

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кафедра екології

«Допускається до захисту»

Завідувач кафедри, д-р мед. наук

_____ А. М.Бондаренко

«__» _____ 2022 р.

**Дослідження та оцінка впливу на екосистеми застосування
RDF (паливо з відходів) і SRF (тверде відновлене паливо)
палива при їх промисловому використанні в
металургійному виробництві**

Магістрант:

гр.ЗЕО-21м , Соколов О.В.

Керівник:

докт. мед. наук, професор

Бондаренко А.М.

Кривий Ріг

2022

ЗМІСТ

Вступ.....	3
Розділ 1. Тенденції використання твердого відновленого палива у світі.....	6
1.1. Підгрунття та термінологія.....	6
1.2. Походження, процеси виробництва та специфічні вимоги ринку RDF і SRF.....	12
1.3. Стан виробництва та споживання SRF у країнах світу	
Розділ 2. Вплив використання твердого відновленого палива на потенціал глобального потепління, при використанні для виробництва цементу. Розробка системи управління відходами	
2.1. Умови виконання досліджень	
2.2. Дослідження сценаріїв використання різної кількості SRF	
2.3. Методика розрахунку основних параметричних показників	
2.4. Оцінка GWP у реалізованих сценаріях застосування SRF	
ВИСНОВКИ	

ВСТУП

Оскільки населення світу продовжує зростати, кількість утворених відходів також зростає. Одним із способів утилізації цього постійно зростаючого обсягу твердих побутових відходів є перетворення їх на альтернативне джерело палива для виробництва тепла та електроенергії – тверде відновлене паливо.

Зокрема, управління енергетичної інформації США (EIA) стверджує, що спалювання твердих побутових відходів зменшує кількість відходів до 87%. Паливо, отримане з відходів, поступово стає популярним і життєздатним варіантом для заміни викопного палива. Цей тип палива поділяється на дві основні категорії: тверде відновлене паливо (Solid Recovered Fuels – SRF) і паливо з відходів (Refuse Derived Fuels – RDF).

Що таке тверде відновлене паливо? SRF – це паливо, яке виробляється шляхом сушіння, фільтрації та подрібнення твердих відходів. Тверде відновлене паливо зазвичай складається з горючих компонентів, отриманих із твердих побутових відходів. SRF може бути отримане з харчових і кухонних відходів, паперу, зелених відходів, пластикових пляшок, іграшок, тканин і композитних відходів.

SRF зазвичай виробляється відповідно до європейських стандартів. Документ EN 15359 містить специфікації для класифікації SRF. Також можливо отримати інші технічні відомості з Технічного звіту (CEN/TR 15508).

Як правило, завод з утилізації твердого палива розташовується поблизу джерела твердих побутових відходів. Більшість похідного палива використовується компаніями, розташованими поблизу переробного підприємства. Це зменшує транспортні витрати та викиди вуглецю, пов'язані з транспортом.

SRF, вироблений утилізаційними підприємствами, найбільш широке використання знайшов для виробництва тепла в цементному виробництві при завантаженні у печі. SRF забезпечує ефективний спосіб досягнення ініціатив «від нуля до звалища», що спрямовані на комплексне перероблення відходів. Виробники цементу можуть навіть використовувати золу, що утворюється при спалюванні палива, для заміни природних заповнювачів у процесі виробництва цементу.

Відмінності між SRF і RDF. Основна відмінність між SRF і RDF полягає в тому, що SRF виробляється відповідно до стандартів якості та критеріїв, встановлених регуляторними органами. З іншого боку, RDF зазвичай є продуктом операцій подрібнення, фільтрування або сортування неочищених відходів.

Компанії, що виробляють SRF, вживають заходів контролю якості під час виробничого процесу, щоб гарантувати, що паливо відповідає необхідним специфікаціям. RDF є неспецифікованими відходами палива, тому його склад і якість не можуть бути гарантовані. Перш ніж міські відходи можна буде використовувати для виробництва RDF, цінні матеріали, які можна переробити, такі як метал, скло, деревина та папір, повинні бути вилучені для переробки.

Переваги твердого відновленого палива. Використання твердого відновленого палива замість вугілля чи коксу допомагає зменшити викиди вуглецю та зберегти природні ресурси Землі. Цей вид палива може допомогти виробникам цементу досягти своїх цілей сталого розвитку, замінивши більше половини викопного палива. SRF – це екологічно чисте паливо, яке зводить до мінімуму потребу в розробці вугільних родовищ.

Переваги для бізнесу та навколишнього середовища включають:

- Менша залежність від обмеженого викопного палива, яке має вищу вартість одиниці;
- Зменшення вуглецевого сліду та викидів парникових газів;
- Постійна поставка якісного палива за відносно стабільною ціною;

- Зменшення потреби у «брудному» паливі, зокрема вугіллі.

Метою дослідження є визначення зміни впливу на навколишнє середовище при заміні традиційного палива на SRF у процесі виробництва цементу, а також перенаправленні комерційних і промислових відходів (KIB) з інсинераторів і звалищ на цементні заводи.

Завдання роботи:

1. Дослідити принципові відмінності щодо складу та способів отримання SRF і RDF палива;
2. Визначити стан виробництва та споживання SRF і RDF у провідних країнах світу;
3. Виявити основні ланки промислового виробництва, де можна використати відновлене тверде паливо;
4. Проаналізувати екологічну безпечність використання палива з відходів та твердого відновленого палива порівняно з традиційними енергоносіями.

Розділ 1

Тенденції використання твердого відновленого палива у світі

1.1. Підгрунття та термінологія.

Ще у 1990-х роках виробництво вторинного палива стало досить популярним способом поводження з відходами у різних країнах у відповідь на зростаючий ринковий попит. SRF є підмножиною більшого сімейства Refuse Derived Fuels (RDF), виробленого з потоків нешкідливих відходів, що відрізняється від «загального» RDF через те, що це паливо, яке відповідає вимогам (тобто класифікація та специфікація), визначеним національними або міжнародним стандартами.

Іншими словами, SRF є регульованим, а RDF (загалом) нерегульованим вторинним паливом. А додатковим припущенням є те, що для виробництва SRF для ефективної підготовки до повторного використання слід використовувати переробку матеріалів. Додаткова цінність SRF полягає в тому, що: воно добре характеризується та відоме своїми позитивними екологічними властивостями, технічними та екологічними потребами, пов'язаними з спеціальним використанням для відновлення енергії; це дійсно може бути пріоритетним для переробки відходів, що базується на технологіях обробки, доступних на даний момент для його виробництва. Відповідність стандартам не перешкоджає тому, що подальша відповідність SRF іншим або більш суворим вимогам до якості та властивостей палива може бути добровільно задана кінцевими споживачами палива (наприклад, для цементних печей, електростанцій, установок газифікації) через приватне зобов'язання (специфікацію) з виробником, щоб отримати паливо, яке добре відповідає їхнім власним економічним/технологічним потребам.

SRF виробляються з окремих або змішаних потоків муніципальних (ТПВ), комерційних (CW), промислових (IW) відходів, будівельного сміття

та знесення будівель (CDW). Ці потоки включають різні частки розмірних фракцій відходів, а також показують різний елементний склад. Різні виробники застосовують різноманітні ступені обробки, які змінюють властивості вхідних відходів і визначають отриманий вихід палива, що відмінний, як кількісно, так і якісно. Ці обробки часто являють собою певний вид механічної обробки або а механіко-біологічне очищення. Важливо зазначити, що бренди SRF, випущені на ринок (також як і RDF) ніколи не визначають однозначне паливо, властивості його різновидів (наприклад, склад, фізико-хімічні властивості) можуть відрізнятися один від одного. Досягнутий ступінь якості є наслідком походження палива (потік відходів), застосованих до нього виробничих процесів і, звісно, вимогами ринкового попиту (технологічні, економічні та екологічні вимоги кінцевого споживача).

Ринковий попит на SRF включає, в Європі та в інших країнах, підприємства, які належать до системи поводження з відходами (спалювання: від утилізації до відновлення енергії) та енергоємні галузі промисловості (наприклад, цементна промисловість, теплові електростанції), для яких використання вторинного палива як заміникового викопного (наприклад, вугілля, петро-коксу) означає вигоду та меншу залежність від викопного палива, а також і зменшення впливу на навколишнє середовище. Місцеві альтернативні енергетичні системи отримують енергію з відходів (EfW), використовуючи потенціал вторинного палива (наприклад, при спільному спалюванні з іншими видами відходів або залишками), забезпечуючи економічну вигоду (забезпечення власних енергетичних потреб; продаж електроенергії в національну мережу; доступ до економічних пільг). Кількісні показники SRF, виробленого та відправленого до конкретних кінцевих користувачів, наведено нижче для більшості обстежених країн.

Енергоємні промислові сектори, такі як печі для випалювання цементу та вапна або електростанції, що працюють на вугіллі, виділені як головні

очікувані кінцеві користувачі SRF, принаймні в більшості європейських країн.

Такі країни, як Індія та Китай, яким доводиться управляти великою щорічною кількістю відходів, а також задовольнити свій внутрішній попит на енергію, нещодавно почали розвивати домашню попередню розробку систем для порвдження з SRF/RDF. Вони також стали досить послідовним імпортером SRF/RDF з сусідніх країн-виробників. Постійне інтенсивне зростання промисловості спалювання відходів у Китаї, який, здається, зосереджується насамперед на використанні технології киплячого шару (BFB), може зробити його великим кінцевим користувачем SRF.

Транскордонні перевезення SRF та RDF є значними, також у Європі. Як приклад, Сполучене Королівство експортує значні обсяги в такі країни, як Німеччина, Нідерланди та Швеція. Торгівля залежить від різних факторів, крім політики, можливостей переробки відходів і поточного ринку ціни (включно з такими факторами, як податки).

В даний час триває робота в рамках міжнародної організації стандартів (ISO) щодо розробки стандартів на SRF/RDF. Це може бути важливим інструментом для підвищення довіри до SRF як вторинного палива і, таким чином, подолати деякі ринкові бар'єри, викликані відсутністю єдиного найменування і методів визначення якості способом порівняння. У роботу також включені країни де використання SRF/RDF сьогодні досить обмежене.

Ієрархія відходів чітко визнає роль перетворення відходів в енергію та, зокрема, відходів палива вироблених за допомогою процесів, що доповнюють переробку матеріалів; це означає видобуток палива з потоків відходів, які більше не придатні для повторного використання, підготовки до повторного використання або не є ефективними матеріалами для переробки. Тверде відновлене паливо (SRF) відповідатиме цій вимозі та сприятиме очікуваним змінам вихідної сировини для перетворення відходів на енергію (покращення можливості переробки та повторного використання таких відходів, як пластик, деревина, папір і біорозкладані відходи) і сприятиме

створенню найбільш енергоефективної системи перетворення відходів у енергію.

Іншою сферою, де передбачається розвиток використання SRF/RDF, є термохімічна переробка відходів. Цьому приділяється багато уваги, і вважається, що це важливий крок на шляху до більш замкнутої економіки. У цьому випадку SRF може відігравати важливу роль у якості твердої відновленої сировини.

Тверде паливо, яке виробляється шляхом переробки нешкідливих моно або змішаних потоків відходів щоб зробити їх придатною сировиною для відновлення енергії, вважається вторинним видом палива.

Потоки відходів відправляються на альтернативні енергетичні заводи, які виробляють енергію з відходів (EfW) у тому вигляді, в якому вони утворюються (наприклад, необроблені та несортвані відходи).

Тверде відновлене паливо (SRF) зображено на рисунку 1.1 як підмножину великого сімейства RDF, на основі припущення, що вторинне паливо, вироблене з небезпечних потоків відходів, може вважатися SRF або RDF незалежно від того, чи відповідає воно вимогам (тобто класифікації та специфікації), визначеним національним або міжнародним стандартом для SRF. Саме в цьому контексті використовується термін SRF. Це не обов'язково означає, що SRF завжди кращої якості, ніж RDF, але їх якість відома та визначається відповідно до стандартів. Іншими словами, SRF завжди регулюється стандартами, тоді як RDF є ширшим терміном, необов'язково регульованим будь-якими стандартами (навіть якщо вони існують на деяких ринках).

Керівний принцип ієрархії відходів, передбачає що усі вторинні види палива мають походити з відходів, непридатних для повторного використання, підготовки до повторного використання або ефективної переробки матеріалів. Сенс полягає в тому, щоб ідентифікувати паливний продукт – SRF, додану вартість якого необхідно визначити (Рис. 1.2.) зпоміж загального продукту RDF, який не підлягає спеціальній стандартизації.

Рисунок 1.1. Динаміка відновлення енергії з відходів шляхом виробництва вторинного палива. Статус завершення утилізації відходів (EoW) можливий лише в окремих країнах, таких як Італія та Австрія.

Рисунок 1.2. Схематичний підхід до класифікації RDF і SRF.

На рисунку 1.2 показано, що SRF може стати сертифікованим SRF (товарний знак якості), якщо він буде вироблений відповідно до визначеної процедури забезпечення якості для відповіді на ринковий попит (паливо з чітко визначеною якістю).

Вищезазначене не перешкоджає тому, що відповідність палива вимогам SRF вимагає більш суворого підходу до якості. Вимоги до властивостей палива можуть бути добровільно задані кінцевими споживачами палива (наприклад, цементні заводи, електростанції, установки газифікації) через приватне зобов'язання (специфікацію) з виробником, щоб отримати паливо, яке добре відповідає їхнім власним економічним/технологічним потребам. Варто зазначити, що використання таких добровільних приватних зобов'язань передбачено стандартами SRF, наприклад, EN 15539 [13] і поточний розвиток ISO 21640 [14].

SRF в основному продаються та управляються як відходи. Однак незабаром вони можуть стати компонентом паливної та енергетичної систем в деяких країнах (наприклад, Італія, Австрія [15, 16]). Тоді виробництво SRF має дотримуватися законодавчо встановлених обов'язкових вимог, які дозволяють декларувати SRF як відходи, що завершили свій життєвий цикл (Рис. 1.1), що отримане паливо більше не підпадає під дію законодавства про відходи.

