

<https://doi.org/10.30857/2786-5371.2025.6.7>

Received: 24.10.2025

Revised: 28.11.2025

Accepted: 23.12.2025

УДК 678.72.43

Любомір РОЗВОРА, Олександр СЛЄПЦОВ

Київський національний університет технологій та дизайну, Україна

**РЕГУЛЮВАННЯ КІНЕТИКИ ПОГЛИНАННЯ ВОЛОГИ В КОМПОЗИТАХ НА ОСНОВІ LLDPE та CaO ШЛЯХОМ ЗМІНИ ГРАНУЛОМЕТРІЇ**

**Мета.** Метою статті є експериментальна оцінка придатності полімерних композитів з оксидом кальцію як поглиначів атмосферної вологи та обґрунтування підходу до керування їх кінетикою вологопоглинання.

**Методика.** Досліджувані композити отримувалися шляхом компаундування на двошнековому екструдері. Оцінювання поглинальної здатності виконували гравіметричним методом у замкненому об'ємі в скляному ексикаторі за температури 23 °С; зміну маси реєстрували один раз на добу. Як показник поглинання вологи використано відносний приріст маси, що відображає інтегральну кількість зв'язаної вологи.

**Результати.** Стаття присвячена обґрунтуванню підходу до керування кінетикою поглинання вологи високонаповненими полімерними композитами на основі лінійного поліетилену низької щільності та оксиду кальцію. Передумовою роботи стало те, що силікагель залишається найпоширенішим осушувачем і забезпечує швидку сорбцію з раннім виходом на квазістаціонарний стан, однак практичні задачі контролю вологості не завжди потребують саме максимально швидкого осушення на початку експозиції. У ряді випадків більш важливими є довготривале вологопоглинання і більша кінцева ємність, а також можливість цілеспрямовано змінювати кінетичну криву вологопоглинання. З урахуванням того, що оксид кальцію широко застосовують як поглинач вологи під час вторинної переробки полімерів, у роботі перевірено його придатність до сорбції атмосферної вологи поза межами розплаву у складі гранульованого композиту, а також встановлено, можливість регулювання кінетики вологопоглинання двома керованими параметрами структури: розміром гранули композиту і гранулометриєю оксиду кальцію в його складі.

**Наукова новизна.** Показано, що композити на основі LLDPE з CaO демонструють принципово інший характер сорбції, ніж силікагель: замість різкого початкового набору маси спостерігається розтягнуте у часі вологопоглинання, причому зі збільшенням частки CaO зростають ємність і час до вичерпання поглинальної ємності. Було встановлено, що для дрібнодисперсного CaO характерне інтенсивне вологопоглинання на ранніх етапах досліду і плавне монотонне наближення до рівня близько 32% через 90 діб. Для оксидів кальцію з розміром фракції 200 та 320 мкм виявлено зміну форми кривої вологопоглинання на S-подібну з тривалою положою початковою ділянкою та відкладеним прискоренням; момент прискорення узгоджується у часі з появою тріщин і локальним руйнуванням поверхні гранули, що вказує на різку зміну умов масоперенесення і зростання доступної площі контакту мінеральної фази з водяною парою.

**Практична значимість.** Отримані результати підтверджують придатність композитів на основі LLDPE з CaO як поглиначів атмосферної вологи з більш тривалим режимом роботи порівняно із силікагелем і показують, що поєднання керування розміром гранули композиту та гранулометриєю CaO формує практичний інструмент контролю кінетики вологопоглинання під конкретні умови застосування.

**Ключові слова:** LLDPE; CaO; силікагель; високонаповнені композити; вологопоглинання; кінетика вологопоглинання; гранулометрія.

**Вступ.** Силікагель, як пористий діоксид кремнію, залишається одним із найпоширеніших твердих осушувачів і найчастіше використовується як референтний матеріал у роботах, де аналізують адсорбцію вологи [4]. Його дія ґрунтується на фізичній адсорбції молекул води на розвиненій поверхні пористої структури [1; 4]. Такий механізм є оборотним, тому після нагрівання або при зниженні відносної вологості середовища силікагель може десорбувати воду і відновлювати свою сорбційну здатність. Ємність силікагелю за водяною

парою визначається рівновагою адсорбції, і за 100% відносної вологості в літературі наводиться рівень утримання вологи близько 30–35% маси. Практична ефективність силікагелю при цьому залежить не лише від його матеріальної природи, а й від поточного ступеня насичення, тобто від того, яку частину сорбційної ємності вже зайнято поглинутою вологою до початку використання. Для задач, де потрібне максимально швидке вилучення вологи з повітря, така кінетика сорбції є ефективною, однак швидкий вихід на рівноважний стан означає, що профіль осушення часто формується короткою інтенсивною початковою ділянкою кривої сорбції [4; 9].

Широкий інтерес до силікагелю підтверджується дослідженнями полімерних матеріалів, у яких пористий наповнювач дисперговано в матриці. У роботі Сангерлауба та його колег показано, що поліетиленові плівки з дисперсним силікагелем здатні поглинати помітну кількість води в перерахунку на масу плівки, а після насичення відновлювати сорбційну ємність при висушуванні [1]. Введення пористого наповнювача одночасно підвищувало ефективну паропроникність плівок у кілька разів порівняно з чистим поліетиленом, що узгоджується з прискореним проходженням водяної пари крізь шар, де відбувається адсорбція. Наряду з силікагелем до фізичних адсорбентів відносять також цеоліти, активованій оксид алюмінію та природні глини. У цих системах увагу часто зосереджують на поєднанні сорбції з технологічністю та механічними властивостями полімерної матриці. Для цеолітів, зокрема, описано підхід поверхневої модифікації стеариновою кислотою, який може покращувати диспергування в полімері і, відповідно, впливати як на механічні властивості, так і на швидкість поглинання вологи такими композиціями [8].

