

УДК 66.074.5:551.588.74

За допомогою методології оцінювання життєвого циклу проведено порівняльний аналіз екологічного впливу процесів уловлення діоксиду вуглецю із викидів теплових електростанцій методами мінерального уловлення та шляхом його уловлення морською водою. Визначено пріоритетні шляхи оптимізації цих процесів з точки зору екологічної безпеки

Ключові слова: оцінка життєвого циклу, діоксид вуглецю, мінеральне уловлення, уловлення морською водою

С помощью методологии оценки жизненного цикла проведен сравнительный анализ экологического влияния процессов улавливания диоксида углерода из выбросов тепловых электростанций методами минерального улавливания и путем его улавливания морской водой. Определены приоритетные пути оптимизации этих процессов с точки зрения экологической безопасности.

Ключевые слова: оценка жизненного цикла, диоксид углерода, минеральное улавливание, улавливание морской водой

ОЦІНКА ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ ПРОЦЕСІВ УЛОВЛЕННЯ ДІОКСИДУ ВУГЛЕЦЮ

Х.О. Дерейко

Кандидат технічних наук, доцент
Кафедра прикладної екології та збалансованого природокористування
Національний Університет «Львівська політехніка»
вул. С. Бандери, 12, м. Львів, Україна, 79013
Контактний тел.: 067-722-83-57
E-mail: dereykokhrystyna@gmail.com

1. Вступ

З метою глобального зниження викидів парникових газів процеси уловлення та фіксації діоксиду вуглецю з метою його переведення у стійкі карбонатні сполуки сьогодні широко розглядаються та обговорюються науковцями та промисловцями всього світу. Загальновідомим є те, що кліматичні зміни є викликані головним чином за рахунок спалювання викопних паливних ресурсів для забезпечення енергетичних потреб людства. Тому для країн, у яких спалювання вугілля є пріоритетним способом виробництва електроенергії, а це зокрема Австралія, США, Фінляндія, проблема зниження викидів діоксиду вуглецю набуває все більшої актуальності [1,2,3].

Центр Пріоритетних Досліджень в енергетиці Університету м. Ньюкасл (Австралія) ставить собі за мету відігравати керівну роль у мінімізації парникових газів шляхом створення нових та інноваційних технологій, а також їх комерційного поширення. Основні науково-дослідницькі інтереси центру зосереджені на уловленні парникових газів, розробці чистих енергетичних виробництв відповідно до концепції сталого розвитку. Дослідницька програма діяльності цього Центру на тему зниження викидів спалювання вугілля орієнтована головним чином на вивчення зниження викидів газів парникового ефекту на основі технологій уловлення вуглецю (окислення, уловлення викидів після спалювання, газифікація, хімічне перетворення). Базуючись на основі даних діючих теплових електростанцій в Австралії, дослідження включають вивчення механізму спалювання та газифікації вугілля у турбулентних потоках, викидів та впливу уловлення

вуглецю. Програма включає також випробовування технологій та результатів досліджень як в Австралії, так і на міжнародному рівні.

Австралія є однією з країн, де зосереджені значні поклади вугілля, а тому основним способом енергозабезпечення у цій країні є спалювання вугілля на теплових електростанціях. Отже, проблеми зниження концентрацій діоксиду вуглецю в світлі Кіотського протоколу для Австралії є особливо актуальними. Останніми роками багаточисленні проекти, наукові дослідження і дискусії були проведені з метою зниження кількості атмосферних викидів CO₂.

Протягом останнього десятиліття дослідження методу мінералізації CO₂ (або мінеральної карбонізації) набувають стрімкого розвитку і запропоновані різні шляхи цього процесу у різних дослідницьких та академічних установах у світовому масштабі. Цей метод є прийнятним для Австралії (так само як і для США, Фінляндії), оскільки там зосереджені великі поклади силікатних мінералів, зокрема серпентиніту. У австралійських штатах Новий Південний Уельс та Квінсленд великі пластові поклади серпентиніту є розміщені недалеко від існуючих джерел викидів CO₂. У Новому Південному Уельсі одне з трьох таких родовищ є Великий пояс серпентиніту (Great Serpentine Belt). Досліджено, що об'єм цього родовища глибиною у 500 метрів є достатнім для уловлення викидів всіх стаціонарних джерел Нового Південного Уельсу на протязі 300 років [1].

На сьогодні процес мінералізації CO₂ залишається достатньо дорогим та енергоємним методом, але переваги його в тому, що він може використовуватися для

акумуляції та зберігання великої кількості CO_2 в інертній формі та без ризику його витікання.

На протязі останнього десятиліття розвиток різних методів для уловлення та фіксації вуглецю став причиною написання багатьох патентних винаходів щодо нових концепцій реалізації та впровадження цих методів. В зв'язку з енергетичними, економічними та сировинними вимогами на різних стадіях процесів уловлення та фіксації вуглецю викиди парникових газів, цінові та енергетичні затрати повинні бути оцінені з точки зору методології оцінки життєвого циклу (Life Cycle Assessment - LCA).

