


Рисунок 3.7 – Залежність модуля пружності деревно-геополімерного композиту від щільності.

На рисунку 3.7 показано лінійний графік залежності модуля пружності від густини. Щільність не має суттєвого впливу на модуль пружності при $R^2 = 0,45$.

Висновки

Для масового виробництва деревного геополімербетону з відносно стабільними та прогнозованими інженерними властивостями, вкрай важливо розуміти механічні властивості композиту. Протягом останніх 20 років проводилися різні дослідження цих властивостей. Результати цього дослідження показали, як додавання деревної тирси впливає на механічні властивості геополімерного композиту.

Найвища середня міцність на стиск становила $25,10 \text{ Н/мм}^2$, що набагато краще, ніж у контрольного зразка з міцністю на стиск $0,09 \text{ Н/мм}^2$, хоча міцність на стиск зменшується зі збільшенням відсотка деревної тирси від 10% до 40% до геополімерного композиту. При цьому найвищий середня границя міцності на згин становить $9,47 \text{ МПа}$, а модуль пружності – $0,0034 \text{ ГПа}$.

Дослідження дозволило зрозуміти взаємозв'язок між розміром частинок тирси та властивостями матеріалу, такими як міцність на стиск, MOE , MOR та щільність. Результати підтверджують, що менший розмір деревної тирси, має вищу жорсткість та механічну міцність, що може впливати на різні сфери застосування. Однак, необхідні подальші дослідження, щоб повністю зрозуміти взаємозв'язок між розміром тирси та іншими властивостями матеріалу та визначити повторюваність результатів на. Також встановлено, що концентрація армуючих частинок впливає на механічні властивості композитного матеріалу.

Помітні відмінності були виявлені в геополімерних композитах метакаолін/деревна тирса з додаванням тирси в різних відсотках. Додавання 1 мм деревної тирси на 10% негативно вплинуло на механічну міцність геополімеру метакаолін/деревна тирса. Зі зменшенням концентрації армуючих частинок модуль розриву та модуля пружності збільшувалися. Це можна пояснити тим, що армуючі частинки забезпечують додаткову міцність

					БР 1025.00.00.000.ПЗ	Арк
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

і жорсткість композитного матеріалу, одночасно зменшуючи кількість матричного матеріалу на одиницю об'єму, але збільшення деревної тирси понад 10% знижує механічну міцність.

Результати дослідження можуть бути використані для розробки моделей, які прогнозують механічні властивості композитних матеріалів на основі розміру тирси та концентрації армуючих частинок. Ці моделі можуть бути корисними під час розробки композитних матеріалів для різних застосувань і можуть допомогти в оптимізації механічних властивостей матеріалу у відповідності до конкретних вимог. Загалом, результати дослідження означають, що розмір і концентрацію тирси слід враховувати під час покращення механічних властивостей геополімерного композиту для різних застосувань. Вплив інших факторів, включаючи тип в'язучого або виробничий процес на механічні характеристики необхідно дослідити більш детально.

					БР 1025.00.00.000.ПЗ	Арк
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Список використаних джерел

1. Acosta, A.P., Labidi, J., Schulz, H.R., Gallio, E., Barbosa, K.T., Beltrame, R., de Avila Delucis, R. & Gatto, D.A., (2020). Thermochemical and mechanical properties of pine wood treated by in situ polymerization of methyl methacrylate (MMA). *Forests*, 11(7), p.768.
2. Ahmad, J., Majdi, A., Al-Fakih, A., Deifalla, A. F., Althoey, F., El-Ouni, M. H., & El-Shorbagy, M. A. (2022). Mechanical and durability performance of coconut fiber reinforced concrete: a state-of-the-art review. *Materials*, 15(10), 3601.
3. Ahmad, R., Abdullah, M. M. A. B., Ibrahim, W. M. W., Ramli, M. M., Sandhu, A. V., Mortar, N. A. M., & Zailani, W. W. A. (2020, May). Geopolymer Ceramic as Piezoelectric Materials: A Review. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 864, No. 1, p. 012044). IOP Publishing.
4. Alabduljabbar, H., Huseien, G. F., Sam, A. R. M., Alyouef, R., Algaifi, H. A. & Alaskar, A. (2020). Engineering properties of waste sawdust-based lightweight alkali-activated concrete: experimental assessment and numerical prediction. *Materials*, 13(23), 5490.
5. Albayrak, A. T., Yasar, M., Gurkaynak, M. A., & Gurgey, I. (2005). Investigation of the effects of fatty acids on the compressive strength of the concrete and the grindability of the cement. *Cement and Concrete Research*, 35(2), 400-404.
6. Albidah, A., Alghannam, M., Abbas, H., Almusallam, T., & Al-Salloum, Y. (2021). Characteristics of metakaolin-based geopolymer concrete for different mix design parameters. *Journal of Materials Research and Technology*, 10, 84-98.