Для традиційних пористих осушувачів відомим інструментом керування швидкістю сорбції є гранулометрія. Дрібніші гранули мають більшу питому площу поверхні і коротший дифузійний шлях усередині частки, тому швидше виходять у стан динамічної рівноваги. Моделі й експериментальні спостереження узгоджено показують, що зменшення діаметра гранул силікагелю підвищує швидкість поглинання водяної пари, а більші гранули працюють повільніше [9]. У пакуванні це означає можливість підбирати гранулометричний склад під потрібну динаміку: дрібна фракція для швидкої сорбції при піковій вологості, більш крупна фракція для більш розтягнутого в часі поглинання.

На відміну від фізичних адсорбентів, оксид кальцію є реакційним поглиначем. Він зв'язує воду хімічно з утворенням гідроксиду кальцію, тому процес належить до хемосорбції і є необоротним у межах звичайних умов використання [12]. Стехіометрично повне перетворення відповідає поглинанню 0,321 г води на 1 г CaO, тобто приросту маси близько 32,1%. Реакція гідратації є екзотермічною, що добре відомо з технології гасіння вапна і описано як основа для самонагрівальних пакувальних рішень. У випадку пакування та транспортування товарів це означає, що поряд із сорбційними характеристиками потрібно враховувати тепловиділення та сумісність такого наповнювача із полімерною матрицею.

Практичне використання CaO у полімерних матрицях найчастіше описують через осушуючі концентрати, тобто концентровані грануляти з високою масовою часткою оксиду кальцію у носії на основі поліолефінів. Для таких продуктів наводять типовий вміст оксиду кальцію близько 60–85% і рекомендоване дозування кількох масових відсотків у полімер, що потребує осушення [13]. Цей підхід широко застосовують частіше за все у вторинній переробці полімерів для осушування матеріалів під час переробки, щоб поглинути залишкову вологу в розплаві та зменшити ризик дефектів кінцевого виробу та зменшити ступінь деградації полімера. Інтенсивність дегазації при вторинній переробці при цьому знижується, оскільки хімічне зв'язування води знижує парціальний тиск водяної пари. Оскільки CaO є твердим наповнювачем, ключовою вимогою до виготовлення концентратів осушувача є

гомогенність розподілу наповнювача в полімерній матриці. Саме цим пояснюють практику введення полімерних восків і диспергаторів, які покращують змочування і зменшують агломерацію частинок наповнювача. У літературі також описано ранні спроби використання СаО як осушувача для пакування харчових продуктів, а пізніші роботи зосередилися на вологопоглинаючих плівках, де показано, що введення СаО здатне істотно змінювати проникність для водяної пари й одночасно впливати на механічні властивості матеріалу, зокрема підвищувати міцність при розриві.

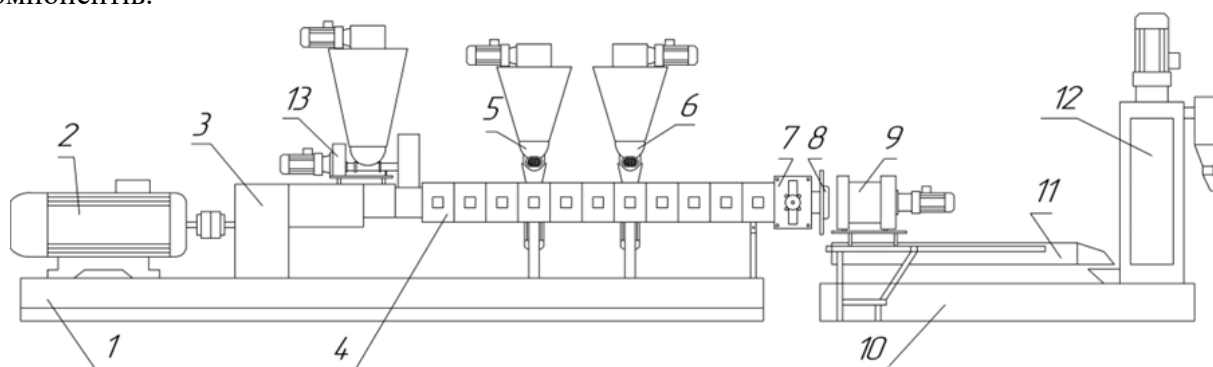
На цьому тлі ключовою прогалиною залишалось питання, наскільки СаО у складі полімерного композиту може працювати не лише як технологічний осушувач у розплаві під час переробки термопластичних полімерів, а й поза межами розплаву: як поглинач атмосферної вологи у реальних умовах експлуатації.

**Постановка завдання.** Поширеною практикою контролю вологості середовища під час зберігання та транспортування товарів та виробів є застосування пористих адсорбентів, серед яких комерційний силікагель є найбільш поширеним та таким, що забезпечує швидке поглинання вологи. Водночас прикладні задачі контролю вологи не завжди зводяться до максимально швидкого осушення на початку експозиції. За певних умов пріоритетом стає довготривале поглинання вологи з більшою кінцевою ємністю поглинання, а не швидке досягнення квазістаціонарного стану. У цьому контексті актуальною є розробка і дослідження матеріалів, для яких характерною є більша ємність і значно пізніший вихід на умовне плато вологопоглинання, на відміну від силікагелю.

**Метою досліджень** є встановлення залежності властивостей поліетиленових плівок від технології введення наповнювача.

**Вихідні дані.** Для виготовлення дослідних зразків використовували лінійний поліетилен низької густини марки INEOS ELTEX PF1320AZ, функціональний осушувальний компонент на основі оксиду кальцію марок Caloxol PG (Постачальник ТОВ «Оміа Україна»), «Чарівна Грядка» (постачальник ТОВ «АГРОШОП»), та ХімСейл.

Концентрат наповнювача і компаунд виготовляли на двошнековому компаундері (рис. 1) (діаметр шнека – 73 мм, відношення  $L/D$  – 48). Попередньо, матеріали, дозувалися у однаковій послідовності у швидкісний змішувач, де відбувалась інтенсивна гомогенізація компонентів.