Отже, для даних досліджень методологія LCA застосовується для порівняння різних методів уловлення та фіксації CO_2 .

2. Аналіз досліджень та публікацій щодо уловлення та фіксації вуглецю

Наявність технологій уловлення та фіксації CO_2 може служити шляхом до зменшення глобальних кліматичних змін. З метою уникнення майбутнього глобального потепління викиди CO_2 можуть бути уловлені на виході з теплових електростанцій і потім зафіксовані у певній стабільній формі.

Для уловлення CO_2 (відділення його із суміші відхідних газів після спалювання вугілля на теплових електростанціях) найбільш поширеними є наступні методи: хімічна абсорбція, мембранне розділення, кріогенний метод та адсорбція при коливанні тиску. Метод хімічної абсорбції з використанням розчинників є найбільш визнаним методом. У цьому методі CO_2 з відхідних газів реагує з хімічним розчинником з утворенням сполуки, яка потім розпадається при застосуванні теплоти в процесі регенерації. Типовими розчинниками є моноетаноламін, диетаноламін та карбонат калію.

Після вилучення CO_2 з газової суміші він повинен бути збережений та стабільно зафіксований у такій формі, щоб попередити його наступний витік до атмосфери. Один із таких способів – це закачування та зберігання CO_2 в океанічних глибинах. Інший спосіб – це геологічне зберігання, при якому CO_2 вводять у підземні резервуари (наприклад, глибокі вугільні поклади, які не мають промислового застосування; сольові водоносні пласти; вичерпані газові та нафтові резервуари), де він може бути ізольований від атмосфери на декілька сотень років.

Літературний огляд показує, що багато дослідників висувають можливість уловлення CO_2 морською водою активованою лужним розчином гідроксиду натрію, який в свою чергу продукують електролітичним шляхом. Недавно американська корпорація Calera запатентувала декілька методів фіксації CO_2 лужними природними водами, використовуючи при цьому електролітичні комірки низької електричної напруги для продукування NaOH , який є середовищем для створення лужного рН [4,5,6,7]. Методи включають уловлення CO_2 та осадження його у формі стабільного продукту із лужних металовмісних вод, наступне розміщення продукту для безпечного захоронення чи його використання для виробничих процесів.

Альтернативний метод уловлення і зберігання CO_2 – це так зване мінеральне уловлення, при якому CO_2 є хімічно зв'язаний у твердій карбонатній кам'яній породі [8,12]. Цей метод імітує природний процес вивітрювання гірських порід, який як відомо відіграв важливу роль в історичному зниженні концентрації CO_2 в атмосфері після виникнення землі. Головна перевага процесу полягає в тому, що утворені при цьому мінеральні карбонати є кінцевими продуктами геологічних процесів і відомі своєю стабільністю на протязі довгих геологічних періодів (мільйонів років). Мінеральне уловлення CO_2 є новою концепцією і недостатньо дослідженою у порівнянні з іншими способами фіксації CO_2 . Крім деяких лабораторних та експериментальних досліджень, здійснених науковими групами в Албані Дослідницькому Центрі (США) [2,3], Університеті в Або-Турку (Фінляндія), на даний час немає діючої промислової установки, дія якої була б основана на методі мінерального уловлення CO_2 . Для просування вперед у впровадженні установки цього типу комерційного масштабу детальне дослідження процесу було б доцільним з питань екологічних переваг процесу щодо потенціалу фіксації CO_2 , так само і властивих вторинних забруднень, спричинених самим процесом.

Найбільш вагомими дослідженнями з питань оцінки життєвого циклу процесів вилучення та фіксації CO_2 проводяться в Або Академі Університеті (ААУ), департамент Термальної Інженерії та Інженерії потоків (м. Або-Турку, Фінляндія) під керівництвом проф. Рона Жевенговена [2,8,13]. Досліджено енергетичний та екологічний вплив уловлення CO_2 з теплових електростанцій з використанням магнезіо-силікатних гірських порід. Проведено оцінку життєвого циклу методу мінералізації CO_2 , розробленому в Або Академі Університеті (Фінляндія), і проведено порівняння результатів цього аналізу з процесом, розробленим у Національній лабораторії енерготехнології Департаменту енергії США (NETL) (Албані, штат Орегон) [2]. Процес поглинання CO_2 , розроблений у ААУ, є багатостадійним, при цьому спочатку відбувається утворення гідроксиду магнію $\text{Mg}(\text{OH})_2$ з силікату магнію. Потім $\text{Mg}(\text{OH})_2$ реагує з CO_2 в реакторі зрідженого шару за умов високої температури та тиску, при цьому утворюється чистий, стабільний та екологічно безпечний MgCO_3 . Досліджені пріоритетні напрямки та можливості зниження екологічних потреб та екологічних впливів, пов'язаних із мінералізацією CO_2 , при цьому для інвентаризаційного аналізу при оцінці життєвого циклу застосовувався ексергетичний аналіз.