Важливо зазначити, що SRF, випущені на ринок, так само як і RDF, ніколи не визначають однакове за властивостями паливо, натомість характеризуючи певну різноманітність паливних продуктів, якісні властивості яких (наприклад, склад, фізико-хімічні властивості) можуть відрізнятися один від одного. Досягнутий ступінь якості залежить від

походження палива, виробничих процесів отримання, вимог його кінцевого користувача тощо.

1.2. Походження, процеси виробництва та специфічні вимоги ринку RDF і SRF.

SRF можуть вироблятися на місці з окремих або змішаних потоків муніципальних (ТПВ), комерційних (CW), промислових (IW), будівельних (CDW) відходів. Ці джерела включають диференційовані фракції відходів, що впливає на їх елементний склад. Як приклад наведено результати, отримані на основі досліджень, проведених на механічних установках заводів, які виробляють SRF з потоків ТПВ [17] (Таблиця 1.1 і Таблиця 1.2), з потоків комерційних та промислових відходів [18] (Таблиця 1.3 і Таблиця 1.4) і з будівельних відходів (Таблиця 1.5 і Таблиця 1.6).

Таблиця 1.1. Результати для вхідних і вихідних потоків із заводу: ТПВ, SRF та інші оброблені потоки відходів – Склад [28].

Таблиця 1.2. Результати для вхідних і вихідних потоків із заводу: ТПВ, SRF та інші оброблені потоки відходів – Деякі аналітичні результати [28].

Таблиця 1.3. Результати для вхідних і вихідних потоків із установки: потік комерційних та промислових відходів, потік SRF, інші потоки перероблених відходів – Склад [18].

Таблиця 1.4. Результати для вхідних і вихідних потоків із установки: потік комерційних та промислових відходів, потік SRF, інші потоки перероблених відходів – Деякі аналітичні результати [18].

Таблиця 1.5. Результати для вхідних і вихідних потоків із заводу: потік будівельних відходів; потік SRF; інші потоки перероблених відходів – Склад [18].

Таблиця 1.6. Результати для вхідних і вихідних потоків із заводу: потік будівельних відходів; потік SRF; інші потоки перероблених відходів – деякі аналітичні результати [18].

Використовуючи різні процеси у виробництві SRF властивості вхідної продукції з відходів можуть бути змінені виробником, а обраний процес виробництва визначатиме досяжний вихід відходів, перетворених на палива як в кількісному, так і в якісному відношенні.

На установках механічної обробки (MT) можна використовувати декілька операцій/технологій сортування SRF. Це, як приклад, може бути первинне подрібнення, просіювання, магнітне та вихрове подрібнення, поточне розділення, пневматичне розділення, оптичне сортування, ближнє інфрачервоне (NIR) сортування та вторинне подрібнення. Метою використання різних методів сортування є вибіркове розділення інертного матеріалу, металів та високохлорованих/забруднюючих компонентів відходів із матеріалу вхідних відходів у невеликі потоки, щоб отримати високий вихід SRF із специфічними якісними характеристиками.

На **рисунку 1.3** наведено приклад багатоступеневої обробки, застосованої на австрійській очисній станції вироблення SRF середньої (грубий матеріал) і преміум (дрібний матеріал) якості при використанні цементних печей як кінцевого споживача продукції [20]. В процес включені комерційні відходи, відходи упаковки, промислові відходи та попередньо оброблені побутові відходи. На **малюнку 1.3** показано SRF середньої та високої якості отримані в процесі, тоді як таблиці 1.7 і 1.8 описують їх ручне сортування та хімічний аналіз відповідно.

Рисунок 1.3. Багатоступенева схема обробки, прийнята на австрійських очисних спорудах для комбінованого виробництва SRF середньої якості (тобто грубий матеріал) і SRF преміум якості (тобто дрібний матеріал). [20].

Таблиця 1.7. Результати аналізу ручного сортування SRF середньої та високої якості, вироблених згідно процесу обробки, показаному на малюнку 4, у порівнянні з процесами низькоякісного SRF [20].

Таблиця 1.8. Результати для окремих фізико-хімічних властивостей вироблених SRF середньої та високої якості відповідно до процесів обробки,

показаних на малюнку 5, у порівнянні з процесами SRF низької якості. [20].
(**ar**: як отримано; **d**: суха основа).

Схема багатоступінчастого процесу, прийнята на австрійському заводі MT компанії ThermoTeam для відновлення матеріалів і виробництва високоякісного SRF для використання в цементних печах зі змішаних відходів [21] представлена на **рисунку 1.4**.

Малюнок 1.4. Багатоступенева схема переробки 100 000 тон на рік
Установка ThermoTeam для розділення заліза та інших металів, PVC, PET, важкої фракції та виробництво преміум SRF [21].

Щодо використання SRF на установках газифікації, існують такі вимоги до якості (тобто граничні значення), що стосується SRF, які використовуються на газифікаційному заводі Лахті у Фінляндії:

- 18–24 МДж/кг;
- <30 мас.% і <15 мас.% відповідно вологість і зольність;
- <0,6 мас.%, Cl
- <0,1 мг/кг, Hg.

Досвід, проведений на заводі SRF-BFB в Аньяланкоскі (Фінляндія) [29], вказав на вміст хлору як головну проблему (тобто ризик корозії та забруднення) і потреба у вологовмісту SRF в межах 15–30 % і зольності у межах 8–12 %. Щодо вмісту хлору, переважні значення <0,6 мас.% рекомендовані для спільного спалювання в котлах з киплячим шаром і газифікації, а значення в діапазоні 0,6–0,9 мас.% для використання SRF в цементних печах [30].

1.3. Стан виробництва та споживання SRF у країнах світу

АЗІЯ

Японія

Загальна кількість твердих побутових відходів, які утворюються в Японії, становили близько 44,3 млн. тон на рік 2014 р. та 42,8 млн.т/рік у

2015 р. [31]. RDF виробляються з так званих «загальних відходів» та включають побутові та комерційні відходи, відповідно до національного законодавства про відходи. RDF сушать шляхом додавання хімікатів і гранулюють; паливо включає фракцію розкладених відходів, повинно відповідати вимогам, встановленим у спеціальних національних стандартах [32], таким як питома теплота згорання (ПТЗ) $>12\,500$ кДж/кг, вологість $<10\%$ або зольність $<20\%$.

Повідомляється про 50 установок RDF в країні [33]. Виробництво RDF кількісно становило приблизно 270 000 тон у 2013 році [33] та 300 000 тон у 2015 році [35], демонструючи тенденцію до збільшення [31]. Із заявленою середньою ПТЗ приблизно 18 МДж/кг [35], RDF, вироблене у Японії, в основному призначене для використання в міських підприємствах, трансформуючих сміття у енергію, наприклад, на електростанції для задоволення місцевого попиту на електроенергію; іншими кінцевими споживачами є підприємства цементної та целюлозної промисловості та підприємства централізованого теплопостачання.

Додаткове вторинне паливо під назвою RPF (Refuse Derived Paper and Plastics Densified Fuel) також виробляється в Японії. RPF — це гранульоване паливо з відходів, виготовлене з сухого та нешкідливого паперу і пластикові відходи промислового походження (потoki залишків деревини, текстилю та гуми також допускаються, якщо виконуються вимоги стандартизованої якості палива). Національні стандарти [34], добре визнані та застосовуються всіма операторами, що задіяні у виробництві RPF. JIS Z7311:2010 класифікує його на чотири якісні «класи». Одним із них є т. зв RPF-кокс, який визначається як високоякісний RPF з калорійністю >33 МДж/кг, близькою до вугілля. Він відрізняється від вищезгаданого RDF походженням (тобто потоки відходів) і властивостями (тобто нижчі значення вологості та зольності; вищі теплотворні властивості).

У 2013 та 2015 роках було вироблено близько 1,2 млн.т/рік RPF [31,35] з кількох діючих об'єктів RPF (85 у 2013 році та 227 у 2015 році). Ці дані

також підтверджуються результатами загальнонаціонального дослідження, проведеного Японською промисловою асоціацією RPF [31]. Дослідження показує швидке зростання попиту на RDF між 2004 і 2009 роками, після чого настало плато ринку (близько 1,6 млн.т/рік) до 2016 року, коли він зріс до 1,7 млн.т/рік. За даними оцінки для 2016 і 2017 років спостерігається тенденція зростання попиту. За даними цього опитування національні виробничі потужності змогли задовольнити такий попит RPF на 70–75% з 2013 року та підтримуються нещодавнім збільшенням кількості об'єктів виробників RPF.

RPF вживається головним чином як заміне паливо через його властивості (наприклад, ПТЗ > 25 МДж/кг) і його основними національними споживачами є японська паперова та сталеливарна промисловість, а також цементні печі [37].

Японська федерація металургійної промисловості [38] оцінила споживання пластикових відходів (не спеціально визначені як RPF) та інших відходів, таких як відпрацьовані шини, приблизно як 450 000 тон у 2016 році, який практично не змінився з 2005 року. Не було знайдено даних про використання RPF у паперовій промисловості. Про цементну промисловість Японії статистика опублікована на веб-сайті Японської цементної асоціації [39] показує низьке споживання RPF та RDF та щорічне зменшення від приблизно 50 000-55 000 тон/рік (2010–2014) до 35 000-37 000 тон/рік (2015–2016), що відповідає лише 1,2–1,3 мас.% загального річного споживання замінних видів палива.

Рисунок 1.5. Тенденція річного попиту (зелений) і виробництва (червоний) RPF в Японії; світло-зелений (попит) і жовті стовпчики (виробництво) за 2017 та 2018 роки відповідають частковій річній оцінці [36].

Корея

До 2012 року Корея (Республіка Південна Корея) кодифікувала вторинне паливо в цілому як тверде паливо [43], яке було якісно диференційоване на RDF (паливо, отримане зі сміття, яке може бути пелетизоване або ні), RPF (аналог RPF, виробленого в Японії), TDF (паливо,

отримане з шин) і WCF (деревна стружка). У 2013 році [44] термін SRF (тверде відновлене паливо) було введено в Кореї національним законодавством, і наразі визнаються два типи SRF: SRF і SRF біомаси.

Політика управління відходами [44,45], прийнята в Кореї в 2013 році, включає комплексний план Waste-to-Energy (EfW, WtE) – переробка сміття в енергію (основна частина виробленої відновлюваної енергії). Відповідно до цього очікується збільшення з 1,8 Мт у 2013 р. до 3,8 Мт у 2020 р. горючих фракцій (наприклад, папір, пластик, деревина) муніципальних/промислових відходів, перетворених у SRF, що буде використане для спалювання або перетвориться в енергію на котельнях, когенераційних установках. Повідомляється про дванадцять SRF-заводів, що працюють в країні [45], майже всі вони виробляють SRF у формі пелет (потужність заводів від 25 тон/добу до 200 тон/добу). Крім того, будуються 4 заводи та ще 2 планується.

Щодо заводів EfW, на сьогодні існує 185 сміттєспалювальних заводів і 10 заводів газифікації ТПВ (потужністю від 10 до 150 тон/добу) в країні [45].

Таїланд

За оцінками, у 2015 та 2016 роках у Таїланді було утворено близько 27 млн тон ТПВ [46, 47]. Нещодавно в країні була запроваджена інтегрована система поводження з відходами з метою прискорення рекуперації матеріалів та енергії з ТПВ шляхом розділення первинних відходів, систем попередньої обробки, WtE та/або установок для компостування. За даними Державної енергетичної статистики в країні діють 4 заводи зі спалювання ТПВ (з них 2 установки з рухомими ґратами; 1 установка обертової печі зупинена), 5 заплановані під будівництво та додаткові плани будівництва ще 8. Чотири з цих заводів заявлені як виробники RDF з очисною потужністю від мінімум 250–500 тон/добу до 1550–2700 тон/добу, з розрахунковим потенційним споживанням RDF на сміттєспалювальних заводах близько 4950 тон/добу. У 2017 році працювали дві установки RDF-газифікації [47]. Ці заводи використовують технологію двоступеневої газифікації (тобто висхідний потік і плавлення золи), і разом вони переробили 259 тон/день RDF або 602

т/добу ТПВ. Були заявлені додаткові установки газифікації/піролізу ТПВ/РДФ що будуються або планується в країні, для підвищення потенційного споживання RDF близько 468 тон/день.

Загалом було повідомлено про 23 цементні печі [47], які знаходяться в експлуатації, будуються та плануються до будівництва потужністю клінкеру 38 млн.т/рік. Ці заводи здатні забезпечити 40% свого власного споживання енергії RDF. Характеристика відповідного RDF для використання в цементних печах в Таїланді [47] вимагає принаймні 18,8 МДж/кг теплотворної здатності, вміст води < 30 %, і вміст хлору та сірки <1 %.

Таїланд має потенційний річний обсяг виробництва приблизно 2,46 млн. тон RDF [47]. Типовий RDF буде складатися з 40 % пластику, 30 % господарських відходів, 10 % харчових відходів, менше 10 % паперу та близько 10 % негорючих матеріалів, зі значенням ПТЗ близько 19,6 МДж/кг і вмістом води 12%. Три національні цементні компанії [47] інвестували в заводи для сортування ТПВ з метою виробництва відповідного RDF: повідомляється, що шість «спеціалізованих» сортувальних заводів уже працюють. Орієнтовна потужність переробки понад 350 000 тон RDF на рік, два знаходяться в стадії будівництва. Планується потенційне загальне виробництво RDF у цьому промисловому секторі на рівні 1,5 млн. тон/рік.

У 2016 році система WtE Таїланду [48] складалася з 8 об'єктів RDF, 7 установок для спалювання ТПВ/RDF, заводів та 5 установок газифікації RDF. Дані про заміщення палива в цементній промисловості Таїланду [46] відображають у тому ж році споживання 94 млн. тон RDF та 32 млн. тон використаних шин на 2016 рік.