**Примітка:** 1 – станина (рама); 2 – головний електродвигун; 3 – редуктор; 4 – шнекова пара; 5, 6 – бокові дозатори; 7 – шибєрний фільтр; 8 – формуючий інструмент (фільєра); 9 – водокільцева різка; 10 – ємність з оборотною водою; 11 – жолоб; 12 – центрифуга; 13 – дозатор полімерної гранули.

**Рис. 1. Принципова схема лінії компаундування, призначеної для отримання концентратів і компаундів**

У зону завантаження компаундера подавали поліетилен LLDPE, який у перших трьох температурних зонах частково розплавлявся. У четвертій та сьомій зонах через два бокові живильники вносили суміш попередньо підготовлених компонентів на одностадійному

міксері. Після гомогенізації розплаву здійснювалося формування екструдату через фільтру, а на стренговій різці з повітряним охолодженням проходило гранулювання з отриманням частинок заданого розміру.

Після грануляції матеріал проходив через перше вібростито з поділом на фракції, після чого усереднювався у бункері-накопичувачі. Після стадії усереднення гранулят повторно просіювався на віброститі для усунення пилової фракції. Рецептний склад композитів наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

**Склад та умови одержання композитів з оксидом кальцію  
на основі лінійного поліетилену низької щільності**

Зразок	LLD1	LLD2	LLD3	LLD4	LLD5	LLD6
<b>Композиція</b>						
LLDPE, %	70	60	50	40	30	20
Caloxol PG, %	30	40	50	60	70	80
<b>Компаундування</b>						
Частота обертання шнеку, об/хв	2,2	2,4	2,4	2,2	2	1,7
Температура зони 1, °С	177	177	175	175	166	166
Температура зони 2, °С	180	180	176	176	167	167
Температура зони 3, °С	185	185	181	181	175	175
Температура зони 4, °С	188	188	183	183	180	180
Температура зони 5, °С	195	195	192	192	185	185
Температура зони 6, °С	200	200	195	195	190	190
Температура зони 7, °С	204	204	200	200	195	195
Температура зони 8, °С	204	204	200	200	195	195
Температура зони 9, °С	204	204	200	200	197	197
Температура зони 10, °С	204	204	200	200	197	197
Температура зони 11, °С	200	200	195	195	193	193
Температура зони 12, °С	196	196	193	193	192	192
Температура голови, °С	193	193	192	192	192	192
Температура розплаву, °С	192	191	193	193	191	192
Швидкість тягнучого пристрою, м/с	0,68	0,71	0,71	0,65	0,59	0,50
Тиск на фільтрі розплаву, бар	18	20	23	28	33	40
Продуктивність, кг/год	11.8	14.09	15.90	16.22	16.25	15.09
Діаметр гранули, мм	2,1	2	2	2	2	2
ПТР гранули, г/10 хв	4,1	4,0	3,8	3,6	3,2	2,7

**Результати дослідження.** Оцінку поглинальної здатності виконували гравіметричним методом у замкненому об'ємі, вимірювання зміни маси проводили один раз на добу. В якості камери використовувався скляний ексикатор з краном. У середині підтримували заданий мікроклімат за температури 23 °С. Температуру та відносну вологість у камері контролювали цифровим термогігрометром. Вологість у камері формували на основі дистильованої води. Керування вмістом водяної пари здійснювали шляхом додавання або видалення водяної пари за допомогою водяної бані.

Для інтерпретації результатів одразу ввели еталонний підхід через порівняння з силікагелем, оскільки для нього типовою є швидка сорбція з раннім виходом на квазістаціонарний стан. На цьому фоні поведінка гранул LLDPE з CaO виявилась принципово іншою: замість різкого початкового набору маси спостерігається більш розтягнута у часі

сорбція, і навіть за тривалого вологопоглинання упродовж 90 діб кінетичні криві для композитів не відтворюють характерного для силікагелю швидкого насичення на початку процесу (рис. 2).