					БР 1025.00.00.000.ПЗ	Арк
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

7. Aleem, M. A., & Arumairaj, P. D. (2012). Geopolymer concrete—a review. *International Journal of Engineering Sciences & Emerging Technologies*, 1(2), 118-122.
8. Alomayri, T., & Low, I. M. (2013). Synthesis and characterization of mechanical properties in cotton fiber-reinforced geopolymer composites. *Journal of Asian Ceramic Societies*, 1(1), 30-34.
9. Amiandamhen, S. O., Meincken, M., & Tyhoda, L. (2018). The effect of chemical treatments of natural fibers on the properties of phosphate-bonded composite products. *Wood Science and Technology*, 52, 653-675. 58
10. Amiandamhen, S. O., Montecuccoli, Z., Meincken, M., Barbu, M. C., & Tyhoda, L. (2017). Phosphate bonded wood composite products from invasive Acacia trees occurring on the Cape Coastal plains of South Africa. *European Journal of Wood and wood products*, 76, 437-444.
11. Amran, M., Al-Fakih, A., Chu, S. H., Fediuk, R., Haruna, S., Azevedo, A., & Vatin, N. (2021). Long-term durability properties of geopolymer concrete: An in-depth review. *Case Studies in Construction Materials*, 15, e00661.
12. Amran, M., Debbarma, S., & Ozbakkaloglu, T. (2021). Fly ash-based eco-friendly geopolymer concrete: A critical review of the long-term durability properties. *Construction and Building Materials*, 270, 121857.
13. Amran, Y. M., Alyousef, R., Alabduljabbar, H., & El-Zeadani, M. (2020). Clean production and properties of geopolymer concrete; A review. *Journal of Cleaner Production*, 251, 119679
14. Arunkumar, K., Muthukannan, M., Babu, A. D., Hariharan, A. L., & Muthuramalingam, T. (2020, June). Effect on the addition of Polypropylene fibers in wood ash-fly ash based geopolymer concrete. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 872, No. 1, p. 012162). IOP Publishing.
15. Arunkumar, K., Muthukannan, M., Kumar, A.S., Ganesh, A.C. & Devi, R.K., (2021b). Cleaner Environment Approach by the Utilization of Low Calcium Wood Ash in Geopolymer Concrete. *Appl. Sci. Eng. Prog.*, 1–13

					БР 1025.00.00.000.ПЗ	Арк
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		50

16. Arunkumar, K., Muthukannan, M., Suresh Kumar, A., Chithambar Ganesh, A., & Kanniga Devi, R. (2021a). Production of eco-friendly geopolymer concrete by using waste wood ash for a sustainable environment. *Pollution*, 7(4), 993-1006.
17. Asante, B., Appelt, J., Yan, L., & Krause, A. (2023). Influence of wood pretreatment, hardwood, and softwood extractives on the compressive strength of fly ash-based geopolymer composite. *Journal of Materials Science*, 1-17.
18. Asante, B., Ye, H., Nopens, M., Schmidt, G. & Krause, A. (2022) Influence of wood moisture content on the hardened state properties of geopolymer wood composites. *Compos Part A: Appl Sci Manuf*, 152:1. 59
19. Ashveenkumar, P., Preethi, M., & Prashanth, P. (2021). Mechanical properties of geopolymer concrete with varying cement content using fly ash and ground granulated blast furnace slag. *International Journal of Engineering, Science, and Technology*, 13(4), 57-64.
20. Aslam, M., Maktedar, S. S., & Sarma, A. K. (Eds.). (2022). *Green Diesel: An Alternative to Biodiesel and Petrodiesel*. Springer Nature Singapore.
21. Bayani, S., Papadopoulos, A.N & Taghiyari, H. R., (2019).. Physical and mechanical properties of thermally-modified beech wood impregnated with silver nano-suspension and their relationship with the crystallinity of cellulose. *Polymers*, 11, 1535.
22. Behnood, A., Verian, K. P., & Gharehveran, M. M. (2015). Evaluation of the splitting tensile strength in plain and steel fiber-reinforced concrete based on the compressive strength. *Construction and Building Materials*, 98, 519-529.
23. Berzins, A., Morozovs, A., Iejavs, J. & Gross, U. (2017). Mechanical properties of the woodgeopolymer composite. *Eng. Rural Dev*, 16, 1167-1173.
24. Burduhos Nergis, D. D. Corbu O. & Vizureanu, P. (2019). Synthesis and characteristics of local fly ash-based geopolymers mixed with natural aggregates. *Rev Chim.*;70:1262–7.

					БР 1025.00.00.000.ПЗ	Арк
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

25. Burduhos Nergis, D. D., Ardelean, I., Sandu, A. V., Vizureanu, P., Corbu, O. C., & Matei, E. (2020). Revealing the influence of microparticles on geopolymers' synthesis and porosity. *Materials*, 13(14), 3211.
26. Castillo, H., Vesely, M., Collado, H., Droguett, T., Garrido, P., & Palma, S. (2022). State of the art of geopolymers: A review. *e-Polymers*, 22(1), 108-124.
27. Chaminé, H. I., & Fernandes, J. A. (Eds.). (2023). *Advances in Geoengineering, Geotechnologies, and Geoenvironment for Earth Systems and Sustainable Georesources Management: Proceedings of the 1st Conference on Georesources, Geomaterials, Geotechnologies, and Geoenvironment (4GEO)*, Porto, 2019. Springer Nature.
28. Chau-Khun, M., Zawawi, A. A., & Wahid, O. (2018). Structural and material performance of geopolymer concrete. *ELSEVIER*.
29. Cheah, C. B, and Ramli, M. (2013). The structural behavior of HCWA ferrocementreinforced concrete composite slabs. *Compos. Part B Eng.*, 51; 68–78.
30. Chen, M., Qin, X., Zeng, G. (2017). Biodegradation of Carbon Nanotubes, Graphene, and Their Derivatives. *Trends in Biotechnology*, 35, 836–846.
31. Fernández-Jiménez, A., & Palomo, A. (2005). Composition and microstructure of alkaliactivated fly ash binder: Effect of the activator. *Cement and concrete research*, 35(10), 1984-1992.
32. Cheng, T. W. and Chiu, J. P. (2003). Fire-resistant geopolymer produced by granulated blast furnace slag, *Minerals Engineering*, 16(3), 205–210, 2003.

					БР 1025.00.00.000.ПЗ	Арк
						52
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		