Також, дослідження у даному напрямку проводилися в Національному Університеті (Департамент Хімічної та Біомолекулярної інженерії) в Сінгапурі та Інституті Хімічних та інженерних наук (Сінгапур) [9,10,13]. У цих дослідженнях методологія оцінки життєвого циклу була застосована для кількісної оцінки екологічного впливу уловлення CO_2 мінеральними породами. П'ять альтернативних процесів мінеральної фіксації порівнюються у поєднанні з різними технологіями уловлення CO_2 (хімічна абсорбція, мембранне розділення, кріогенний метод, абсорбція при коливанні тиску). Для порівняння результатів з іншими можливими варіантами було проведено оцінку екологічного впливу та аналіз чутливості із використанням методу Еко-індикатор 99 у програмі SimaPro.

Оцінка життєвого циклу процесів мінеральної карбонізації в Сінгапурі також враховувала такі можливі опції, при яких кінцеві продукти можуть потенційно використовуватися у будівельній промисловості та як матеріали для рекультивації ландшафтів.

За допомогою оцінки життєвого циклу досліджувалися та порівнювалися різні технології фіксації CO₂ шляхом інжекції в глибини океану та технології фіксації у різних геологічних формуваннях (підземних резервуарах).

Ніяких бібліографічних даних по оцінці життєвого циклу методу поглинання та фіксації CO₂ морською водою не знайдено.

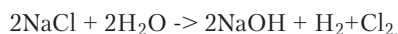
3. Постановка завдання

Метою роботи є порівняння процесів уловлення діоксиду вуглецю морською водою та мінеральної карбонізації, які активно пропагуються на сьогоднішній час. Власне з цією метою є доцільним застосування методології оцінки життєвого циклу і дослідження можливих способів мінімізації екологічного впливу CO₂ та оптимізації вищенаведених процесів.

4. Методологія досліджень, результати та їх обговорення

Для моделювання установки уловлення діоксиду вуглецю морською водою було використано HYSYS OLI інтерфейс, який оснований на програмі OLI (створеній компанією OLI Systems (Нью Джерсі, США) і забезпечує користувачів з теоретичними рамками, базами даних, за допомогою яких можна точно і зрозуміло прогнозувати електролітичні системи.

Відповідно до даних патентної інформації американської фірми Calera [4,5,6] для створення лужного середовища у технології уловлення CO₂ морською водою використовується хлор-лужний електрохімічний метод продукування NaOH, в основі якого лежить такий процес:

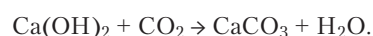
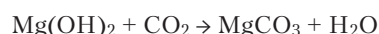
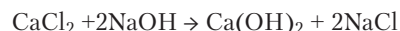
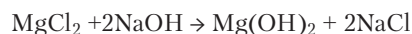
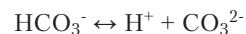


При цьому за рахунок електролізу соляного розчину NaCl утворюються NaOH, хлор та водень.

Схема процесу конверсії CO₂ у мінеральні карбонати фірми Calera зображена на рис.1.

Основні технології, які використовуються для хлор-лужного виробництва, застосовують діафрагмові, ртутні та мембранні електролітичні комірки. Мембранний процес має екологічні переваги у порівнянні із двома старими процесами (діафрагмовим та ртутним), так як у цьому процесі не використовуються азбест та ртуть і він є найбільш енергоефективним.

Процес уловлення CO₂ морською водою за наявності NaOH в загальному може бути описаний наступними хімічними реакціями [11]:



pH визначає, які етапи домінують у послідовності реакцій і відповідно пропорції вуглецевих сполук. При низькому значенні pH (~4) домінує утворення H₂CO₃, при середньому pH (~6) домінуючими є HCO₃⁻, а при високому pH (~9) домінуючими є CO₃²⁻ іони.

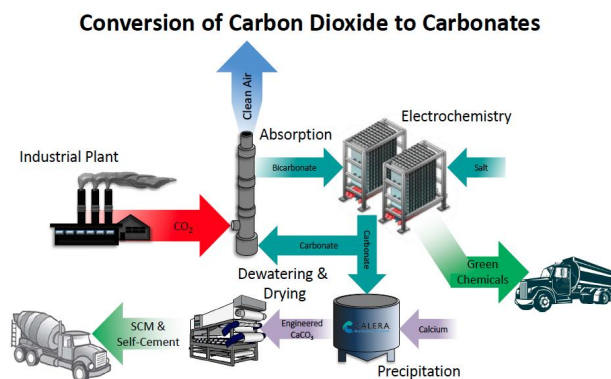


Рис. 1 Процес конверсії CO₂ у карбонати, запатентований фірмою Calera

За допомогою OLI Analyzer Studio 3.2 на основі термодинамічних властивостей системи поглинання діоксиду вуглецю морською водою були змодельовані та прогнозовані фізичні та хімічні властивості цієї системи.