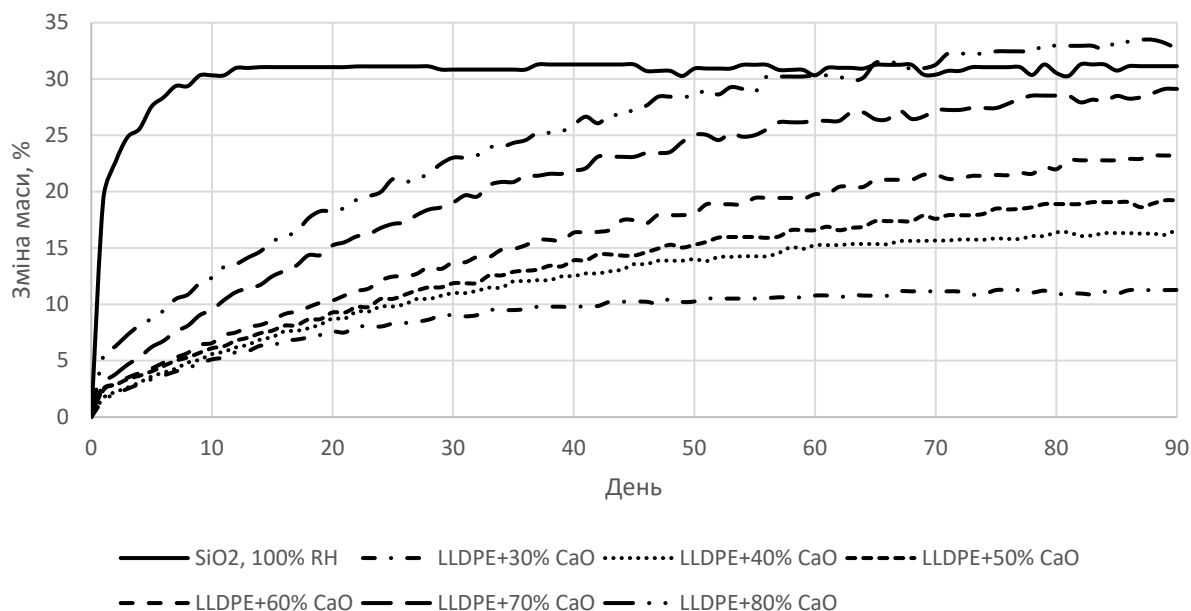


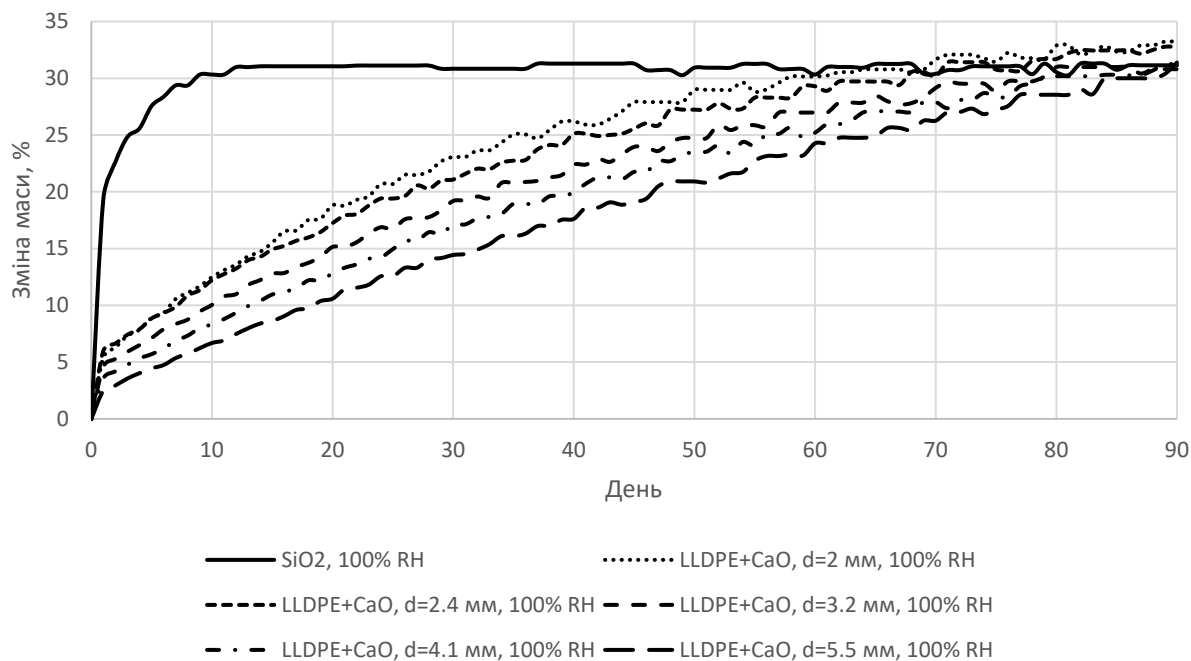
Рис. 2. Кінетика сорбції комерційного силікагелю та полімерних композитів на основі оксиду кальцію

Ключовим результатом на початковому етапі стало встановлення системної залежності між вмістом CaO та параметрами вологопоглинання композитів. Для гранул LLDPE з CaO стартова ділянка кривої є суттєво пологішою, а зі збільшенням масової частки оксиду кальцію зростають і сорбційна ємність, і час, необхідний для досягнення квазістаціонарного стану. Це означає, що вже на рівні контролю складу композиту можна цілеспрямовано зміщувати поведінку матеріалу у бік більш тривалого поглинання вологи, не зводячи роботу вологопоглинача до короткого інтенсивного етапу, характерного для силікагелю.

Після встановлення базових закономірностей вологопоглинання композитів на основі LLDPE з високим вмістом оксиду кальцію було висунуто припущення, що практична ефективність такого осушувача визначається не лише складом, а й гранулометричними параметрами самого грануляту. Для насипного поглинача в перфорованому пакету саме геометрія гранули визначає площу контакту поглинаючого матеріалу з водяною парою і умови масоперенесення всередині частинки, тому очікувалося, що збільшення діаметра гранули має сповільнювати кінетику поглинання, тоді як досягнута ємність змінюватиметься значно слабше.

Щоб перевірити це припущення, за базовий зразок було взято композит із 80% оксиду кальцію. Для ізоляції саме геометричного чинника складу композиту, частоту обертання шнека і температурний профіль екструдера під час компаундування не змінювали. Змінювали лише швидкість тягнучого пристрою під час грануляції, що дало змогу отримати п'ять фракцій гранули без корекції рецептури та без додаткової обробки із середнім діаметром гранули 2,0 мм, 2,5 мм, 3,2 мм, 4,1 мм і 5,5 мм. Варто відзначити, що отримання таких композитів було технічно складним завданням через виділення оксиду кальцію із зон дегазації двошнекового екструдера, що пов'язано зі збільшенням в'язкості розплаву та, відповідно, зростанням тиску на фільтри розплаву [15].

Отримані кінетичні криві показали, що зі збільшенням діаметра гранули залежність зміни маси від часу стає помітно пологішою на всій тривалості експозиції, тобто композит із крупнішою гранулою набирає масу повільніше й пізніше наближається до повного вичерпання ємності (рис. 3).



**Рис. 3. Кінетика сорбції комерційного силікагелю та полімерних композитів на основі оксиду кальцію з різним середнім діаметром гранули**

Найвиразніше зміна кінетики поглинання проявлялася в довгостроковій перспективі: для дрібнішої гранули приріст маси на фіксований момент часу був вищим, тоді як для найбільшої гранули відставання зберігалось майже до завершення 90-добового інтервалу. При цьому кінцева ємність поглинання змінювалася несуттєво, а наприкінці експерименту криві зближувалися в області близько 30–32% зміни маси.