Класифікація відходів палива відповідно до Американських стандартів випробування матеріалів (ASTM) вважається основною нормативною базою в країні [47]. Він визначає сім типів RDF на основі попередньо відсортованих ТПВ.

Правила Таїланду для класифікації SRF/RDF [49]:

- RDF-1 Відходи, що використовуються як паливо у первинному вигляді
- RDF-2 Відходи, оброблені до грубого розміру, з чорними металами або без них;
- RDF-3 Подрібнене паливо, отримане з ТПВ, яке було оброблено з видаленням металу, скла та інших неорганічних матеріалів (95% мас., пропускає 50 мм² сітка);
- RDF-4 Горючі відходи, перероблені в порошок (95% мас., пропускає 10 мм² сітка);
- RDF-5 Горючі відходи, ущільнені (пресовані) у формі гранул, шлаків, брикетів, або пелет (d-RDF);
- RDF-6 Горючі відходи, перероблені на рідке паливо;
- RDF-7 Горючі відходи, перероблені на рідке, газоподібне паливо.

Вторинне паливо RDF-5 вважається особливо привабливим порівняно з згорянням самого сортованого сміття. RDF-5 – це ущільнені горючі відходи (в основному виробляються в формі гранул), отриманих із ущільнених пластикових відходів (тобто досить подібних до японського RPF) [49]. Це паливо може спалюватися в різних існуючих котлах, таких як камери згоряння з киплячим шаром, газифікатори, цементні і цегельні печі, і його легко транспортувати або зберігати. Воно містить менший відсоток негорючих залишків (наприклад, металів і скла), вищий вміст тепла на одиницю ваги, ніж неперероблені тверді відходи. Коли RDF-5 спалюється у спеціальному котлі, воно може забезпечити до 8–10 % більшу термічну ефективність порівняно з необробленими відходами.

Доцільним для виробництва RDF-5 є їх змішування з шламом сирової нафти [49]. RDF, виготовлені з використаних і невикористаних пластикових відходів, були випробувані в пілотному масштабі системи газифікації з фіксованим шаром низхідного потоку [50]; при цьому RDF, виготовлене з ТПВ при утилізації сміттєзвалища з високим вмістом горючих відходів,

низьким вмістом води та меншою кількістю біологічно розкладаних фракцій було протестовано на низьких пілотних газифікаторах із низхідним потоком [51].

Індія

В Індії термін RDF використовується для визначення відходів палива, які можна використовувати для спільної переробки у різних галузях промисловості. Згідно з національним законодавством RDF – це тверде паливо з горючих відходів, таких як пластик, деревина, целюлоза або органічні відходи, крім хлорованих матеріалів. Зазвичай воно виробляється у формі гранул або пуху, отриманого шляхом сушіння, подрібнення, зневоднення та пресування ТПВ. Термін SCF (Segregated Combustible Fraction) також використовується в Індії для визначення непереробних фракцій ТПВ, які містять пластик та інші горючі матеріали, що не піддаються біологічному розкладанню та виділяють токсичні гази під час їх спалювання чи викидання на смітник, або звалища. Ці фракції можна переробляти на заводах WtE або використовувати на установках попередньої обробки для виробництва RDF.

Вимоги до якості для RDF при використанні в цементній промисловості (попередній кальцинатор/піч) були визначені в Організації охорони здоров'я та екології департаменту Центрального державного управління [61].

Зовсім недавно правила класифікації та вимоги до специфікацій для цементної промисловості були запропоновані експертним комітетом, призначеним національним міністерством комунального господарства (MoHUA) [59] і підтверджено Асоціацією виробництва цементу. Як повідомляється, внесені пропозиції добре сприймаються іншими зацікавленими сторонами щодо використання як SCF, так і RDF на заводах з переробки відходів.

Окрім використання як додаткового палива на теплових електростанціях і сміттєспалювальних заводах, керівництво держави

висвітлює цементну промисловість як найбільш прийнятну галузь для впровадження RDF у якості замінного палива. З іншого боку, RDF вважається непридатним паливом для термічної та чавунної промисловості та сталеливарної промисловості, а також цегельних печей через різні обмеження, які можуть мати негативний вплив на процес виробництва, якість продукції та навколишнє середовище.

Після Китаю Індія є одним із найбільших споживачів цементу у світі із загальною кількістю 163 працюючих печей у 2017 році [62]. У 2017 році на Індію припадало 9,5% загального світового споживання цементу [63]. Незважаючи на цей факт, поточне використання альтернативних видів палива в цементній промисловості, яке вимірюється за допомогою Коефіцієнту теплового заміщення (TSR) все ще досить низьке, зі збільшенням з 0,6% у 2010 році до 3% у 2017 р., з яких 24% становила біомаса [64].

RDF з ТПВ вважається одним із найперспективніших альтернативних видів палива (серед інших утилізованих замінників – використані шини, промислові пластикові відходи, небезпечні відходи, висушений осад стічних вод, бійні відходи та біомаса [65, 66]). За оцінками, потенційна доступність становить близько 1,37 млн. тон на рік MSW-RDF для спільної обробки. Деякі з проблем, пов'язаних з використанням RDF в Індії:

1. технічні бар'єри, такі як низька якість ТПВ: висока вологість, хлор та важкі метали у складі RDF, налаштування очисних споруд ТПВ на RDF для відповідної марки цементу;
2. фінансові бар'єри, такі як високі інвестиційні витрати на заводи попередньої обробки або високі витрати на збирання та транспортування ТПВ;
3. політичні та нормативні документи щодо перетворення ТПВ у RDF та спільної обробки RDF у цементних печах все ще розробляються. Якщо ми подивимося на дані про кількість відходів, що використовувалися в цементній промисловості в

Індії протягом 2016 року, RDF, має незначний показник лише 848 тон/рік перероблено в 1 цементній печі.

Китай

Китай, який збільшив виробництво ТПВ на 33,8% за останні 10 років, досягнувши більш ніж 203 млн.т/рік у 2016 році, нещодавно зробив політичний вибір у бік значного збільшення своїх добових потужностей утилізації шляхом спалювання [67, 60]. Очікується, що спалювання зросте з близько 235 000 тон/день у 2015 році до приблизно 591 000 тон/день у 2022 році, це означає збільшення його ваги в національному поводженні з ТПВ з 31% у 2015 році до 54% у 2022 році. Це також означає, що зростає кількість сміттєспалювальних заводів, яка вже змінилася з 249 заводів у 2016 році до 303 у 2017 році.

Рисунок 1.6 описує заплановану еволюцію (2020 рік) у різних провінціях Китаю. Технологія решіткових печей переважає в Китаї (вона використовується в 202 з 303 спалювачів ТПВ для виробництва електроенергії на заводах, що експлуатувалися в 2017 р.), однак швидко розвивається технологія циркуляційного киплячого шару [67], а також більш широке використання набули процеси розділення та використання SRF. Питання SRF регулюється в країні національними стандартами [60], також доступні промислові та місцеві стандарти.

Китай залишається найбільшим споживачем цементу у світі, у 2017 році охоплюючи 59,1% від загального світового споживання [63] і лідирує в рейтингу першої десятки країн-виробників цементу з 804 працюючими печами у 2017 році [62].

Загалом рівень термічного заміщення у Китаї та Індії залишається нижчим за 6% від рівня, досягнутого в цементному секторі на глобальному рівні, і дуже далекий від зони ЄС.

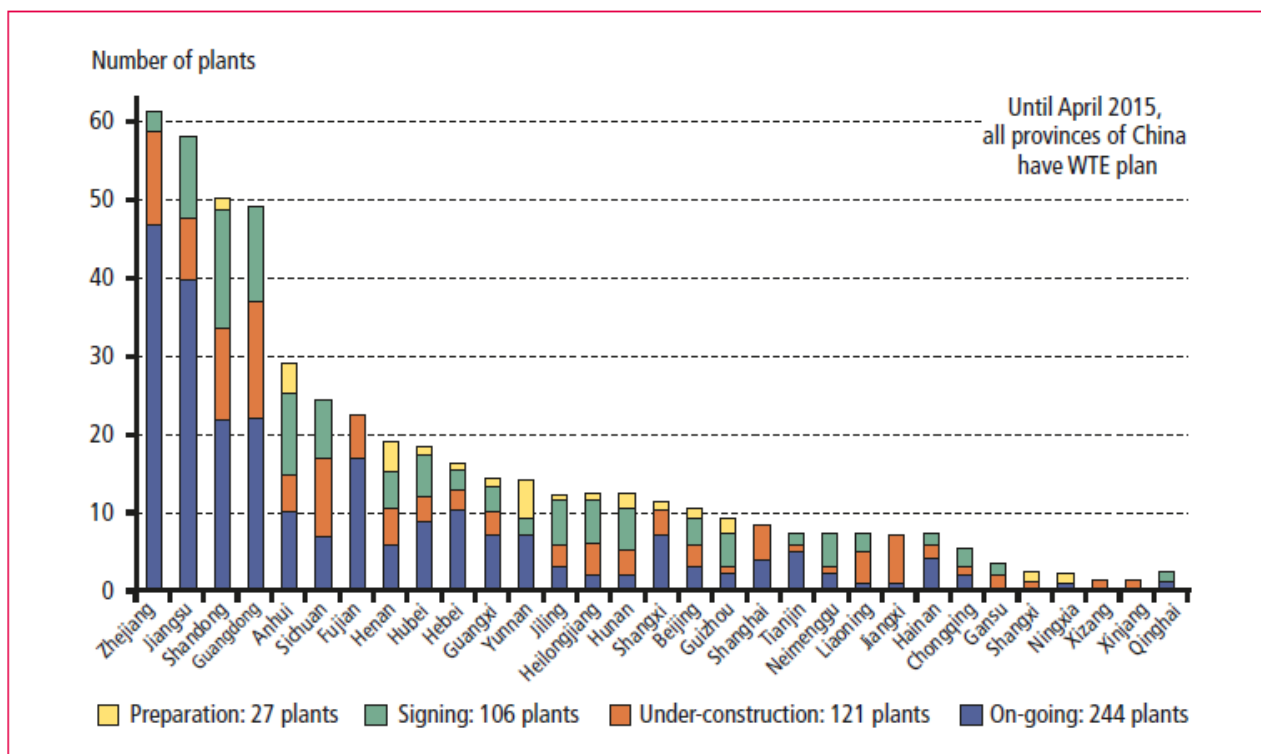


Рисунок 1.6 Ситуація та тенденції щодо сміттєспалювальних заводів WtE у провінціях Китаю у 2020 р. [67].

АФРИКА

Єгипет

Виходячи з національних даних [71], сектор сортування та компостування ТПВ в Єгипті базується на всього 64 станціях, з них 46 були в експлуатації в 2015 році, з повною проектною потужністю та продуктивність близько 3,2 млн.т/рік. Протягом 2015 року на заводах перероблено близько 2,2 млн. тон ТПВ, тобто 18% від загальної кількості ТПВ, що щорічно збирається в країні. Середній ККД системи близько 70% проектної потужності.

Було підраховано [71], що райони Дельти, Великого Каїру та Александрії (на них припадає 83% загальної кількості ТПВ, вироблених у Єгипті) мають потенційну здатність виробляти в діапазоні від 1,7 до 4,2 млн.т/рік RDF. У 2015 році національне виробництво RDF становило близько 223 000 тон і найбільшим кінцевим споживачем є цементні печі. RDF в основному виробляється сторонніми виробниками, які проводять попередню

обробку ТПВ, що надходять переважно з району поблизу Каїра. Теплотворна здатність виробленого RDF знаходиться в діапазоні 11,7-16,7 МДж/тону [71].

Згідно з результатами опитування, проведеного єгипетською цементною промисловістю [71], 8 з 14 опитаних виробників цементу, переробили близько 388 тис. тон сільськогосподарських відходів, 223 тис. тон RDF і 32 тис. тон подрібнених шин у 2014 році. У тому ж році в середньому національною цементною галуззю був досягнутий коефіцієнт теплозаміщення (TSR) 6,4%, максимальний показник становив 13% у двох цементних печах. Було підраховано [71], що TSR може обґрунтовано досягти до 2025 року в Єгипті рівня у 20%, виходячи з наявності замінників палива та очікуваної здатності системи управління відходами підтримувати виробництво RDF. Для досягнення такої цілі передбачувані потреби складали 1,36 млн. тон RDF, 1,51 млн. тон сільськогосподарських відходів, 0,1 млн. тон шинного палива та 0,44 млн. тон висушених осадів стічних вод, а альтернативне паливо не використовувалося принаймні до 2023 року.

ЄВРОПА

Погляд на ринок SRF/RDF на національному рівні європейських країн, описаний нижче на основі наявних літературних даних та відповідей, наданих членами-експертами на відповідному дослідженні, проведеному з цього питання ISO/TC 300/WG2 у 2017 році. Надані опис виробництва та використання SRF/RDF, звичайно, не охоплює всі країни однаково і не завжди надає однакові та вичерпні дані. Однак це може бути корисно для знання сучасного стану та перспектив окремих ринків.

Іспанія

У 2015 році в Іспанії було повідомлено про роботу 31 заводу з механічної обробки відходів [89] з повною очисною потужністю близько 4,2 млн.т/рік. Однак немає даних щодо якості SRF/RDF.

Близько 2,5 млн. тон ТПВ (не надано даних про частку SRF/RDF) було перероблено в 10 діючих сміттєспалювальних установках загальною потужністю близько 2,6 млн.т/рік.

Щодо національної цементної промисловості, наявні 30 цементних печей, на них припадає загальне використання альтернативного палива близько 0,8 млн. тон, з яких 0,5 млн. тон було описано як «інші відходи» та 0,3 млн. тон як суміш європейських кодів переліку відходів (EWC).