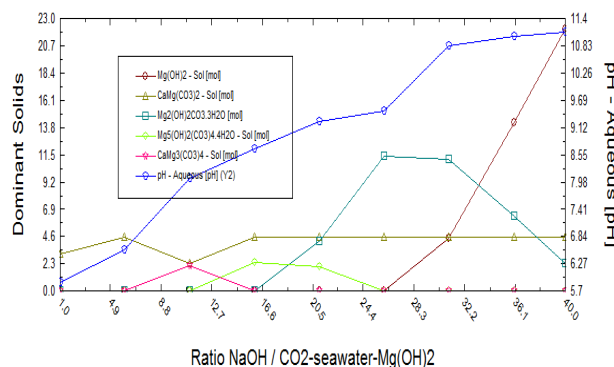


Рис. 2. Домінуючі тверді сполуки, які утворюються при поглинанні CO₂ морською водою (залежності від pH розчину та співвідношення між реагентами)

Відповідно до розрахунків, проведених за допомогою програми OLI, із додаванням NaOH до розчину CO_2 / морська вода / $\text{Mg}(\text{OH})_2$ наступні домінуючі сполуки з'являються в осаді: $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ (доломіт), $\text{Mg}_2(\text{OH})_2\text{CO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ (артініт), $\text{Mg}_5(\text{OH})_2(\text{CO}_3)_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ (гідромагnezит) і $\text{CaMg}_3(\text{CO}_3)_4$ (при pH в межах 6.8-9). Ці сполуки спостерігаються доти, поки значення pH розчину не досягне 9.4. Наступне додавання NaOH (pH між 9.4 і 11.1) веде до появи і зростання кількості $\text{Mg}(\text{OH})_2$ в осаді (що є небажаним і повинно уникатися).

Після досягнення pH 9.4, газова суміш CO_2 знову барботується через розчин до досягнення pH 8.5. Цей процес супроводжується зменшенням кількості в осаді $\text{Mg}_2(\text{OH})_2\text{CO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ (артініт) і $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ (доломіт), появи $\text{Mg}_5(\text{OH})_2(\text{CO}_3)_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ (гідромагnezит) та $\text{CaMg}_3(\text{CO}_3)_4$.

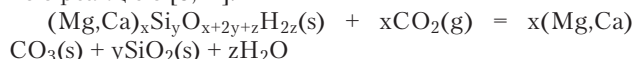
Криві кількостей домінуючих твердих сполук, які утворюються при поглинанні CO_2 морською водою, в залежності від pH розчину та співвідношення між реагентами, отримані на основі розрахунків в OLI Analyzer Studio 3.2, зображені на рис.2.

Національна лабораторія енерготехнологій Департаменту енергії США (NETL), яка знаходиться в Албані (штат Орегон) займається вивченням процесу мінеральної карбонізації як потенційної можливості для уловлення та фіксації CO_2 [3]. Дослідження цього Дослідницького Центру в Албані зосереджені на реакції Ca, Fe та Mg-силікатних мінералів з газовим CO_2 з утворенням геологічно стабільних природних твердих карбонатних мінералів. Дослідження цього центру включають оцінку природних мінералів, кінетику процесів, розробку технологічного впровадження та економічну оцінку.

Особливо придатними для фіксації CO_2 є вулканічні гірські породи, які є вільні від карбонатів.

Для процесу карбонізації придатними є мінерали лужних та лужноземельних металів. Серед них найбільше застосування мають серпентин, олівін (Mg-вмісні мінерали) та волластоніт (Ca-вмісний). Серпентин може бути у формі антигориту, лїзардиту та хризотилу.

В загальному силікати реагують з CO_2 за наступною реакцією [8,12]:



При кімнатній температурі та тиску реакція карбонізації із газовим CO_2 протікає дуже повільно. Підвищення температури збільшує швидкість реакції. Значення підвищеної температури, при якій карбонізація протікає самовільно, залежить від тиску CO_2 та типу мінералу.

У літературі [8,12] описані різні шляхи процесу мінеральної фіксації CO_2 . Більшість з них є комбінацією процесу попередньої обробки та самого процесу фіксації CO_2 у мінералі. Виділяють головним чином два шляхи процесу мінеральної карбонізації:

1. Прямий процес, при якому мінерал карбонізується одностадійно.
2. Непрямий процес, при якому реагуючі компоненти спочатку екстрагуються з мінеральної матриці, а при наступній стадії відбувається карбонізація.