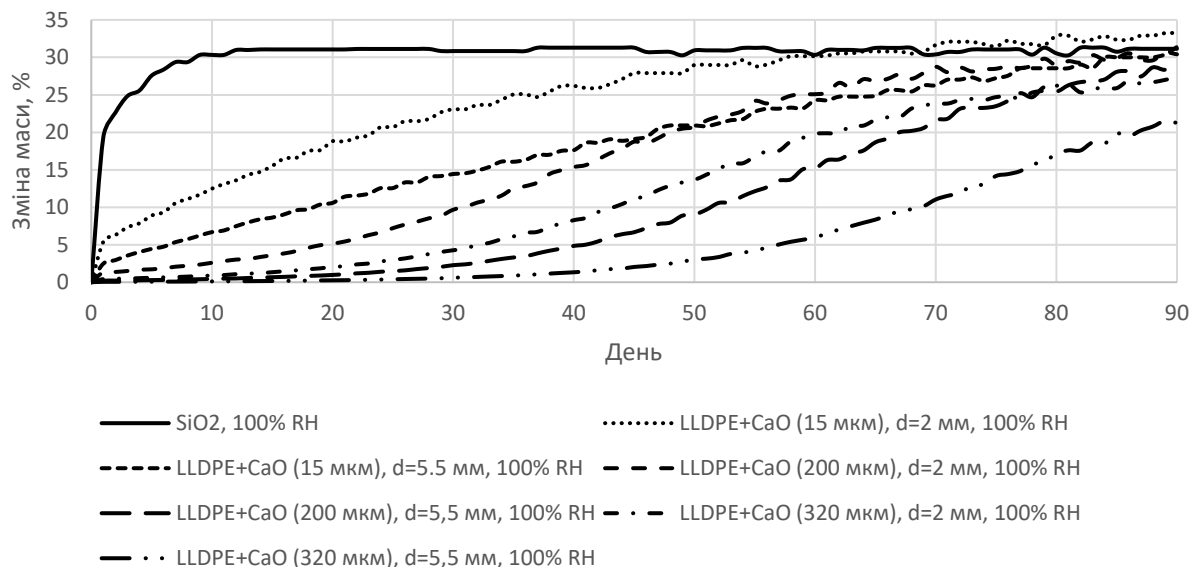
Виявлену закономірність можна пов'язати з сукупною дією геометричної форми і характеру масопереносу, характерних для гетерогенних процесів у твердих частинках. Зі зростанням характерного розміру гранули зменшується зовнішня питома площа поверхні на одиницю маси, а також посилюються зовнішні й внутрішні дифузійні обмеження, що природно проявляється уповільненням кінетичних кривих.

Отже, варіювання середнього діаметра гранули є дієвим інструментом керування швидкістю вологопоглинання полімерними композитами без зміни кінцевої ємності, що відкриває можливість цілеспрямовано підбирати тривалість поглинальної дії під потреби конкретного застосування.

Після серії дослідів із варіюванням розміру гранули композиту було окремо перевірено, як на кінетику вологопоглинання впливає гранулометрія оксиду кальцію в складі поглинальної фази. Для цього виготовили серію композитів із вмістом оксиду кальцію 80%, але з різною крупністю часток оксиду кальцію: 15 мкм, 200 мкм і 320 мкм, а також у двох розмірах гранули: 2 та 5 мм. Для кожної комбінації розміру гранули композиту і гранулометрії CaO будували криві відносної зміни маси у часі за 100% відносної вологості.

Для композитів із дрібнодисперсним оксидом кальцію 15 мкм крива мала найбільш інтенсивну початкову ділянку вологопоглинання: уже в перші 10–20 діб фіксували відчутний

приріст маси, після чого спостерігалось плавне, майже монотонне наближення до рівня, близького до 33% наприкінці експерименту (рис. 4).