Німеччина

Німеччина виробила близько 3 млн тон SRF, з яких 0,5 млн тон під маркою SBS що сертифікована якістю RAL, і спожила близько 2,2 млн тон SRF у цементних печах, що відповідає 67% із 3,3 млн. тон використання альтернативних видів палива, та 0,8 млн. тон у національній системі вугільних (буре та кам'яне вугілля) електростанцій протягом 2016 року [90]. Загальне національне виробництво RDF 8,7 млн.т/рік [91] (4,1 Мтон з ТПВ і 4,6 Мтон з потоків промислових/комерційних відходів) з яких SRF становили 2–3 млн.т. SRF в основному споживався як заміник палива при спільному спалюванні з рослинною сировиною. У 2015 році споживання RDF становило 1,3 млн тон на сміттєспалювальних заводах і 4,7 млн тон на спеціалізованих промислових об'єктах (теплогенерація), таким чином загальна кількість споживання (регульована та нерегульована) близько 9 млн. тон RDF в країні.

У Німеччині вважається, що SRF є спеціально підготовленим паливом, виготовленим із специфічних виробничих або муніципальних відходів, які були належним чином оброблені для використання в основному на установках для спільного спалювання. Тверде відновлене паливо, яке відповідає визначеній стандартизованій якості – визначено за німецьким стандартом RAL-GZ 724 [92] – зараз захищене в Німеччині торговими марками (BPG TM; SBS TM) [93–96].

Марка BPG TM ідентифікує SRF, вироблений лише з джерела, відсортованих промислових і комерційних відходів. Визначено три якісні категорії BPG TM: BPG 1 TM (електростанції), BPG 2 TM (цементні печі) та

BPG 3 TM (вапнякові печі). Бренд SBS TM ідентифікує SRF, вироблене з побутових відходів і відходів будівництва та знесення. Є дві якісні категорії SBS TM: SBS 1 TM (електростанції з використанням бурого вугілля) і SBS 2 TM (вугільні електростанції та цементні печі).

Австрія

Австрія [97] повідомила про виробництво близько 2,8 млн. тон SRF, з яких приблизно 1,0 млн. з ТПВ у 2015 році та виробництво 0,18 млн. тон SRF-ЕоW (паливний продукт) у 2016 році.

У 2015 році в країні працювали 53 промислові електростанції загальною потужністю близько 1,0 млн.т/рік оброблених відходів, які включають відходи деревини (близько 0,4 млн.т), залишки від целюлозно-паперової промисловості (близько 0,4 млн.т), пластикових відходів (близько 0,1 млн.т) і меншою мірою, текстиль, осади стічних вод та інші відходи. Протягом 2015 року працювало 8 цементних печей, якими спожито 0,5 млн.т/рік замінного палива; пластикові відходи є основним компонентом суміші замінних видів палива, що становить 0,30 млн.т/рік, суттєво менші частки становлять стічні води, шлам, відходи деревини, тваринне борошно, сільськогосподарські залишки, паперові волокна, використані шини та відпрацьоване масло (усі менше 0,1 млн.т/рік).

Кількісна оцінка всієї національної ємності споживання RDF становить близько 1,3 млн.т у 2015 р., з яких 0,27 млн.т було спалено, 0,71 млн.т використовується для спалювання/спільного спалювання на спеціальних промислових об'єктах і 0,33 млн.т в цементних печах.

При використанні SRF в цементних печах повідомляється про його маркування, яке включає два види відновленого палива: так зване SRF «середньої якості» (наприклад, з $12 \leq \text{ПТЗ} \leq 18$ МДж/кг, використовується у якості замінника енергії у вторинному спалюванні в системі цементної печі та/або в спеціальних камерах попереднього спалювання, таких як Hotdisc) і «преміум» SRF (наприклад: $18 \leq \text{ПТЗ} \leq 25$ МДж/кг, використовується для рекуперації енергії в первинній системі спалювання цементної печі).

RDF юридично визначено в Австрійському розпорядженні про спалювання відходів [98] як паливні відходи, які:

- використовується повністю або у відповідній мірі з метою виробництва енергії та відповідає критеріям якості, викладеним у цьому розпорядженні;
- виробляється за допомогою нормальної і розширеної попередньої обробки потоків нешкідливих відходів, таких як осад стічних вод, відходи деревини, висококалорійні фракції, від механіко-фізичної (МФ) або механіко-біологічної (МБ) очистки рослин, теплотворні фракції побутових і промислових відходів, подрібнені легкі фракції (тобто з старі транспортні засоби та відпрацьоване електричне та електронне обладнання), брукт шин, відпрацьоване масло, використані розчинники та тваринні жири, кісткове борошно та ін., що здійснюється на підприємствах, які застосовують систему чітко визначеного контролю якості;
- може використовуватися на заводах спільного спалювання та продається і відправляється згідно з Європейським кодом списку відходів (EWC) 191212.

Термін SRF відноситься в Австрії до підмножини RDF, яка:

- виробляється з відібраних або змішаних нешкідливих відходів відповідно до чітко визначеного процесу попередньої обробки (наприклад, багатоступеневе подрібнення, класифікація, розділення чорних і кольорових металів, виключення важких інертних матеріалів, відсорткування небажаних матеріалів, таких як полівінілхлорид (ПВХ), або перероблених матеріалів, таких як ПЕТ;
- відповідає вимогам якості, таким як виробництво, класифікація та специфікація, встановлені в Європейському стандарті EN-15539 і продається, відправляється та використовується під кодом EWC 191210.

Вищезазначена австрійська постанова юридично встановлює вимоги до якості, які застосовуються до різного використання загального палива з твердих відходів або SRF. Встановлені обов'язкові граничні значення також наведені у постанові. Спалювання тепер визнано в Австрії кінцевим етапом утилізації та регулюється тим же правовим актом.

Ірландія та Великобританія

Агентство з охорони навколишнього середовища Ірландської Республіки встановило [81], що міські відходи (код EWC 200301) можуть являтися горючими відходами (тобто загальним паливом, отриманим з відходів, RDF) якщо відходи піддаються «процесу обробки, який суттєво змінює властивості – за даними Національного офісу транскордонних відправлень (TFSO)».

Таке паливо, отримане з відходів, отримає:

- код EWL 191212, якщо воно є механічно обробленими залишковими відходами з ПТЗ в діапазоні 9–12 МДж/кг і вище. Його основне використання – може бути паливом для установки спалювання та спільного спалювання і отримання електроенергії та тепла;
- код EWL 191210, якщо це паливо з вищим ПТЗ (13–20 МДж/кг), яке відповідає вимогам якості, не містить шкідливих елементів – Cl, Hg, Cd, Tl, є придатним як замінне паливо (наприклад, у цементній промисловості).

Фактично, останній розглядається як підмножина палива, отриманого з відходів, яке називається твердим рекуперованим паливом (SRF).

У Великій Британії Програма дій щодо відходів і ресурсів (WRAP) надала рекомендації [99] щодо класифікації та специфікації вторинного палива, узагальнено названого паливом із відходів (WDF).

Ця інструкція встановлює, що WDF є:

- паливом, отриманим із відходів (RDF), якщо це невизначене відходове паливо отримане шляхом піддання потоків відходів

основній обробці, яка підвищує теплотворну здатність. Використання невизначеного тут терміна не стосується вимог до якості, встановленої стандартами;

- тверде відновлене паливо (SRF), якщо вироблене паливо з відходів досягає високої ринкової вартості, маючи можливість задовольнити суворіші вимоги до якості.

Департамент навколишнього середовища, продовольства та сільських справ Великобританії (DEFRA) [100] визначає RDF як паливо що складається із залишкових відходів, які є предметом споживання кінцевим споживачем для використання в якості палива в енергетиці з відходів. Договір зі споживачем повинен містити технічні характеристики кінцевого продукту що стосуються, як мінімум, теплотворної здатності, вмісту вологи, форми та кількості RDF.

Франція

Combustibles solides de recuperation (CSR) є французьким еквівалентом англійського значення для SRF. Виробництво і споживання CSR зараз у Франції є низьким.

У 2015 році було вироблено 230–800 тис. тон CSR, з них приблизно 275 тис. споживається цементними печами, які є основними національними споживачами [91], хоча також повідомляється про споживання незначної кількості в спеціальних установках отримання енергії зі сміття EfW. У Франції виробництво CSR з ТПВ не має належного стимулювання та не мають право на субсидії в рамках конкурсу Energy CSR, так що цей сектор переважно переходить до виробництва CSR з промислових і комерційних потоків відходів.

Завдяки нещодавно ухваленим законодавчим актам [101–103] Франція зараз, здається, рухається до стимулювання (виробництво та побутове використання) вторинних відходів палива і, зокрема, CSR. Термін CSR зараз юридично визначено [103] як безпечна тверда речовина, відпрацьоване паливо, яке складається з відходів, які були попередньо оброблені для

виділення з вхідних відходів тих фракцій, які можна відновити у формі матеріалу, відповідно до переважаючих технічних і економічних умов. Тобто відходи підготовлені для використання на заводах, що підпадають під товарну позицію 2971 Франції – перелік об'єктів, віднесених до природоохоронного призначення. CSR також відповідає вимогам, встановленим у французькій нормативній базі щодо характеристики та порогових значень, контролю якості та зобов'язань дотримуватися ієрархії відходів. Тому, імовірно, у Франції буде введено норми щодо загального RDF (нерегульованого RDF) і до регульованого RDF (SRF) відповідно до європейського стандарту EN 15539.

На основі результатів дослідження у Франції також була запропонована додаткова класифікація CSR [104] за підтримки ADEME та виконана FEDEREC (Французька асоціація переробки відходів). Метою було інтегрувати європейський стандарт щодо SRF за допомогою класифікаційної системи, заснованої на параметрах, які вважаються відповідними залежно від спалювального обладнання та обраних технологій контролю забруднення, особливо у випадку спеціальних котлів.

Як показано, запропонована схема базується на семи ключових параметрах і для кожного з них є граничне значення, щоб визначити чотири «якісні» класи CSR (від класу А високої якості CSR, до класу D – низька якість CSR).

Очікується, що CSR [84] активно сприятиме зменшенню національної залежності від викопного палива для виробництва тепла і виробництва електроенергії, а також збільшенню частки відновлюваної енергії у Франції, і запланованому національному скороченню сміттєзвалищ. Зменшення захоронення ненебезпечних відходів з 21

Нове законодавство також фокусується на термічній обробці попередньо оброблених відходів та її впливі на НПС, як виробниками CSR, так і кінцевими споживачами, оскільки це визначає які заводи ICPE [105], будуть дозволені для підготовки CSR, визначає нову категорію ICPE [106]

установок для спалювання RDF (тобто установок, що мають відношення до охорони навколишнього середовища), яка може використовувати його як паливо і, в той же час, модифікує попередні розпорядження для деяких інших категорій існуючих теплових і спалювальних установок. Ці законодавчі та регуляторні зміни у Франції є першим кроком до розвитку енергетичного сектору CSR, який потребує збільшення потужності виробництва тепла та електроенергії, що базується на відходах палива.

Італія

В Італії вторинні відходи палива, як нерегульовані (RDF), так і регульовані (SRF: зараз названі в країні CSS 5, раніше CDR 6) щорічно виробляються на заводах МТ/МВТ, переважно з несортованих або попередньо оброблених міських відходів [82,109]. У 2017 році [109] загалом було 130 установок МТВ/МТ в країні, більшість з них розташовані в центральних і південних регіонах через відмінності що існують у місцевій кількості несортованих відходів, якими потрібно управляти, так і на доступності одержувача – установок EfW (головним чином спалювальні установки ТПВ). RDF і SRF виробляються в основному з несортованих (88% загальної кількості оброблених відходів у 2017 р.) або попередньо оброблених (8,5%, у 2017 р.) твердих побутових відходів [82,109].

Потоки MSW-RDF, які виходять із заводів МТ/МВТ, включають сухі та біовисушені фракції відходів, які як правило утилізуються всередині країни та відправляється під кодом EWC 191212. У 2017 році [109] внутрішнє виробництво сухої фракції становило близько 4,49 млн.т, а біосухої фракції – 0,15 млн.т. 23% сухої фракції та 78% біовисушеної фракції було спалено окремо, тоді як 1,8% сухої фракції було спалено разом з традиційними видами палива.

Значна частина відходів також потрапляє на звалище.

У тому ж році близько 1,34 млн тон CSS було вироблено приблизно третиною всіх заводів, що експлуатуються в країні; у той час як у 2015 та 2016 роках вироблено близько 1,5 млн. тон (2015 р. 7) ТПВ-УЗ. Важливо

відзначити, що в Італії відбувається зменшення виробництва CSS з промислових/комерційних відходів також.

На основі останніх даних доступна статистика щодо «спеціальних відходів», у 2015 році [111] було вивезено 54 876 тон таких відходів, використано для рекуперації енергії в цементних печах/заводах спільного спалювання 85 454 тони.

SRF та інші вторинні види палива входять до паливної суміші установок для спалювання ТПВ. У 2017 році в Італії було загалом 38 установок в експлуатації [109] – з них 6 котлами з киплячим шаром, які працюють переважно або тільки з SRF – спожито близько 2,4 млн.т вторинного палива.

Останні доступні національні статистичні дані (2015–2017) повідомляли про споживання SRF комбінатами від заводів зі спалювання ТПВ, а також для дуже обмеженої кількості спеціалізованих промислових підприємств (0,33 млн. тон у 2017 р.). Таким чином, правильний показник того, скільки SRF (або RDF) становить річне споживання на заводах зі спалювання ТПВ не може бути визначений. За попередніми статистичними даними (2010-2014) [82] оцінюється річне споживання CDR/CSS установками для спалювання ТПВ між 0,9 млн.т (2010: 16% паливної суміші) і 1,1 млн.т (2014: 18% паливної суміші); при споживанні RDF (суха частка, в основному) становило від 1,3 млн.т (2010: 22 % паливної суміші) до 2,0 млн.т (2014: 32 % від паливної суміші).