Найпростішим є прямий процес карбонізації, при якому серпентин або Ca/Mg-вмісний твердий відход

карбонізується в одній стадії. Швидкості реакції такого процесу є надто низькі і процес має недоліки через термодинамічні обмеження.

При прямому процесі водної карбонізації екстрагування металів з мінеральної сировини і їх наступна реакція з розчиненим діоксидом вуглецю з утворенням карбонатів відбувається в одному реакторі.

Серпентин містить 13 % хімічно зв'язаної води. За рахунок нагрівання серпентину до 600-650 °C вода вилучається і створюється вільна структура. Швидкість реакції також може бути збільшена за рахунок зменшення розміру частинок і збільшення таким чином площі поверхні. Також для пришвидшення реакції використовують суміш бікарбонату та хлориду натрію.

Процес прямої водної мінеральної карбонізації, розроблений Національною лабораторією енерготехнологій Департаменту енергії США (NETL) (Албані, штат Орегон), вважається сьогодні найбільш передовим і сучасним [3].

Автором даної статті осадження різних форм карбонатів магнезії досліджувалося із використанням програми OLI Analyzer при температурах між 25 і 120 °C та парціальному тиску CO_2 між 1 та 100 бар. При 25 °C і $P_{\text{CO}_2} = 1$ бар осідає тільки гідратований карбонат несквегоніт ($\text{MgCO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$). При 120 °C і $P_{\text{CO}_2} = 3$ бар утворюється гідромагnezит ($\text{MgCO}_3 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$), який пізніше може окислюватися до магнезиту (MgCO_3). При температурі 120 °C і $P_{\text{CO}_2} = 100$ бар відбувається пряме утворення магнезиту, а при умовах насичення відбувається співосадження магнезиту та гідромагнезиту.

Моделювання, проведені з використанням програми OLI Analyzer, лише підтверджують, що термодинамічно в процесі прямої водної карбонізації відбувається утворення різних форм карбонатів, але не дає ніякого уявлення про кінетичні закономірності процесу. Реально процес є дуже повільний, тому для його промислового впровадження є необхідним забезпечення ряду умов для зростання швидкості реакції.

За допомогою програми Aspen HYSYS було спроектовано технологічні установки для процесів уловлення та фіксації діоксиду вуглецю морською водою та прямої водної карбонізації, а також розраховані умови реалізації процесів та властивості всіх вхідних та вихідних потоків.

Оцінка життєвого циклу методів уловлення CO_2 морською водою та процесів мінеральної карбонізації здійснена за допомогою комп'ютерної програми Sima Pro 7.3.2 (Pré Consultants, The Netherlands) відповідно до вимог міжнародного стандарту по оцінюванню життєвого циклу ISO 14040.

- Визначення мети та границь дослідження

Метою даного дослідження є оцінка екологічного впливу та порівняння методів уловлення CO_2 морською водою та процесу мінеральної карбонізації. Функцією даної системи є фіксація CO_2 у стабільній формі. Функціональною одиницею для даного дослідження вибрано 1 тону CO_2 , зафіксовану у стабільній формі (у вигляді карбонатів та рідких викидів).

Границі дослідження включають наступні процеси, які входили до аналізу:

- а) Процес мінерального уловлення CO_2 (включаючи видобування серпентиніту, його подрібнення,

розмелювання, етап теплової попередньої обробки для активації мінералу, нагрівання реагентів);

б) Процес уловлення CO_2 морською водою;

с) Хлор-лужний процес виробництва NaOH із застосуванням мембранної комірки.

- Інвентаризаційний аналіз

Вихідними даними для інвентаризаційного аналізу досліджуваних процесів уловлення CO_2 стали результати, отримані шляхом моделювання та проведених розрахунків в OLI Analyzer Studio 3.2 та Aspen HYSYS, а також дані NETL, США [2,3] для процесу мінерального уловлення CO_2 .

- Оцінка впливу

Оцінка впливу на навколишнє середовище процесу мінерального уловлення CO_2 :

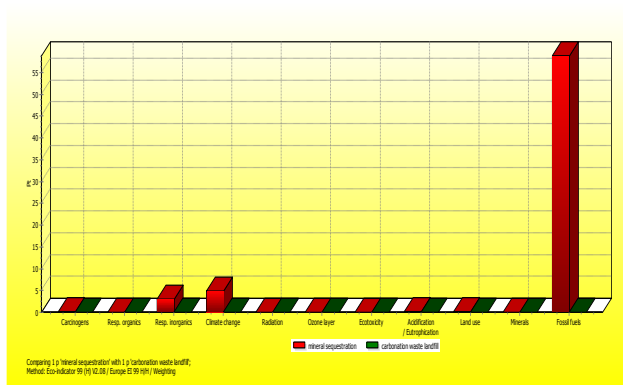


Рис. 3. Зважування екологічних впливів процесу мінерального уловлення CO_2 із врахуванням захоронення відходів карбонізації