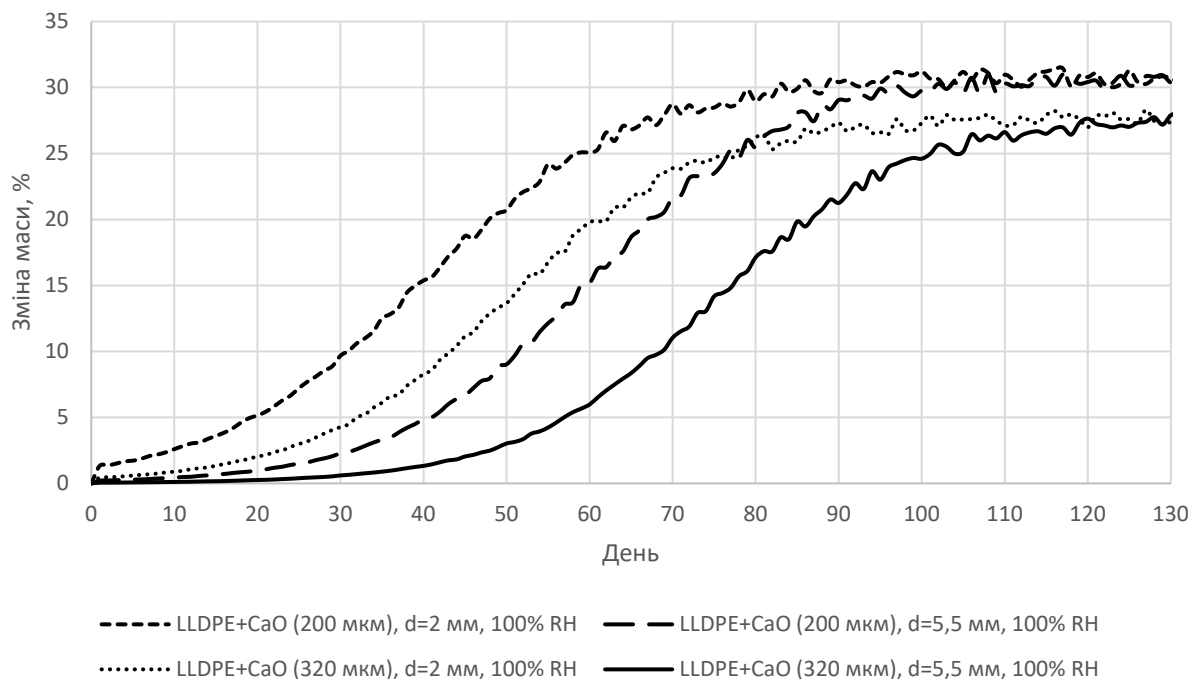


**Рис. 4. Кінетика сорбції комерційного силікагелю та полімерних композитів з різним середнім діаметром оксиду кальцію**

Для композитів із середнім та грубодисперсним оксидом кальцію 200 мкм і 320 мкм форма кінетичних кривих змінилася: на ранніх термінах приріст маси був значно повільнішим і крива тривалий час залишалася пологою, після чого на середніх термінах з'являлася ділянка прискорення, а далі знову відбувався перехід до більш плавного зростання. На тривалішому часовому інтервалі це проявлялося як S-подібний характер залежності, причому зміна режиму не була синхронною для всіх варіантів 200–320 мкм. Паралельно зі зважуванням оцінювали стан гранули візуально. Було зафіксовано, що момент переходу до швидшого набору маси збігався з появою тріщин і локальним порушенням цілісності поверхні гранули у зразках з крупним CaO. Після розтріскування крива ставала помітно крутішою. Цю узгодженість доцільно пов'язувати зі зміною умов масоперенесення: до появи тріщин доступ пари до мінеральної фази визначається переважно зовнішньою поверхнею гранули і обмеженою кількістю внутрішніх каналів у полімерній матриці. Коли ж утворюються тріщини, відкриваються нові поверхні, зростає проникність гранули для пари і збільшується частка ділянок, де оксид кальцію контактує з вологим середовищем безпосередньо. За таких умов прискорення масонакопичення є очікуваним і відображається на кінетичній залежності у вигляді вираженої ділянки підйому.

Порівняння фракцій 200 мкм і 320 мкм показало, що перехід до прискореного зростання для 200 мкм проявляється раніше, ніж для 320 мкм. Для 200 мкм зразок із діаметром гранули композиту 2 мм переходив до інтенсивного набору маси приблизно після 30–40 діб і далі наближався до плато після 90–110 діб, через що тривалість експерименту довелося збільшити, тоді як для гранули 5,5 мм за тієї ж фракції кінцева ємність була подібною, але активна ділянка зміщувалася і була більш розтягнутою. Для 320 мкм індукційний період був найдовшим: при діаметрі гранули 2 мм помітне прискорення з'являлося пізніше, а вихід на плато близько 28% відбувався лише після 100 діб (рис. 5); Найповільнішим поглинанням вологи характеризувався композит з діаметром часток оксиду кальцію 320 мкм і діаметром гранули 5,5 мм, де активна ділянка кривої зміщувалася приблизно до 50–90 діб і наближення до плато відбувалося

наприкінці експерименту. Таким чином, гранулометрія CaO змінює не тільки швидкість набору маси, але й саму форму кінетичної кривої, а поєднання зміни розміру гранули композиту та крупністю оксиду кальцію формує практичний інструмент керування кінетикою вологопоглинання такими композитами.



**Рис. 5. Кінетика вологопоглинання полімерних композитів з різним середнім діаметром оксиду кальцію**

**Висновки.** В ході роботи виявлено принципову відмінність вологопоглинання високонаповненими полімерними композитами з CaO від силікагелю: замість різкого початкового вологопоглинання та раннього виходу в квазістаціонарний стан спостерігається більш розтягнуте у часі поглинання, що також характеризується більшою ємністю. Встановлено системну залежність між вмістом CaO та ємністю вологопоглинання: зі збільшенням масової частки оксиду кальцію у складі композиту зростають і сорбційна ємність, і швидкість поглинання води.

Показано, що розмір гранули композиту є робочим інструментом керування швидкістю реалізації поглинальної здатності без зміни втрати кінцевої ємності. Для композиту на основі LLDPE та 80% CaO зі збільшенням середнього діаметра гранули з 2,0 мм до 5,5 мм кінетичні криві стають пологішими на всій тривалості випробування, а найбільші відмінності фіксуються у довготривалому інтервалі, тоді як наприкінці експерименту криві зближуються в області близько 30–32% зміни маси. Встановлено, що гранулометрія CaO впливає не лише на швидкість, але і на форму кінетичної кривої вологопоглинання. Для дрібнодисперсного оксиду кальцію характерне інтенсивне вологопоглинання на ранніх термінах і плавне монотонне наближення до рівня близько 32% за 90 діб. Для оксиду кальцію з діаметром часток 200 мкм і 320 мкм спостерігається тривалий повільний початок поглинання із подальшим прискоренням, причому таке прискорення збігається у часі з появою тріщин та локальним руйнуванням поверхні гранули.

Отже, поєднання керування розміром гранули композиту та гранулометриєю CaO утворює практичний інструмент контролю кінетики вологопоглинання під заданий термін роботи поглинача.

Подальші дослідження плануються в напрямку модифікації складу поглинальних полімерних композитів, що спрямовані на підвищення технологічності переробки таких композитів, а також підвищення їх ударної в'язкості та відносного видовження при розриві. Такий напрямок досліджень пов'язаний із тим, що компаундування високонаповнених композитів шляхом екструзії на двошнековому екструдері є нетривіальною задачею і одержання композитів із 70 та 80% оксиду кальцію супроводжувалось значними технологічними труднощами. Також, такі високонаповнені композити за рахунок високого вмісту мінеральної фази у своєму складі суттєво втрачають свої механічні характеристики, зокрема відносно видовження при розриві та ударну в'язкість, що відображається в їх крихкості, пилінні та неможливості одержання практично доцільних форм поглиначів для пакувальної галузі, таких як стрічка або плівка.