SRF відіграє важливу роль в Італії як заміне паливо (спільне спалювання з вугіллям). Основним споживачем є національна цементна промисловість. Лише у 2017 році [63] було спожито близько 213 тис. цементними печами, що рівномірно за масою становить 59% від загальної кількості використаних 360 000 тон альтернативного палива. Зазначені дані стосуються загалом 27 повних циклів, які входять до Італійської техніко-економічної цементної асоціації (AITEC), що еквівалентно більш ніж 95%

усіх об'єктів в країні. На малюнку 1.7 показано кількість SRF і пластику, гуми та ELT у суміші альтернативних видів палива за період (2010–2017).

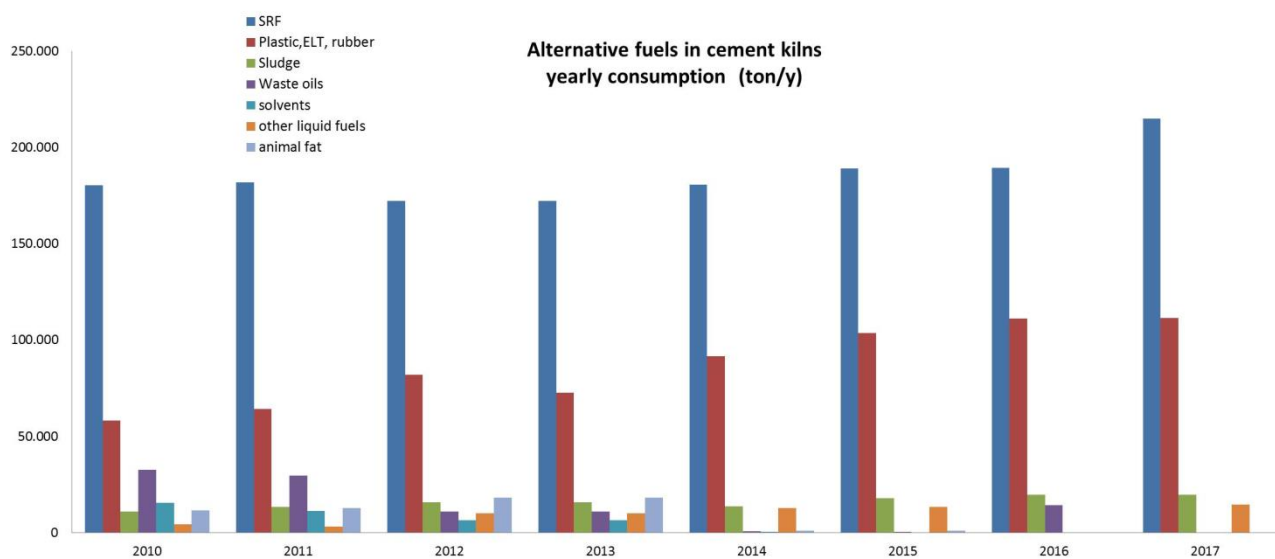


Рисунок 1.7. Споживання альтернативних видів палива в італійських цементних печах: тенденція 2010-2017 [63].

У 2017 році середній рівень заміщення енергії за рахунок використання SRF становив 17,3%, що нижче за рівень, який вже отримано в різних європейських країнах, а також у середньому по ЄС – 28%. Виходячи з останніх тенденцій, до 2025 року в італійському цементному секторі можна досягти рівня 40–50% частки заміщення палива.

CSS продається та транспортується всередині країни як відходи відповідно до EWC 191210. Близько 131 000 тон було експортовано протягом 2017 року [109] порівняно зі 175 767 тонами у 2016 році [110] та 139 062 тонами у 2015 році.

В Італії імпорт SRF не зареєстрований.

Термін RDF, згаданий вище, використовується для ідентифікації відходів палива (тобто сухих і біологічно висушених фракцій відходів отриманих з установок МТ/МВТ і відправлених на об'єкти EfW). Тобто, цей вид палива не має визначених вимог та не має відповідати стандартам за будь-якими властивостями. Лише заводи EfW, які вимагають економічного прибутку від частки відновлюваної енергії, яку вони отримують від

національної мережі можуть потребувати певної якості цих видів палива, але лише щодо їхньої біомаси та питомої енергії.

В іншому випадку CSS юридично визначено в Італії [114] як вторинне тверде паливо, вироблене з відходів, які відповідають вимогам до класифікації та специфікаціям, встановленим Європейським стандартом EN 15539. В країні вважається, що CSS є твердим відновленим паливом.

Для підтримки застосування європейських стандартів надано національні стандарти [115] і потреби у вимогах до якості палива [116] як для характеристики CSS (та інших відходів палива) щодо вмісту біомаси та енергії [117]. У минулому відпрацьоване паливо під назвою CDR9, що відповідає правилам класифікації та специфікацій, встановленим у спеціальному національному стандарті [118], яке було виготовлено в Італії з безпечних відходів і торгується під кодом EwL 191210.

На нашу думку, суттєве зростання, принаймні в коротко-середньостроковій перспективі, національного виробництва CSS (SRF) є сумнівним у реалізації через різні фактори:

- очікуване зменшення з часом кількості відходів (ТПВ), з якими необхідно поводитися;
- очікуване значне покращення поводження з відходами з пріоритетним відновленням матеріалів та переробкою;
- потенційні наслідки впровадження законодавчих рішень, які будуть перекладені у відносно посилення «шляху першої адреси» залишкових ТПВ на заводи WtE (спалювальні), таким чином виключаючи їх з попередньої обробки та виробництва CSS;
- необхідність технічного вдосконалення самих систем попередньої обробки (витрати, час, дозволи, соціальна прийнятність тощо), щоб виробляти, у більшій мірі, високоякісне паливо;
- сумнівно, що реальне послідовне збільшення попиту може впливати на одержувача продукції у всіх галузях промисловості;

Швеція

Виробництво RDF у Швеції протягом 2012 року становило 0,4 млн. тон (походженням є суміш ТПВ та I/CW) [84], тоді як внутрішнє споживання у 2015 р. досягло 1,8 млн. тон, з яких 1,7 млн. тон використовувалися в спеціальних установках для спалювання/спільного спалювання для підтримки міського споживання тепла, і 0,1 млн. тон в цементних печах. Виходячи з цих даних видно, що значна частина внутрішніх потреб покривається за рахунок імпорту відходів палива.

Фінляндія

Протягом 2014 року [84] у Фінляндії було вироблено близько 0,5 млн. тон RDF: 0,35 млн. тон з ТПВ і 0,1547 млн. тон з промислових/комерційних потоків відходів, з яких <0,25 млн. тон були регульованими RDF (SRF).

Загальне внутрішнє споживання RDF у 2015 році становило близько 0,65 млн. тон, з яких 0,25 млн. тон було використано на об'єктах газифікації (споживання міського тепла), 0,30 млн. тон та 0,10 млн. тон у сміттєспалювальних та промислових установках для спалювання/спільного спалювання (промислове споживання тепла), відповідно.

Португалія

У Португалії статистику твердих побутових відходів за 2017 рік надає Національне агентство з питань навколишнього середовища (APA) [126]. Відмічено щорічне виробництво MWS близько 5 млн. тон (в середньому повідомляється про щорічне зростання на 2% з 2013 по 2017 рік). Управління ТПВ використовує полігони як основний кінцевий пункт призначення (32 мас.%), потім МТ/МВТ (7% і 28% відповідно), відходи для виробництва енергії (21%), повторне використання матеріалів і переробка (10%) органічної фракції (на спеціалізованих або МТ/МВТ заводах).

У 2017 році, за оцінками APA, загалом 379 тон ТПВ було використано для виробництва вторинного палива – названого в країні CDR – на заводах МВТ, що було нижчим показником порівняно з попередніми двома роками (21 509 тон у 2016 році та 114 566 тон у 2015 році відповідно), коли

муніципальні тверді залишки були перероблені на заводах МТ/МБТ та на інших очисних спорудах, названих у країні «станції скринінгу», які діють у Португалії.

За даними АРА, щорічне виробництво 1466 тон CDR зросло вдвічі порівняно з 2016 роком (749 тон), але значно менше, ніж у 2015 році (29 476 тон). Така тенденція пояснюється відсутністю заводів EfW (переважно цементних печей) для отримання CDR, які не відповідають мінімальним вимогам специфікації. Зокрема, CDR з ТПВ, вироблених в країні показав вміст вологи (середні значення 20%–45%) вище граничних значень (12%–15%) необхідних для спільної переробки відходів палива (цементна промисловість).

В останній доступній оцінці CEWER 12 заводів WtE в Європі [127] згадується, що в Португалії працювали чотири сміттєспалювальні установки загальною потужністю 1,2 млн. тон використовуючи ТПВ/нешкідливі відходи. Крім того, споживання CDR в цементних печах (6 заводів) становило 137 000 тон [128], з яких 96% CDR було вироблено з міських відходів; 3,75% імпортованих CDR і 0,22% ТПВ-CDR вироблених в країні. Транскордонне перевезення палива, отриманого з відходів (EWC 191210), в основному з Великобританії, Іспанії, Італії та Нідерландів, показали прогрес та значне зростання в Португалії в останні роки (+130% у 2020 році з імпортом 75 909 тон порівняно до 2017 року).

Португальське визначення CDR, в наказі 21295/200913, останнім часом переглядається. Стратегічний план управління ТПВ [128] узгоджується зі стандартом EN 15539: CDR є твердим паливом, виготовленим з нешкідливих відходів для використання при відновленні енергії, спалюванні або сумісному спалюванні в суворій відповідності до закону, де слово «підготовлений» означає оброблений, гомогенізований та покращений до якості, що дозволяє обмін/комерціалізацію між виробниками і користувачами. CDR вважається в країні твердим відновленим паливом. Національне регулювання CDR було запроваджено в минулому зі стандартом

NP 4486:2008 [130], який визначає рамки для виробництва, класифікації та управління якістю палива, отриманого з відходів, в узгодження з технічними специфікаціями CEN/TC 343. В даний час визнано європейський стандарт EN 15539.

Хорватія

У 2016 році в країні було утворено 1 679 765 тон ТПВ [23] і було досягнуто об'єм переробки на рівні 21% ТПВ. У країні не використовується енергоутилізація або спалювання ТПВ, тому більшість вироблених ТПВ (близько 79% у 2016 р.) захоронюються без будь-якої попередньої обробки [23].

Повідомляється про три заводи MBT [23], що працюють в країні, загальною потужністю 285 000 тон/рік. Національна система MBT планується для обробки змішаних твердих побутових відходів і нешкідливих відходів із магазинів, промисловості та установ, які за своїми властивостями та складом подібні до побутових відходів, які не пройшли спеціальні процедури вторинної переробки (наприклад, папір і скло).

У 2016 році [23] в країні перероблено 1 251 299 тон ТПВ. Крім RDF (продається як EWC 191212), заводи MBT виробляють відпрацьоване паливо гарантованої якості під назвою «Хорватський SRF Premium».

Якість SRF (наприклад, SRF з ПТЗ > 18 МДж/кг і розміром частинок 95% < 30–35 мм), здатна відповідати вимоги до якості, встановленим Австрійською службою якості Premium Quality SRF. Відновлене паливо вироблене на заводах MBT юридично не вважаються продуктом, а все ще вважаються відходами, і, отже, вони продаються відповідно до EWC 191210 (як горючі відходи з гарантованою якістю, SRF) або EWC 191212 (як некваліфікований RDF).

Національна цементна промисловість є єдиним користувачем такого преміального SRF [23]. Усі цементні печі (6 заводів, працюючих в Хорватії в 2016–17 роках) технічно можуть використовувати SRF Преміум лише на первинному пальнику (ще жодна піч не обладнана системою вторинного

спалювання). Разом з SRF цементна промисловість використовує інші альтернативні палива, такі як брукт шин або відпрацьоване масло. Середній коефіцієнт теплового заміщення (TSR) нижче 10% був досягнутий у 2017 році [23].

ОСНОВНЕ ВИКОРИСТАННЯ СЬОГОДНІ

Сміттєспалювальні заводи з рекуперацією електричної та теплової енергії є кінцевими споживачами SRF, а також RDF (в основному використовується на установках, обладнаних котлами FBB, але також на установках з колосниковими решітками), а деякі європейські країни (наприклад, Італія) зараз використовують велику частку вироблених у країні SRF для цієї мети. Меншою мірою зараз експлуатуються промислові установки спільного спалювання SRF для задоволення внутрішнього попиту на тепло/електроенергію або щоб отримати економічну вигоду від розміщення електроенергії в національній мережі. Це могло б швидко змінюватися при запровадженні державного регулювання у сфері (наприклад, ціни на нафту, ціни на CO₂ тощо). Деякий розвиток відбувається в секторах електроенергетики та централізованого теплопостачання, але основні шляхи використання в таких галузях, як сталеливарна/залізна, целюлозно-паперова, скляна та хімічна промисловість, у більшості ще не вивчені.

Енергоємні промислові сектори, такі як виробництво цементу та вапна, а також вугільної енергетики можна виділити, як основних очікуваних кінцевих користувачів SRF, принаймні в більшості європейських країн.

Інші країни, такі як Індія та Китай (лише згадати випадки, задокументовані в дослідженні), що мають щорічно управляти великою кількістю відходів і задовольняти свій внутрішній попит енергетики, нещодавно почали розробляти домашню систему попередньої обробки відходів (ТПВ, промислові відходи) до SRF і в будь-якому випадку стали досить послідовними імпортерами SRF з сусідніх країн-виробників.

Постійне інтенсивне зростання індустрії спалювання відходів у Китаї, на якому, здається, зосереджено увагу використання технології FBB може стати великим кінцевим користувачем SRF. Нажаль даних про поточне виробництво та використання SRF у Китаї, тому оцінити їх було неможливо. Китай та Індія є найбільшими споживачами цементу в світі і займають високу позицію в рейтингу десятків країн-виробників цементу; в даний час вони показують досить низький TSR (термічний коефіцієнт заміщення), але мають високий потенціал для використання SRF. І Китай, і Індія, і інші країни Азії, зараз активно працюють над розробкою національного стандарту та настанов для виробництва та кінцевого використання SRF.