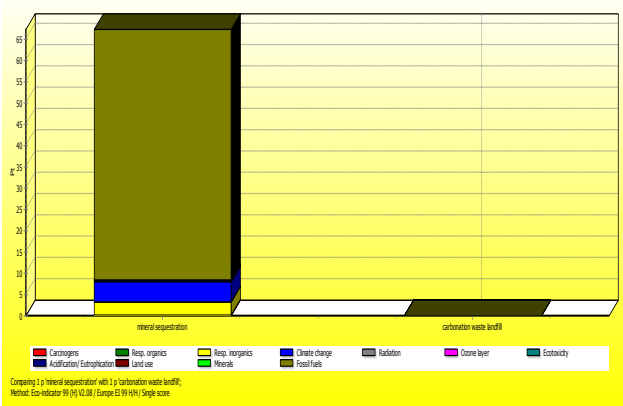


Рис.4. Єдиний рахунок екологічних впливів процесу мінерального уловлення CO_2 із врахуванням захоронення відходів карбонізації

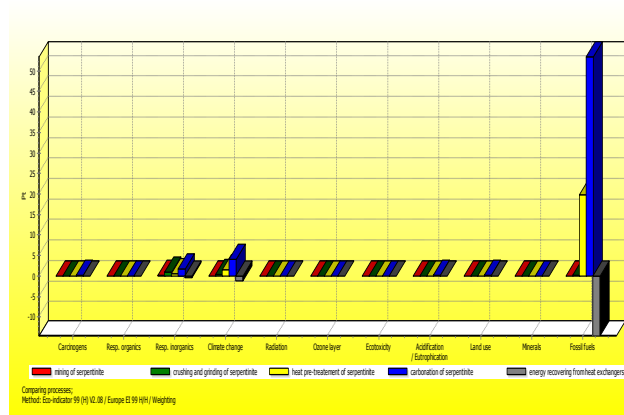


Рис. 5. Зважування екологічних впливів процесу мінерального уловлення CO_2 (аналіз окремих етапів процесу карбонізації)

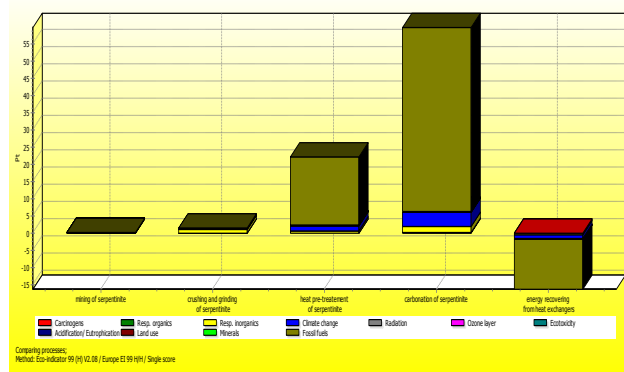


Рис. 6. Єдиний рахунок екологічних впливів процесу мінерального уловлення CO_2 (аналіз окремих етапів процесу карбонізації)