### References

### Література

1. Sänglerlaub, S., Kucukpinar, E., & Müller, K. (2019). "Desiccant Films Made of Low-Density Polyethylene with Dispersed Silica Gel: Water Vapor Absorption, Permeability (H<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>), and Mechanical Properties." *Materials*, 12(14), 2304. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma12142304>.
2. Sänglerlaub, S., Kucukpinar, E., Kiese, S., Bauer, K. D., & Müller, K. (2019). Desiccant films made of low-density polyethylene with dispersed calcium oxide: Water vapor absorption, permeation and mechanical properties. *Journal of Applied Polymer Science*, 136, 47460. DOI: <https://doi.org/10.1002/app.47460>.
3. Silva, C. et al. (2020). Mechanical and Antimicrobial Polyethylene Composites with CaO Nanoparticles. *Polymers*, 12(9), 2132. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym12092132>.
4. Kenyó, C. et al. (2013). Functional Packaging Materials: Factors Affecting the Capacity and Rate of Water Adsorption in Desiccant Composites. *Journal of Polymer Research*, 20(11), 294. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10965-013-0294-2>.
5. Kenyó, C. et al. (2014). Effect of Desiccant Characteristics on the Properties of PS/Zeolite Functional Packaging Materials. *Polymer Composites*, 35(11), 2112–2120. DOI: <https://doi.org/10.1002/pc.22873>.
6. Mathiowitz, E. et al. (2001). Novel Desiccants Based on Designed Polymeric Blends. *Journal of Applied Polymer Science*, 80(3), 317–327. DOI: [https://doi.org/10.1002/1097-4628\(20010418\)80:3<317::AID-APP1102>3.0.CO;2-Q](https://doi.org/10.1002/1097-4628(20010418)80:3<317::AID-APP1102>3.0.CO;2-Q).

7. Pehlivan, H. et al. (2003). Water and Water Vapor Sorption Studies in Polypropylene–Zeolite Composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 90(11), 3069–3075. DOI: <https://doi.org/10.1002/app.13046>.
8. Kim, H., Biswas, J., & Choe, S. (2006). Effects of Stearic Acid Coating on Zeolite in LDPE, LLDPE, and HDPE Composites. *Polymer*, 47(11), 3981–3992. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2006.03.068>.
9. Aristov, Yu. I. et al. (2006). Kinetics of Water Sorption on SWS-1L (Calcium Chloride Confined to Mesoporous Silica Gel): Influence of Grain Size and Temperature. *Chemical Engineering Science*, 61(5), 1453–1458. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2005.08.033>.
10. European Patent EP2093162A1. Moisture Absorbing Polymeric Formulations with Enhanced Absorption Properties. Publ. 26 Aug 2009, inventors: Schroeder, V. et al.
11. Jiang, Y. et al. (2023). Latest Advances in Active Materials for Food Packaging and Their Application. *Foods*, 12(22), 4055. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods12224055>.
12. Hayden, A. J., & Ozcomert, J. S. (2004). The Use of Calcium Oxide as a Desiccant in Extrusion Coatings. *Proc. of TAPPI Annual Technical Conference (PLACE)*, Nashville, USA (pp. 2620–2622).
13. Murray, L. et al. (2003). Moisture Scavenging Packaging for Diagnostic Test Strips, Pharmaceuticals and Other Moisture Sensitive Products. *Proc. of TAPPI PLACE Conference*, Orlando, USA (pp. 669–675).
14. Sova, N. V., Slietsov, O. O., Rozvora, L. V., & Khodykin, A. O. (2023). Kompozytsiini polimerni materialy z khimichnoaktyvnymu napovniuvachamy [Composite polymer materials with chemically active fillers]. *Kompleksne zabezpechennia yakosti tekhnolohichnykh protsesiv ta system – Comprehensive quality assurance of technological processes and systems: materials of abstracts of the XIII International Scientific and Practical Conference*, Vol. 1 (p. 338). URL: <http://ir.stu.cn.ua/handle/123456789/28064> [in Ukrainian].
15. Sova, N. V., & Rozvora, L. V. (2023). Polimerni kompozyty z reholovanyum volohopohlynanniam [Polymer composites with controlled moisture absorption]. *Osvita dlia staloho maibutnoho: ekolohichni, tekhnolohichni, ekonomichni i sotsiokulturni pytannia – Education for a sustainable future: environmental, technological, economic and socio-cultural issues: collective monograph*
7. Pehlivan H. et al. Water and Water Vapor Sorption Studies in Polypropylene–Zeolite Composites. *Journal of Applied Polymer Science*. 2003. Vol. 90, No. 11. P. 3069–3075. DOI: <https://doi.org/10.1002/app.13046>.
8. Kim H., Biswas J., Choe S. Effects of Stearic Acid Coating on Zeolite in LDPE, LLDPE, and HDPE Composites. *Polymer*. 2006. Vol. 47, No. 11. P. 3981–3992. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2006.03.068>.
9. Aristov Yu. I. et al. Kinetics of Water Sorption on SWS-1L (Calcium Chloride Confined to Mesoporous Silica Gel): Influence of Grain Size and Temperature. *Chemical Engineering Science*. 2006. Vol. 61, No. 5. P. 1453–1458. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2005.08.033>.
10. European Patent EP2093162A1. Moisture Absorbing Polymeric Formulations with Enhanced Absorption Properties. Publ. 26 Aug 2009, inventors: Schroeder V. et al.
11. Jiang Y. et al. Latest Advances in Active Materials for Food Packaging and Their Application. *Foods*. 2023. Vol. 12, No. 22. Art. 4055. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods12224055>.
12. Hayden A. J., Ozcomert J. S. The Use of Calcium Oxide as a Desiccant in Extrusion Coatings. *Proc. of TAPPI Annual Technical Conference (PLACE)*. Nashville, USA, 2004. P. 2620–2622.
13. Murray L. et al. Moisture Scavenging Packaging for Diagnostic Test Strips, Pharmaceuticals and Other Moisture Sensitive Products. *Proc. of TAPPI PLACE Conference*. Orlando, USA, 2003. P. 669–675.
14. Сова Н. В., Слешов О. О., Розвора Л. В., Ходикін А. О. Композиційні полімерні матеріали з хімічноактивними наповнювачами. *Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС–2023): матеріали тез доповідей XIII Міжнародної науково-практичної конференції*. Чернігів: НУ "Чернігівська політехніка", 2023. Т. 1. С. 338. URL: <http://ir.stu.cn.ua/handle/123456789/28064>.
15. Сова Н. В., Розвора Л. В. Полімерні композити з регульованим вологопоглинанням. *Освіта для сталого майбутнього: екологічні, технологічні, економічні і соціокультурні питання: колективна монографія за матеріалами Всеукраїнської наукової конференції (Київ,*