ПОТЕНЦІАЛ НА МАЙБУТНЄ

Ієрархія відходів чітко визнає роль відходів для отримання енергії та, зокрема, відходів палива вироблених за допомогою процесів, які значною мірою доповнюють переробку відходів; це означає, що паливо вироблене з відходів, непридатних для повторного використання, підготовки до повторного використання або ефективної переробки матеріалів. Тверде відновлене паливо (SRF), як тут визначено, має відповідати очікуваним змінам сировини для перетворення відходів на енергію (поліпшення можливості переробки та повторного використання таких відходів, як пластик, деревина, папір та біорозкладані відходи) і стати кроком до найбільш енергоефективної системи перетворення відходів у енергію.

Як згадувалося в попередній частині, такі великі країни, як Китай та Індія, все ще мають велику частку виробництва енергії та постачання технологічного тепла з викопних джерел. Вони також є основними виробниками/споживачами цементу. Європейські країни показали, що значна частина викопного палива може бути замінена вторинним паливом, таким як SRF, що також свідчить про великий потенціал його використання в таких країнах, як Індія та Китай.

Зусилля, спрямовані на міжнародну стандартизацію SRF через ISO, швидше за все, також приведуть до підвищення довіри до SRF як до

вторинного палива. Це, у свою чергу, може призвести до збільшення попиту на ринках, який сьогодні не великий.

Новою сферою застосування SRF/RDF є використання в якості сировини для процесів термохімічної переробки. Вони спрямовані на виробництво рідкого палива або основних хімікатів, з таких матеріалів, як пластик. Сьогодні комерційні маніпуляції у цій сфері обмежені, але є перші у своєму роді заводи, і інтерес до технологій постійно зростає.

За наявності відповідних стимулів ці технології розвиватимуться далі та стануть важливим важелем для розвитку SRF/RDF. Загалом, існує кілька напрямів щодо виробництва та використання SRF/RDF та їх важливість у найближчій та середньостроковій перспективі, швидше за все, зросте.

Розділ 2

Вплив використання твердого відновленого палива на потенціал глобального потепління, при використанні для виробництва цементу.

Розробка системи управління відходами

2.1. Умови виконання досліджень

Цемент є одним із найпоширеніших будівельних матеріалів у світі, у 2016 році світове виробництво цементу становило 4,7 мільярда метричних тон (Мт) (CEMBUREAU, 2017). Виробництво цементу є енергоємним процесом з оціненою середньою потребою в тепловій енергії 3,4 ГДж на 1 тону клінкеру в усьому світі в 2018 році (IEA, 2020b). Виробництво цементу також є другим за величиною промислових викидів вуглекислого газу (CO₂) (Міжнародне енергетичне агентство, 2018). У 2016 році світове виробництво цементу створило близько 2,2 мільярдів тон CO₂, що становить приблизно 8% світових викидів CO₂ (Andrew, 2018; Rodgers, 2018). Із загального обсягу викидів парникових газів (ПГ), які утворюються цементною промисловістю, приблизно 50% викидається в результаті процесу кальцинації, 40% пов'язано зі спалюванням палива в процесі кальцинації, а решта 10% утворюється внаслідок споживання електроенергії, підготовці та транспортуванні сировини та палива (Роджерс, 2018). Щоб зменшити викиди парникових газів від виробництва цементу, слід приділяти більше уваги зменшенню співвідношення клінкеру до цементу та збільшенню використання альтернативних видів палива (CEMBUREAU, 2013).

Цементна промисловість використовує тверде відновлене паливо (SRF) як альтернативне паливо, яке зазвичай виробляється з твердих міських відходів (ТПВ), комерційних і промислових відходів (КІВ), а також відходів будівництва та зносу (C&D). У більшості країн з високим рівнем доходу КІВ зазвичай використовується на сміттєспалювальних заводах після відділення

від нього придатних для переробки та інертних матеріалів (RagoŹnig et al., 2009). Спалювання КІВ є економічно та екологічно складним через його неоднорідні характеристики (Donahue, 2018). У більшості країн із середнім або низьким рівнем доходу КІВ зазвичай утилізуються на звалищах, завдаючи потенційної шкоди навколишньому середовищу. Перенаправлення КІВ зі сміттєспалювальних заводів і полігонів на цементні заводи може бути екологічно й економічно доцільним і легким способом також для країн з низьким рівнем доходу скоротити захоронення та збільшити відновлення відходів без великих інвестицій. Щоб визначити вплив використання SRF на цілі системи, включаючи виробництво цементу та системи управління відходами, важливо провести достовірний аналіз використання SRF у виробництві цементу.

Оцінка життєвого циклу (LCA) — це метод кількісної оцінки потенційного впливу продукту чи послуги на навколишнє середовище протягом усього життєвого циклу (Міжнародна організація стандартизації, 2006). Вплив використання альтернативного палива на цементних заводах на навколишнє середовище вже досліджувався в рамках кількох досліджень LCA. Приклади цих досліджень включають відходи деревини C&D (Hossain та ін., 2017), паливо, отримане з шин (TDF), біологічний осад (BS), паливо, отримане з відходів (RDF), а також суміш TDF, BS і RDF (Georgiopoulou та Lyberatos, 2018), КІВ (Helftewes et al., 2012) і C&D деревні відходи, асфальтова черепиця, залізничні шпали та пластик (Zhang and Mabee, 2016). Güerеса та ін. (2015) досліджували вплив на навколишнє середовище використання RDF (який виробляється з ТПВ) у цементному виробництві, одночасно розширюючи межі системи захоронення відходів. Усі вищезазначені дослідження показали, що використання палива, отриманого з відходів, як альтернатива, може мати значний вплив на скорочення викидів парникових газів у процесі виробництва цементу. Однак жоден з дослідників LCA не проаналізував вплив використання КІВ на GWP у цементній промисловості, а також зосередилися на системі управління відходами, на

яку врешті-решт впливає використання КІВ як палива в процесі виробництва цементу.

Відходи можна переробляти в цементній промисловості або на сміттєспалювальних заводах. Крім того, у багатьох частинах світу звалище все ще є найкращим варіантом обробки відходів. Енергію можна отримати від спалювання відходів або процесу захоронення та використовувати для заміни енергії, яка виробляється з інших джерел. Таким чином, під час використання відходів у цементній промисловості важливо досліджувати вплив, коли відходи використовуються для рекуперації енергії і, таким чином, замінюється енергія викопного палива. У роботі досліджено спільно як цементну промисловість, так і відповідну систему поводження з відходами, враховуючи SRF, отриманий з КІВ, як паливо в цементній промисловості.

Однією з головних цілей нашого дослідження є кількісна оцінка зміни потенціалу глобального потепління (GWP) при виробництві цементу, коли звичайне паливо замінюється на SRF на цементному заводі. Оскільки в цьому дослідженні альтернативним паливом є SRF, це означає, що також є зміни у відповідній системі управління відходами, які необхідно враховувати.

LCA у роботі було проведено відповідно до стандартів ISO 14040 (Міжнародна організація стандартизації, 2006), які визначають чотири основні етапи: (a) визначення мети та сфери застосування; (b) аналіз запасів; (c) оцінка впливу; та (d) тлумачення.

Як приклад для цього дослідження використовується виробництво цементу Finnsementti (на фабриці в Лаппеенранті). Згідно з Finnsementti (2017), цементний завод у Лаппеенранті використовує суху довгу обертову піч із чотириступеневим циклонним попереднім нагрівачем, за яким слідує попередній кальцинатор. Дослідження було проведено на основі даних про виробництво цементу за 2007 та 2016 роки, коли використання SRF було збільшено з нуля до 53%. Крім того, компанія має намір ще збільшити частку SRF у споживанні палива. Було підраховано, що 80% енергетичного вмісту

палива є технічним максимумом для використання SRF. Мета використання реальних вимірних даних полягає в тому, щоб показати, що запропоновані зміни реалістичні і що подібна практика може бути застосована в інших частинах світу.

У цьому дослідженні було підраховано, що для забезпечення достатньої кількості SRF для заміни 80% паливної енергії, необхідної для виробництва 1 Мт цементу на заводі, необхідно 194 кг КІВ. Тому функціональною одиницею у дослідженні є виробництво 1 Мт звичайного портландцементу (OPC) і обробка 194 кг КІВ.

Було обрано підхід «від початку до кінця», а розрахунки LCA проводилися за допомогою програмного забезпечення GaBi 8.0 (Thinkstep, 2018). Оцінка впливу проведена за методом CML2015 (версія: січень 2016 р.). Кількість оксидів азоту (NO_x), оксидів сірки (SO_x) та інших скорочень викидів за рахунок використання SRF на заводі є невизначеною з даних про роботу заводу, оскільки були ініційовані інші технічні зміни, пов'язані з контролем викидів у той же період часу, коли використання SRF було збільшено. Контроль забруднення повітря на заводі постійно вдосконалювався, частково на основі досвіду використання SRF на іншому цементному заводі, який розташований у Парайнені, Фінляндія. Для контролю різних викидів, таких як тверді частки, NO_x і SO_x , завод встановив електростатичні фільтри, тканинні фільтри, селективне некаталітичне відновлення, пальники з низьким рівнем NO_x і нову піч. Оскільки, за винятком викидів CO_2 , скорочення викидів NO_x , SO_x та інших викидів за рахунок використання SRF є невизначеним, тому NO_x , SO_x та інші викиди були виключені з цього дослідження. Ось чому категорія впливу, що оцінюється в цьому дослідженні, – GWP, який представляє важливу екологічну проблему для виробництва цементу. Можливі зміни у викидах NO_x і SO_x вплинуть на підкислення та евтрофікацію, але зв'язок між викидами NO_x і SO_x з утилізацією SRF не вдалося встановити. Крім того, екологічні вимоги у Фінляндії вимагають, щоб викиди NO_x і SO_x залишалися

в межах дозволених норм, і ці викиди можна контролювати за допомогою пристроїв для забруднення повітря, які були встановлені для обмеження можливих змін впливу на навколишнє середовище.

Межі системи цієї моделі LCA проілюстровано на [рисунку 2.1](#). Межі системи розділені на дві частини: система виробництва цементу; і постраждалі системи управління відходами. Оцінка почалася зі збору KIB та видобутку сировини та викопного палива (FF). Система виробництва цементу включає видобуток сировини та FF, виробництво SRF з KIB та транспортування сировини, FF та SRF на цементний завод. Системи виробництва цементу також включають окремі операції, такі як подрібнення та змішування сировини, процес кальцинування та охолодження клінкеру, подрібнення та змішування з добавками. Крім того, це дослідження також включає споживання електроенергії під час підготовки сировини, FF та інших операцій на заводі, а також споживання теплової енергії для виробництва клінкеру. Межі системи закінчуються виробництвом цементу. Потенційний вплив на навколишнє середовище від пакування, транспортування, використання та закінчення терміну служби цементної продукції не було досліджено, оскільки викиди від цих процесів вважаються однаковими для всіх сценаріїв.

[Рисунок 2.1. Межа системи та потоки маси та енергії в досліджуваних сценаріях.](#)

Досліджені системи включають транспортування та обробку KIB на звалищах або сміттєспалювальних заводах, переробку побічних продуктів системи, таких як сталь і алюміній з виробничого процесу SRF, електроенергію та централізоване опалення від спалювання відходів, а також електроенергію зі звалищного газу (LFG). Крім того, досліджені системи включають виробництво сталі та алюмінію з систем переробки, та великі обсяги виробництва централізованого опалення у 2017 році та виробництва електроенергії.

За даними Chen et al. (2010), відходи можна розглядати як тягар для навколишнього середовища, вільний від попередніх фаз життєвого циклу (придбання та переробка матеріалів, виробництво та використання продуктів), коли навантаження на навколишнє середовище на етапах виробництва розподіляється на продукти. Таким чином, у дослідженні передбачається, що КІВ та інші відходи, такі як відпрацьоване масло, потрапили в систему без будь-якого навантаження на навколишнє середовище. Крім того, кілька видів сировини – наприклад, пічний шлак, чавун (прокатна окалина) і зола – також вважаються відходами. Таким чином, у цей аналіз включено лише навантаження на навколишнє середовище від транспортування вищезазначених відходів, сировини та добавок.

2.2. Дослідження сценаріїв використання різної кількості SRF

Було проаналізовано чотири сценарії з різними методами обробки КІВ та часткою SRF у виробництві теплової енергії під час виробництва клінкеру. Розрахунки проводились методом розширення системи; отже, в результаті цього процесу не було зроблено викидів. Натомість у всіх сценаріях однакова кількість електроенергії, тепла та матеріалів потрапляє в межі системи та залишає їх.

Максимальна кількість обробки КІВ відбувається у сценарії 4 (SC 4), де 80% теплової енергії постачається SRF. Таку саму кількість КІВ потрібно обробляти в усіх інших сценаріях. Оскільки SC 4 має найбільшу масу КІВ, спрямовану на виробництво SRF на заводі, цей сценарій також має найбільшу кількість відновлення металу. У результаті обсяг виробництва металу для решти трьох сценаріїв має дорівнювати SC 4. Ці сценарії з меншими обсягами виробництва металу повинні отримувати метал із зовнішніх джерел, якими, як припускається, є перероблений алюміній і сталь. Коефіцієнти викидів CO₂ для переробленого алюмінію та сталі представлені в таблиці 2.1. Енергія, отримана від спалювання КІВ у SC 2, може бути

використана для заміни енергії викопного палива. Оскільки SC 1, SC 3 і SC 4 не мають такої кількості енергії як SC 2, ці сценарії повинні мати енергопостачання з інших джерел.

1. Сценарій 1 (SC 1): У цьому сценарії 100% теплової енергії, що споживається під час виробництва клінкеру, постачається з джерел FF, які складаються з 47% з вугілля, 47% з нафтового коксу та 6% з відпрацьованого масла. Зібрані 194 кг KIB утилізуються на полігонах, де LFC збирають і використовують для виробництва електроенергії.

2. Сценарій 2 (SC 2): Подібно до SC 1, однакова кількість і частка FF використовуються під час виробництва клінкеру в SC 2. Однак замість утилізації на сміттєзвалищі необроблені KIB направляються на сміттєспалювальні заводи для відновлення тепла та електроенергії.