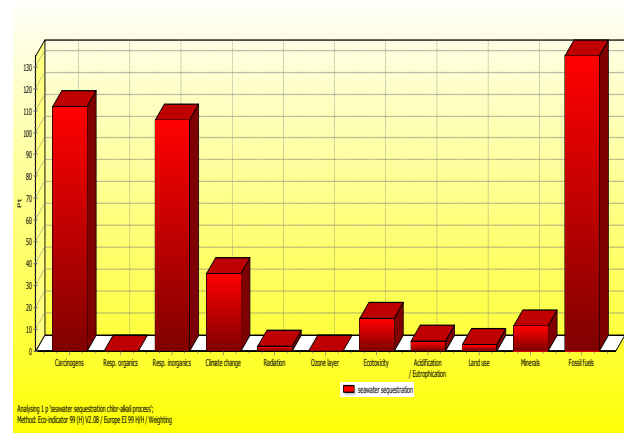


Рис.7. Зважування екологічних впливів процесу уловлення CO_2 морською водою

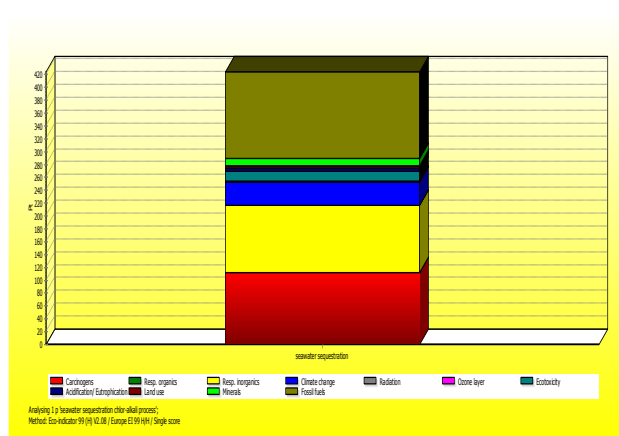


Рис.8. Єдиний рахунок екологічних впливів процесу уловлення CO_2 морською водою

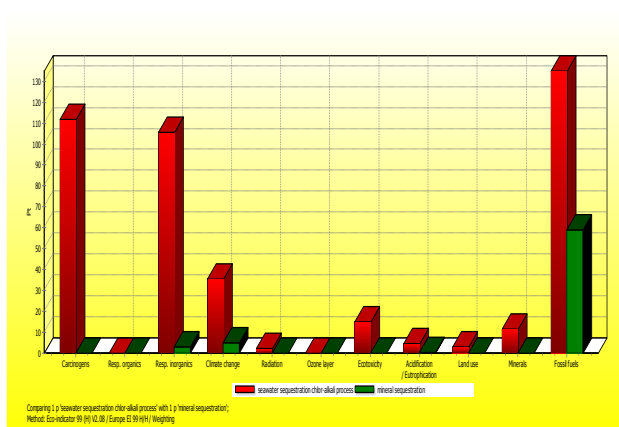


Рис. 9. Порівняння екологічних впливів процесів мінерального уловлення CO_2 та уловлення морською водою (етап зважування впливів)

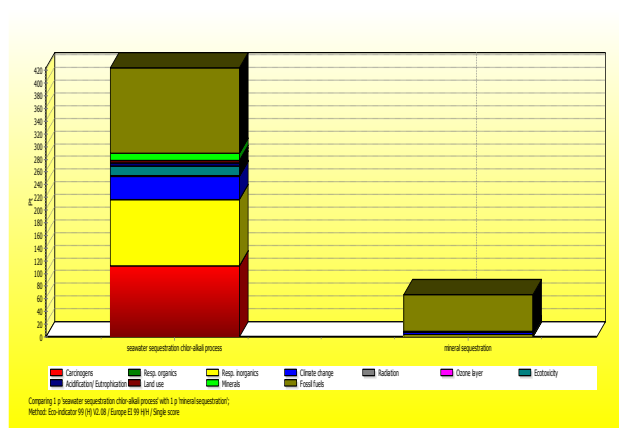


Рис. 10. Порівняння єдиних рахунків екологічних впливів процесів мінерального уловлення CO_2 та уловлення морською водою

5. Інтерпретація результатів та висновки

Згідно до проведеної оцінки екологічного впливу та поданих вище рисунків, процес мінерального уловлення CO_2 є екологічно набагато більш сприятливим (рис. 9, 10). Його загальний вплив на навколишнє се-

редовище приблизно у 7 разів менший, ніж вплив процесу уловлення CO_2 морською водою.

Етап захоронення кінцевих відходів карбонізації має незначний вплив на навколишнє середовище у порівнянні з самим процесом мінералізації (рис. 3,4). Найбільш вагомим впливом на навколишнє середовище процесу карбонізації є використання викопного палива, набагато менш суттєвими є вплив на кліматичні зміни та респіраторні впливи неорганічних речовин. З погляду аналізу окремих стадій реалізації процесу мінералізації CO_2 етап карбонізації серпентину є найбільш суттєвим, попередня теплова обробка має менш значущий вплив на навколишнє середовище. Значна частина енергії, рекуперована у теплообмінниках, представляє «бонус» для навколишнього середовища (рис. 5,6).

Процес уловлення CO_2 морською водою є причиною виникнення таких суттєвих впливів на навколишнє середовище, як виснаження викопного палива, канцерогенні впливи, респіраторні впливи неорганічних речовин, кліматичні зміни, у меншій мірі екотоксичність, використання мінералів, закислення/евтрофікація, використання ландшафтів та радіаційні впливи (рис. 7). Найбільш суттєвий екологічний вплив при уловленні CO_2 морською водою є викликаний споживанням NaOH для створення лужного середовища, який в свою чергу продукують шляхом хлор-лужного процес із застосуванням мембранної комірки.

Оскільки дані процеси спрямовані на уловлення CO_2 і таким чином зниження глобального потепління, то потрібно зауважити, що процес уловлення морською водою провокує набагато більш суттєвий вплив на кліматичні зміни у порівнянні з мінеральною карбонізацією. Зниження цього впливу можливе лише за рахунок заміни NaOH іншими субстанціями лужного характеру, процес виробництва яких не буде настільки енергоємним, тобто не включатиме таких значних затрат енергії, які потребує реалізація процесу електролізу в електролітичних комірках.

За допомогою оцінки життєвого циклу обох варіантів уловлення CO_2 ідентифіковано, що енергозатрати є найбільш суттєвою причиною кліматичних змін для обох процесів. Тому оптимізація енергоефективності є критичним питанням підвищення потенціалу уловлення та фіксації CO_2 .