based on the materials of the All-Ukrainian scientific conference (Kyiv, October 18, 2023), (pp. 162–165). URL: <https://er.knutd.edu.ua/handle/123456789/26258> [in Ukrainian].

16. Sova, N. V., & Rozvora, L. V. (2024). Polimerni kompozytni materialy z vysokym stupenem napovnenia [Polymer composite materials with a high degree of filling]. *Kompleksne zabezpechennia yakosti tekhnolohichnykh protsesiv ta system – Comprehensive quality assurance of technological processes and systems: materials of the abstracts of the XIV International Scientific and Practical Conference (Chernihiv, May 23–24, 2024)*, Vol. 1 (p. 318). URL: [https://drive.google.com/file/d/1s2IU7CHhsXHLKxCXEVMEM\\_AxquSi6b0q/view](https://drive.google.com/file/d/1s2IU7CHhsXHLKxCXEVMEM_AxquSi6b0q/view) [in Ukrainian].

18 жовтня 2023 року). Київ: КНУТД, 2023. С. 162–165. URL: <https://er.knutd.edu.ua/handle/123456789/26258>.

16. Сова Н. В., Розвора Л. В. Полімерні композитні матеріали з високим ступенем наповнення. *Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС–2024): матеріали тез доповідей XIV Міжнародної науково-практичної конференції (Чернігів, 23–24 травня 2024 р.)*. Чернігів, 2024. Т. 1. С. 318. URL: [https://drive.google.com/file/d/1s2IU7CHhsXHLKxCXEVMEM\\_AxquSi6b0q/view](https://drive.google.com/file/d/1s2IU7CHhsXHLKxCXEVMEM_AxquSi6b0q/view).

#### ROZVORA LYUBOMIR

Postgraduate Student, Department of Chemical Technologies and Resource Saving, Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine  
<https://orcid.org/0009-0002-7034-1890>  
E-mail: [lew.9.bv@gmail.com](mailto:lew.9.bv@gmail.com)

#### SLIEPTSOV OLEKSANDR

PhD, Assistant, Department of Chemical Technologies and Resource Saving, Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0002-0608-1855>  
Scopus Author ID: 57189215952  
E-mail: [slyepcov.oo@knutd.edu.ua](mailto:slyepcov.oo@knutd.edu.ua)

### Lyubomir ROZVORA, Oleksandr SLIEPTSOV

Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine

## REGULATING MOISTURE UPTAKE KINETICS IN LLDPE/CAO COMPOSITES BY VARYING PARTICLE SIZE DISTRIBUTION

**Purpose.** The purpose of the article is to experimentally assess the suitability of calcium oxide-containing polymer composites as absorbers of atmospheric moisture and to substantiate an approach to controlling their moisture uptake kinetics.

**Methodology.** The composites that were researched were produced by compounding in a twin-screw extruder. Moisture absorption was evaluated using a gravimetric method in a closed volume within a glass desiccator at 23 °C, with mass changes recorded daily. Relative mass gain was used as the moisture uptake metric, reflecting the integral amount of bound moisture.

**Findings.** The article substantiates an approach to controlling the moisture uptake kinetics of highly filled polymer composites based on linear low-density polyethylene and calcium oxide. The motivation for the study is that silica gel remains the most widely used desiccant and provides rapid sorption with an early transition to a quasi-steady state; however, practical moisture-control tasks do not always require the fastest possible drying at the beginning of exposure. In a number of cases, prolonged moisture absorption, higher final capacity, and the ability to deliberately tailor the moisture uptake curve are more important. Given that calcium oxide is widely used as a moisture scavenger during secondary polymer recycling, this work evaluates its suitability for absorbing atmospheric moisture outside the melt when incorporated into a granulated composite and demonstrates the possibility of regulating moisture uptake kinetics through two controllable structural parameters: the composite granule size and the particle size distribution of calcium oxide in the composite.

**Originality.** It is shown that LLDPE/CaO composites exhibit a fundamentally different sorption behavior than silica gel: instead of a sharp initial mass increase, moisture uptake is extended over time, and increasing the CaO content leads to higher capacity and a longer time to exhaustion of the absorption capacity. Finely dispersed CaO is characterized by intensive moisture uptake at the early stage of the experiment and a smooth, monotonic approach to a level of about 32% after 90 days. For calcium oxide with fraction sizes of 200 and 320 μm, the moisture uptake curve changes to an S-shaped form with a long shallow initial section

and delayed acceleration; the acceleration point coincides in time with the appearance of cracks and local damage to the granule surface, indicating an abrupt change in mass-transfer conditions and an increase in the accessible contact area between the mineral phase and water vapor.

**Practical value.** The obtained results confirm the suitability of LLDPE/CaO-based composites as absorbers of atmospheric moisture with a more prolonged operating mode compared to silica gel, and show that combining control of the composite granule size with control of the CaO particle size distribution provides a practical tool for tailoring moisture uptake kinetics to specific application conditions.

**Keywords:** LLDPE; CaO; silica gel; highly filled composites; moisture absorption; moisture uptake kinetics; particle size distribution.