3. Сценарій 3 (SC 3): SRF постачає 50% загальної необхідної теплової енергії для виробництва цементу. Решта потреби в енергії задовольняються за рахунок FFs, яке включає 37% нафтового коксу, 4% вугілля, 5,5% відпрацьованого масла та 0,5% з легкого мазуту (LFO). У цьому сценарії 121 кг KIB (що дорівнює 75% загального енергетичного вмісту KIB) використовується для виробництва SRF, тоді як решта 73 кг KIB обробляється на заводі для спалювання відходів для відновлення енергії.

4. Сценарій 4 (SC 4): У цьому сценарії SRF забезпечує 80% загальної теплової енергії. Решта енергії постачається з нафтового коксу. У SC 4 усі зібрані KIB використовуються для виробництва SRF.

Дані, використані в цьому дослідженні, базуються на виробництві цементу на заводі Finnsementti в Лаппеенранті. У роботі представлені зведені дані процесу виробництва цементу. Дані заводу використовуються для аналізу впливу на навколишнє середовище, коли частка SRF у постачанні теплової енергії становить 0%, 50% і 80%. 100% заміна традиційного палива SRF у процесі виробництва цементу не є технічно чи економічно життєздатною через низку проблем. Серед викликів найбільш важливими вважаються управління викидами діоксиду сірки, хлору, NO_x і монооксиду

вуглецю, можливі блокування в системі теплообміну, контроль операцій перед кальцинатором і забезпечення якості виробленого цементу (Чіньяма, 2011).

2.3. Методика розрахунку основних параметричних показників

Finnsementti використовує в середньому 1200 кг сировини для 1 Мт виробництва цементу. Сировину, що використовується для виробництва цементу, можна розділити на п'ять основних компонентів, щоб забезпечити оксиди кальцію, оксиди алюмінію, кремнезем, оксиди заліза та сульфат кальцію (Huntzinger and Eatmon, 2009). Сировина в основному складається з вапняку (81%), потім золи (8%), доменного шлаку (4%), гіпсу (3%) і мінеральних відходів (2%). Інші компоненти сировини включають діабаз, боксити та залізо (валкова окалина). Гіпс та мінеральні відходи використовують як домішку, яку змішували з клінкером для отримання цементу. Викиди ПГ від придбання та перевезення сировини, RM_{GHG} (кг CO_2 , екв./Мт цементу), розраховуються за допомогою рівняння (1):

$$RM_{GHG} = \sum_i^n (m_{RM} * w_{RM} * CE_{RM}) \quad (1)$$

де:

m_{RM} = загальна маса сировини на Мт цементу (кг/Мт цементу),

w_{RM} = частка сировини (кг сировини/кг загальної сировини),

CE_{RM} = викиди CO_2 від підготовки сировини (кг CO_2 , екв./кг сировини).

Викиди від споживання теплової енергії спричинені підготовкою та спалюванням палива. Загальні викиди ПГ під час підготовки палива, FP_{GHG} (кг CO_2 , екв./Мт цементу), можна розрахувати за рівнянням (2), використовуючи необхідну масу палива:

$$FP_{GHG} = \frac{\sum_i^n (m_F * w_{RM} * CE_{Fp})}{1000} \quad (2)$$

де

m_F = маса палива на масу цементу (кг/Мт цементу),

CEF_p = коефіцієнт викидів CO_2 від підготовки FF (кг CO_2 , екв./кг палива).

Викиди від спалювання палива викликані вмістом викопного вуглецю в паливі. Коефіцієнт викидів CO_2 від спалювання SRF на вміст енергії, CEF_{SRF} (г CO_2 / екв/МДж) розраховується на основі складу, а також вмісту небіогенного вуглецю у фракціях відходів. Маса небіогенного вуглецю на масу SRF, $m_{Cnb,SRF}$ (г С / кг SRF), розраховується за рівнянням (3):

$$m_{SRF} = \sum_i^n (w_{SRF} * TS_{SRF} * C_{SRF} * Cnb_{SRF}) \quad (3)$$

де

w_{SRF} = частка компонента SRF і (кг компонента SRF / кг SRF),

TS_{SRF} = частка загальної твердої речовини в компоненті SRF (кг загальної кількості твердої речовини / кг компонента SRF),

C_{SRF} = частка С у загальній твердій масі компонента SRF (г С / кг загальної твердої речовини),

Cnb_{SRF} = частка небіогенного С у загальному вмісті С компонента SRF (г небіогенного С/ г С).

Маса вуглекислого газу на масу SRF (г CO_2 / кг SRF) обчислюється за рівнянням (4):

$$\frac{m_{CO_2}}{m_{SRF}} = m_{Cnb,SRF} * \frac{(n*M)_{CO_2}}{(n*M)_C} \quad (4)$$

де

n = молярна кількість (моль),

M = молярна маса (г/моль).

Коефіцієнт викидів від спалювання SRF та енергетичний вміст SRF, CEF_{SRF} (г CO_2 / МДж) можна розрахувати за рівнянням (5):

$$CEF_{SRF} = \frac{m_{CO_2}}{m_{SRF}} / LHV_{SRF} \quad (5)$$

де

LHV_{SRF} = нижня теплотворна здатність, отримана з SRF (МДж/кг).

Загальна потреба в енергії палива вважалася рівною 3000 МДж на Мт цементу. Кількість палива, необхідного в сценаріях, залежить від LHV палива. Виходячи з потреб теплової енергії для 1 Мт цементу, SC 1 і SC 2 використали 106 кг палива. У SC 3 використання палива було збільшено до 125 кг на 1 Мт цементу, оскільки частка SRF у постачанні теплової енергії була збільшена до 53%, а також SRF має нижчий LHV порівняно з FF, використаними в цьому дослідженні. Кількість утилізованого палива була збільшена ще більше, до 139 кг, в SC 4, коли частка SRF була збільшена до 80%.

Загальна кількість викидів ПГ від спалювання палива, FC_{GHG} (кг CO₂, екв. / Мт цементу), залежить від LHV і коефіцієнту викидів CO₂ від палива і може бути розрахована за рівнянням (6):

$$FC_{GHG} = \sum_i^n (TE_i * w_{TE_i} * CEF_e) \quad (6)$$

де

TE = необхідна теплова енергія (МДж / Мт цементу),

w_{TE} = частка палива i (МДж / МДж теплової енергії),

CEF_e = коефіцієнт викидів CO₂ від палива (г CO₂, екв. / МДж).

Загальні викиди ПГ від споживання теплової енергії, TE_{GHG} (кг CO₂, екв. / Мт цементу), визначаються за рівнянням (7):

$$TE_{GHG} = FP_{GHG} + FC_{GHG} \quad (7)$$

Процес прожарювання вапняку

У роботі було припущено, що карбонат кальцію та карбонат магнію з вапняку повністю розклалися через високу температуру (1450°C) і тривалий час горіння. Кількість викидів парникових газів у процесі випалу залежить від кількох факторів, таких як кількість клінкеру в цементі та частка оксиду кальцію (CaO) і оксиду магнію (MgO) у клінкері. У цьому дослідженні співвідношення клінкеру до цементу становило 80%, тоді як масова частка CaO та MgO у клінкері становила 65% та 3% відповідно. Частина, що залишилася, складалася в основному з діоксиду кремнію і, меншою мірою, оксиду алюмінію та оксиду заліза. Кількість викидів парникових газів,

утворених процесом кальцинації, CP_{GHG} (кг CO_2 , екв. / Мт цементу), за розрахунками, становила 438 кг CO_2 , екв. / Мт цементу з використанням рівняння (8):

$$CP_{GHG} = w_{cl} * \left[w_{CaO} * \frac{M_{CO_2}}{M_{CaO}} + w_{MgO} * \frac{M_{CO_2}}{M_{MgO}} \right] \quad (8)$$

де

w_{cl} = частка клінкеру в цементі (кг клінкеру / кг цементу),

w_{CaO} = частка CaO в клінкері (кг CaO / кг клінкеру),

w_{MgO} = частка MgO в клінкері (кг MgO / кг клінкеру),

M_{CaO} = молярна маса CaO (кг / кмоль),

M_{MgO} = молярна маса MgO (кг / кмоль).

Споживання електроенергії

У рамках цього дослідження електроенергія споживається в процесі виробництва цементу для підготовки сировини, подрібнення вугілля, виробництва клінкеру, обробки, а також у процесі виробництва SRF. Споживання електроенергії для підготовки сировини включається в роботу валкового млина, дробильних машин, витяжних вентиляторів і колосникових охолоджувачів, а також роботи кожуха печі під час процесу виробництва клінкеру. У процесі обробки електроенергія витрачається на подрібнення клінкеру, гіпсу та різних домішок, таких як зола і пічний шлак. Це дослідження включало вивчення структури виробництва електроенергії у Фінляндії в 2017 році, яка включала 10% вугілля, 4% природного газу, 13% біопалива, 26% атомної енергії, 17% гідроенергії, 5% вітру, а решта 25% імпортувалася з сусідніх країн. Коефіцієнт викидів CO_2 від виробництва електроенергії склав 158 кг CO_2 , екв. за МВт-год (Motiva, 2019).

Управління комерційними та індустріальними відходами (KIB)

Комерційні та індустріальні відходи використовуються разом із відбракованими матеріалами, які утворюються в процесі виробництва SRF. KIB та відбраковані матеріали містять значну частку паперу та картону,

м'яких та твердих пластикових відходів, у яких містяться текстиль та деревина.

У SC 3 і SC 4 SRF виробляється з КІВ після проходження необхідних процесів обробки, таких як подрібнення, просіювання, відділення металу, класифікація повітрям (провіювання), сортування в ближньому інфрачервоному діапазоні та система видалення пилу (Nasrullah et al., 2014). На додаток до SRF, дрібні та важкі фракції, метали (чорні та кольорові) та браковані матеріали також виробляються в процесі виробництва. Близько 62% маси КІВ перетворюється на SRF, тоді як 21% маси КІВ відкидається, 12% сортується як дрібні та важкі фракції, а решта 5% збирається як чорні та кольорові метали. Перетворення енергії від КІВ до SRF досягало рівня 75% що означає, що SRF, який становить 62% від маси КІВ, має 75% енергетичного вмісту КІВ, з якого він отриманий. LHV КІВ було розраховано як 17 МДж/кг з використанням теплової здатності SRF, отриманої на Finnsementti (2017). Передбачається, що відпрацьовані матеріали будуть використовуватися для виробництва енергії на заводах з переробки відходів. Чорні та кольорові метали було вилучено, а дрібні та важкі фракції захоронено на полігоні без будь-якої утилізації енергії. Річна енергоефективність установок, що переробляють відходи, була прийнята на рівні 69%, включаючи ефективність виробництва теплової енергії 64% і електричну ефективність 5% (Anttila, 2011).

Коефіцієнт викидів CO₂ для КІВ і відходів розраховується на основі складу та вмісту небіогенного вуглецю у фракціях відходів. Розрахований коефіцієнт викидів CO₂ КІВ становив 49 г CO₂, екв. / МДж. Оскільки всі сценарії повинні мати однакову кількість енергії, що виходить із системи, якщо сценарій не має рівної кількості вихідної енергії із системи, потрібна енергія із зовнішніх джерел. Середній викид від виробництва централізованого тепла у Фінляндії склав 164 кг CO₂, екв МВт/год (Motiva, 2019).

У SC 1 зібрані KIB утилізуються на полігоні, де KIB розкладаються на LFG, який включає метан (CH_4), CO_2 та інші сполуки, що утворюються в процесі анаеробного зброджування. Дані про викиди на звалищах KIB були отримані з бази даних GaBi, і передбачалося, що 28% LFG буде спрямовано на виробництво електроенергії, 22% – на спалювання, а 49% – викинуто в атмосферу (Thinkstep, 2018). Розраховані викиди ПГ від захоронення 194 кг KIB еквівалентні 142 кг CO_2 .

Транспортна система моделі

Залежно від місця імпорту сировини, палива та KIB, у цій моделі використовуються два типи транспортних систем: мазутне судно; та вантажівка з дизельним двигуном. Серед усіх видів сировини гіпс, доменний шлак і боксит транспортуються за допомогою кораблів і вантажівок, тоді як інша сировина, така як зола, транспортується вантажівками. Вугілля і нафтовий кокс перевозять судами і автомобілями, а SRF, LFO і відпрацьований мазут – автотранспортом. Відстань транспортування KIB до заводу SRF, а також до сміттєспалювального заводу та сміттєзвалища становить 100 км.

Дані інвентаризації для аналізу

Споживання теплової енергії є одним із основних джерел підвищення коефіцієнту глобального потепління (GWP) у виробництві цементу. Таким чином, споживання теплової енергії включається в аналіз для визначення впливу на GWP, коли потреба в тепловій енергії змінюється під час процесу випалювання матеріалів.

Існує пряма залежність між часткою клінкеру в цементі та кількістю викидів парникових газів, які утворюються в процесі кальцинування. Потреба в тепловій енергії для 1 Мт виробництва цементу також залежить від частки клінкеру в цементі. Саме тому вплив частки клінкеру на загальні викиди ПГ від процесу виробництва цементу досліджується в роботі. Передбачається, що у 2050 році частка клінкеру у виробництві цементу становитиме в середньому 70% (CEMBUREAU, 2013).

Деревне паливо є найбільшим джерелом централізованого опалення у Фінляндії (33%), за ним йде кам'яне вугілля (23%) (Статистичне управління Фінляндії, 2018). Таким чином, аналіз також включає вплив на GWP виробництва додаткового тепла за допомогою кам'яного вугілля та твердої біомаси.