Процес мінералізації CO_2 є на сьогодні теж дуже енергоємним, а тому для того, щоб цей процес був економічно конкурентоздатним у порівнянні з традиційними системами уловлення та фіксації CO_2 , необхідне зниження енергозатрат через проведення майбутніх наукових досліджень, додаткову розробку та удосконалення процесу.

Література

- Geoffrey F. Brent, Daniel J. Allen, Brent R. Eichler, James G. Petrie, Jason P. Mann and Brian S. Haynes. Mineral carbonation as the core of an industrial symbiosis for energy-intensive minerals conversion. Journal of industrial ecology, 2011, available at: www.wileyonlinelibrary.com/journal/jie.

2. Experience Nduagu, Joule Bergerson, Ron Zevenhoven. Life cycle assessment of CO₂ sequestration in magnesium silicate rock – A comparative study. *Energy Conversion and Management*, 2012, Vol. 55, pp. 116-126.
3. Stephen J. Gerdemann, William K. O'Connor, David C. Dahlin, Larry R. Penner and Hank Rush. Ex Situ Aqueous Mineral Carbonation. *Environmental Science & Technology*, 2007, Vol. 41 (7), pp. 2587-2593.
4. Constantz et al. Methods of sequestering CO₂. United States Patent. Patent №: US 7,887,694 B2 Date of Patent: Feb. 15, 2011.
5. Giliam et al. Electrochemical production of an alkaline solution using CO₂. United States Patent. Patent №: US 7,993,511 B2 Date of Patent: Aug. 9, 2011
6. Giliam et al. Low energy 4-cell electrochemical system with carbon dioxide gas. Patent №: US 7,875,163 B2 Date of Patent: Jan. 25, 2011.
7. Removing carbon dioxide from waste streams through co-generation of carbonate and/or bicarbonate minerals. Applicant and inventor: Jones Joe David [US/US]; 23 Cicero, Austin, TX 78746 (US). International Publication Date 30 March 2006. International Publication number WO 2006/034339 A1. International Patent Classification: B01D 53/62 (2006.01). International Application Number: PCT/US2005/033814.
8. Johan Sipila, Sebastian Teir, Ron Zevenhoven. Carbon dioxide sequestration by mineral carbonation. Literature review update 2005-2007. Report VT 2008-1. [Online]. Åbo Akademi University, Heat Engineering Laboratory, Turku, Finland (2008). Available at: <http://web.abo.fi/~rzevenho/MineralCarbonationLiteratureReview05-07.pdf>.
9. Hsien H. Khoo and Reginald B. H. Tan. Life Cycle Investigation of CO₂ Recovery and Sequestration. *Environmental Science & Technology*, 2006, Vol. 40, No. 12, pp. 4016-4024.
10. Hsien H. Khoo and Reginald B. H. Tan. Life Cycle Evaluation of CO₂ Recovery and Mineral Sequestration Alternatives. *Environmental Progress*, 2006, Vol. 25, No. 3, pp. 208-217.
11. Wenlonh Wang, Mingqiang Hu, Chunyau Ma. Possibility for CO₂ sequestration using sea water. *Proceedings of the 4th International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering (ICBBE)*, 2012, p. 1-4.
12. W.J.J.Huijgen & R.N.J. Comans. Carbon dioxide sequestration by mineral carbonation. Literature review. Report № ECN-C-03-016. ECN (Energy research centre of the Netherlands), the Netherlands (2003).
13. Hsien H. Khoo, Paul N. Sharratt, Jie Bu, Tze Y. Yeo, Armando Borgna, James G. Highfield, Thomas G. Bjorklof and Ron Zevenhoven. Carbon capture and mineralization in Singapore: preliminary environmental impacts and costs via LCA. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2011, Vol. 50, pp. 11350-11357.

Abstract

The availability of CO₂ fixation technologies would serve as a mean to mitigate global climate change. To avoid further global warming, CO₂ can be captured from these coal fired power plants and subsequently stored. Over the past decade CO₂ mineralization (or mineral carbonation) research has evolved resulting in different mineralization routes being proposed. Several scientists proposed a method related to application of sea water alkaline solution as a possible way to store huge amount of CO₂. Within this study, using the methodology of life cycle assessment according to the standard ISO 14040, a comparative analysis has been carried out with reference to environmental impacts of carbon dioxide sequestration processes issued from thermal power plants emissions by the methods of mineral sequestration and seawater sequestration. The environmental impact analysis of these sequestration processes has been realized using the SimaPro 7.3.2 software. The priority ways for optimization of these processes in terms of environmental safety have been determined. There has been identified that energy inputs are the most significant causes of climate change for both processes. Therefore, optimization of energy efficiency is a crucial problem in the enhancement of CO₂ of capture and fixation potential.

Keywords: *life cycle assessment, carbon dioxide, mineral sequestration, seawater sequestration.*