2.4. Оцінка GWP у реалізованих сценаріях застосування SRF

Результати на рисунку 2 підсумовують вплив GWP як на процес виробництва цементу, так і на відповідні системи управління відходами. Загальний GWP зменшується з 1036 кг CO₂, в SC 1 до 725 кг CO₂ у SC 4. GWP від виробництва цементу залишається незмінним між SC 1 і SC 2, оскільки в обох сценаріях використовувалися однакові кількості та частка палива. Однак, враховуючи різні методи управління КІВ, SC 1 генерує на 100 кг більше CO₂, екв. викидів, ніж SC 2. Крім того, шляхом застосування SRF в печі, у SC 3 і SC 4 відбувається скорочення викидів як у процесі виробництва цементу, так і в інших процесах у системі.

Рисунок 2.2. Потенційний вплив на глобальне потепління від використання твердого відновленого палива (SRF) у цементній промисловості, включно з системою управління відходами, що базується на утилізації SRF.

Відносний внесок у GWP у виробництві цементу

У SC 1 і SC 2 процес виробництва цементу генерує 790 кг CO₂, екв., в основному це викиди від вивільнення CO₂ під час кальцинації – 55%, і згоряння палива під час процесу кальцинації – 35%. На [малюнку 2.3](#) представлено відносну частку GWP від системи виробництва цементу. Кальцинація та спалювання палива разом створюють 90% загальних викидів ПГ від виробництва цементу, що узгоджується з опублікованою цифрою від Всесвітньої ділової ради сталого розвитку (WBCSD) (2005). Коли 53% від загальної кількості FF замінено на SRF, викиди ПГ від виробництва цементу зменшуються на 10% порівняно з SC 1 і SC 2. У цьому дослідженні було

виявлено, що викиди парникових газів зменшуються на 22% порівняно з SC 1 і SC 2, коли частка SRF в енергії палива досягла 80% у сценарії 4. Викиди ПГ від придбання сировини (2% у всіх сценаріях) та FFs (від 1% до 5% у всіх сценаріях), включаючи транспортування, мають низький вплив. Крім того, споживання електроенергії під час роботи заводу з виробництва цементу також має досить низький вплив (3% до 4% у всіх сценаріях).

Рисунок 2.3. Відносний внесок у потенціал глобального потепління в системі виробництва цементу.

Скорочення викидів парникових газів завдяки використанню SRF у процесі виробництва цементу свідчить про те, що SRF є ефективним альтернативним паливом для скорочення викидів парникових газів у цементній промисловості. Результати також демонструють, що скорочення викидів парникових газів збільшується зі збільшенням частки SRF у тепловій енергії. Скорочення викидів в першу чергу залежить від частки біогенного вуглецю SRF. SRF, що містить більшу частку таких компонентів, як папір і деревина, більш суттєво зменшить кількість викидів парникових газів порівняно з SRF з більшою часткою пластику, оскільки папір і деревина містять більше біогенного вуглецю порівняно з пластиком. Проте менша кількість пластику та більша кількість паперу та деревини в SRF зменшить ПТЗ SRF, оскільки пластик має більший ПТЗ 35–40 МДж/кг, ніж папір і деревина –16 МДж/кг. Якщо в цементній промисловості використовується SRF з нижчою ПТЗ, це може призвести до споживання великої кількості SRF для задоволення попиту на енергію та, таким чином, збільшити викиди ПГ від утворення SRF.

Вплив використання SRF на систему поводження з відходами

Використання SRF на цементних заводах має значний вплив на GWP відповідної системи поводження з відходами, що можна побачити з [таблиці 2.2](#). Викиди ПГ від спалювання KIB за SC 2 близькі до захоронення KIB за SC 1, оскільки вивчені KIB містять понад 50% пластику, піни, металу, скла, каміння та дрібних частинок. У процесі захоронення органічні речовини

розкладаються на парникові гази, такі як CH_4 і CO_2 . Оскільки пластик важко розщепити та розкладається він протягом дуже тривалого періоду часу, він майже не сприяє викиди парникових газів. Натомість, спалювання пластикових відходів призводить до викидів ПГ. У SC 3 80% викидів є результатом спалювання КІВ, а решта – спалювання відходів виробництва SRF. У SC 4 викиди від спалювання походять лише від спалювання відходів. Результати дослідження показують, що при управлінні КІВ використання 80% SRF у цементній промисловості зменшує до 85% викидів ПГ від SC 1 і 84% від SC 2. Однак, беручи до уваги загальні викиди у систему, SC 4 генерує на 57% менше викидів від СК 1 і на 24% менше викидів від СК 2, що в основному пов'язано з теплопостачанням із зовнішніх джерел.

Таблиця 2.2. Сценарій Управління комерційними та промисловими відходами Додавання тепла в систему Додаток електроенергії до системи

	Металева добавка до системи			Одиниця		
	Перевезення		Спалювання		Звалища	
1	142	1	93	4	5	кг CO_2 , екв. (функціональна одиниця)–1
2	133	1				
3	51	2	53	11	4	
4	19	2	80	5		

Середній GWP світового виробництва цементу склав 800–1000 кг CO_2 , екв. SC 4 цього дослідження показує, що GWP від виробництва цементу може бути зменшений на 22–38% від середньої кількості викидів, які у глобальному масштабі становлять 0,7–1,5 мільярда тон на рік. Це дослідження показує, що використання 80% SRF у якості паливної енергії у світовій цементній промисловості потребувало б близько 0,9 мільярдів тон КІВ. Маса глобальних КІВ невідома, але, за літературними даними Світового банку, у 2016 році в усьому світі було вироблено 2 мільярди тон ТПВ, з яких 40% було використано неправильно (Ellis, 2018). У деяких регіонах КІВ

також можуть бути включені до маси ТПВ. Між відходами та зміною клімату існує тісний зв'язок. На частку відходів припадає 5% світових викидів парникових газів, які в основному пов'язані з відкритими звалищами і захороненням відходів (Ellis, 2018). У більшості країн з високим рівнем доходу відходи замість захоронення у сміттєзвалища перероблюються шляхом спалювання. Переробка відходів на сміттєспалювальних заводах є економічно складною через створення нового заводу, його функціонування та управління, а також належну систему контролю викидів. Таким чином, спалювання відходів на сміттєспалювальних заводах може бути невідповідним рішенням для країн з низьким рівнем доходу, особливо для тих, у яких наявні бюджетні проблеми. У цьому випадку, замість будівництва нового сміттєспалювального заводу, було б дешевше утилізувати відходи на існуючих цементних заводах. Однак однією з найбільших проблем використання SRF у цементній промисловості є нижча ПТЗ відходів через неналежну систему управління відходами. Тому важливо прийняти інтегровану систему управління твердими відходами, де горючі частини відходів розділятимуться та збиратимуться ефективно.

Аналіз чутливості системи

Викиди ПГ від процесів виробництва цементу, таких як отримання, підготовка та транспортування палива, пов'язані з кількістю споживання теплової енергії на заводі. Коли потреба в тепловій енергії змінюється, викиди ПГ від цих процесів одночасно змінюються. Оскільки функціональний блок сценаріїв 1 та 2 не змінюється, кількість енергії, що надходить від SRF, також не змінюється. Однак частка енергії палива змінюється в SC 3 і SC 4. Частка енергії палива для постачання 3400 МДж теплової енергії оцінюється як 47% SRF, 42% нафтового коксу, 4% вугілля, 6% відпрацьованого масла та 1% LFO в SC 3. У SC 4 розрахункова частка енергії палива становить 70% SRF і 30% нафтового коксу. Результат аналізу чутливості щодо збільшення попиту на енергію у виробництві цементу (див.

Рисунок 2.4) показує, що викиди ПГ зросли від 3% до 6% у всіх сценаріях, коли попит на енергію зростає на 13% з 3000 МДж.

Рисунок 2.4. Порівняння викидів парникових газів зі сценаріями вищих потреб у тепловій енергії.

Споживання теплової енергії на цементному заводі залежить від частки клінкеру в цементі. Аналіз чутливості показав, що споживання теплової енергії для 1 Мт цементу зменшилося з 3000 МДж до 2600 МДж, коли частка клінкеру в цементі була зменшена з 80% до 70%. Оскільки потреба в тепловій енергії зменшується, а функціональний блок залишається незмінним, частка енергії палива в тепловій енергії змінюється до 62% для SRF, 31% для нафтового коксу, 3% для вугілля та 4% для відпрацьованого масла в SC 3. SC 4, розрахункова частка паливної енергії становить 92% SRF та 8% нафтового коксу. Раніше обговорювалося, що отримати понад 80% паливної енергії з SRF було економічно та технічно складно. Таким чином, 92% SRF у частці теплової енергії вимагає подальшого технічного розвитку та бюджету для відповідного проектування станції.

Результати аналізу чутливості на [рисунку 2.5](#) показують, що зменшення клінкеру в цементі може спричинити скорочення викидів парникових газів не лише від процесу кальцинування, але й від процесу споживання теплової енергії та всіх інших процесів, пов'язаних із процесом споживання теплової енергії. Результати показали, що скорочення частки клінкеру на 13% призвело до скорочення викидів парникових газів на 9-14% за всіма сценаріями. Зола, доменний шлак, кремнеземний пил і вапняковий порошок можуть використовуватися як замітники клінкеру (CEMBUREAU, 2013). Таким чином, зменшення частки клінкеру в цементі може змінити тип цементу та вплинути на визнання на ринку. Тим не менш, використання матеріалів-замінників клінкеру залежить від наявності цих матеріалів. Наприклад, наявність золи залежить від електростанцій, що працюють на вугіллі, а постачання доменного шлаку залежить від виробництва чавуну та сталі.

Рисунок 2.5. Порівняння викидів парникових газів внаслідок двох різних часток клінкеру.

У цьому дослідженні викиди парникових газів від системи значною мірою залежать від додавання в систему електроенергії та централізованого тепла, і більше на них впливає додавання централізованого теплопостачання. Результати, представлені на [рисунок 2.6](#), показують, що на загальні викиди ПГ у сценаріях можна вплинути шляхом зміни додаткового джерела централізованого теплопостачання. Результати показують, що в SC 1, SC 3 і SC 4 викиди від ураженої системи збільшуються, коли додаткове тепло виробляється з вугілля, і зменшуються, коли воно отримується з твердої біомаси. Спрямування КІВ на сміттєспалювальний завод є кращим, ніж сміттєзвалище, коли теплова енергія додається з виробничої суміші або вугілля. Навпаки, екологічно не вигідно спалювати КІВ на сміттєспалювальних заводах, коли додаткове тепло отримується з твердої біомаси. Таким чином, чим більше відновлюваних джерел тепла в регіоні, тим більш стійким є використання SRF як палива у виробництві цементу.

Рисунок 2.6. Зміни у викидах парникових газів через різницю в джерелах тепла.

Підводячи підсумок, це дослідження показує, що найкращим варіантом досягнення найвищої користі для навколишнього середовища від виробництва цементу, а також системи, на яку впливає використання палива в цементній промисловості, є використання 80% SRF у цементній промисловості. Для цього також потрібне надходження теплової енергії 3000 МДж/Мт цементу і співвідношення клінкеру до цементу 70%. Скорочення викидів при використанні SRF можна отримати у випадку, коли використовується суха обертова піч з попереднім нагрівачем і попереднім кальцинатором. Мокра обертова піч потребує більше теплової енергії, ніж суха обертова піч, що може призвести до більшого споживання палива та, таким чином, до збільшення кількості викидів. Крім того, для мінімізації

викидів від транспортування слід використовувати SRF місцевого виробництва.

ВИСНОВКИ

1. Вивчення ринку виробництва та кінцевого використання вторинного палива є складним завданням. Це частково залежить від безлічі найменувань палива. Паливо, отримане з відходів WDF, RDF і SRF лише деякі з цих назв використовуються на міжнародному рівні, якщо додати національні RPF, CSS, CDR, CSR, це навіть складніше.
2. Додаткова вартість SRF порівняно з RDF полягає не в першу чергу в кращій якості, а в тому, що SRF за замовченням (оскільки вони виробляються відповідно до встановлених стандартів) краще задокументовані, а їх якість є відомою. RDF зазвичай є більш невизначеними у характеристиках, та порівняння між різними RDF може показати диференційовані показники складу та якості. Незважаючи на те, що різні країни використовували маркування на зразок «SRF преміум», важко розрізнити клас високої та низької якості.
3. Висока ПТЗ SRF потенційно не сумісна з великою часткою біомаси у SRF, оскільки висока ПТЗ часто пов'язана з вмістом пластику. Однак, говорячи про високу якість, можливо, було б простіше послатися на низькі рівні забруднень, таких як хлор або ртуть.
4. Відповідно до результатів роботи, SRF може відігравати важливу роль у зниженні GWP системи виробництва цементу, а також зменшувати GWP системи шляхом перенаправлення КІВ із звалищ або сміттєспалювальних заводів на цементні заводи. GWP обох систем зменшився разом із збільшенням частки SRF від споживання теплової енергії.
5. Аналіз чутливості глобальної системи показав, що переваги для навколишнього середовища від використання SRF на цементних заводах можна збільшити шляхом зниження співвідношення клінкеру до цементу та потреби в тепловій енергії для виробництва клінкеру.

6. Незважаючи на те, що використання SRF має значний вплив на зниження GWP від виробництва цементу та системи управління КІВ, слід мати на увазі певні аспекти. По-перше, ПТЗ SRF залежить від складу відходів, що також впливає на коефіцієнт викидів CO₂. Фракції відходів з високим вмістом викопного вуглецю зазвичай мають вищу ПТЗ порівняно з фракціями з вищим вмістом біогенного вуглецю, що означає, що SRF з вищою ПТЗ також має вищий коефіцієнт викидів CO₂, і навпаки. З іншого боку, нижчий ПТЗ означає, що для забезпечення такої ж кількості паливної енергії, як і для SRF з вищим ПТЗ, потрібно більше SRF, що зменшує вигоду від нижчого коефіцієнта викидів CO₂. По-друге, для країн із середнім і низьким рівнем доходу, щоб досягти екологічних переваг від використання SRF, подібних до тих, що є в країнах з високим рівнем доходу, слід розробити інтегровану систему управління відходами, включаючи збір відходів із практикою розділення.