



Kauno technologijos universitetas
Cheminės technologijos fakultetas

Būvio ciklo vertinimas cemento gamybos pramonėje
Baigiamasis magistro projektas

Eglė Kazickaitė
Projekto autorė

Doc. Inga Stasiulaitienė
Vadovė

Kaunas, 2020



Kauno technologijos universitetas
Cheminės technologijos fakultetas

Būvio ciklo vertinimas cemento gamybos pramonėje

Baigiamasis magistro projektas
Aplinkosaugos inžinerija (6211EX003)

Eglė Kazickaitė

Projekto autorė

Doc. Inga Stasiulaitienė

Vadovė

Prof. Linas Kliučininkas

Recenzentas

Kaunas, 2020



Kauno technologijos universitetas

Cheminės technologijos fakultetas

Eglė Kazickaitė

Būvio ciklo vertinimas cemento gamybos pramonėje

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad mano, Eglės Kazickaitės, baigiamasis projektas tema „Būvio ciklo vertinimas cemento gamybos pramonėje“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

Aš suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)

Kazickaitė Eglė. Būvio ciklo vertinimas cemento gamybos pramonėje. Magistro baigiamasis projektas / vadovė doc. Inga Stasiulaitienė; Kauno technologijos universitetas, Cheminės technologijos fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė): aplinkos inžinerija (E03), inžinerijos mokslai (E).

Reikšminiai žodžiai: cementas, pramonė, anglies dioksidas, surinkimas, būvio ciklo vertinimas.

Kaunas, 2020. 61 p.

Santrauka

Cementas yra viena iš gausiausiai gaminamų statybinių medžiagų, kuriai reikia didelių išteklių ir kurios gamyba daro didelį poveikį aplinkai. Net 5% viso išmetamo anglies dioksido kiekio kyla iš cemento gamybos. Šiuo metu anglies dioksido koncentracija atmosferoje yra 0,041%, tai yra aukščiausia per 650 000 metų ir sparčiai vis didėja, todėl reikia ieškoti galimybių, kaip mažinti ir panaudoti CO₂. Viena iš galimybių yra anglies dioksido surinkimas, naudojant „Po degimo“ sistemą. Tačiau reikia įvertinti, ar naudojant surinkimo sistemas, nebus padaroma didesnė žala aplinkai. Todėl šiame magistro baigiamajame projekte buvo atliktas būvio ciklo vertinimas cemento gamybai ir analizuojamos trys alternatyvos: nesurenkant anglies dioksido ir paleidžiant jį į atmosferą, surenkant anglies dioksidą, naudojant „Po degimo“ sistemą su monoetanolamino tirpikliu ir surenkant, naudojant tą pačią sistemą, tačiau pakeičiant tirpiklį į dietanolaminą.

Charakterizuoti rezultatai parodė, kad nesurenkant anglies dioksido, didžiausias neigiamas poveikis iš cemento gamybos pastebimas klimato kaitai – 3,68 karto didesnis nei naudojant antrą alternatyvą ir 3,63 karto nei naudojant trečią. Tačiau kitoms kategorijoms pirma alternatyva daro mažiausią poveikį. Panaudojant surinkimą su monoetanolaminu, pastebima, kad iš visų kategorijų didžiausias neigiamas poveikis pastebimas jūrų eutrofikacijai – 1,1 karto didesnis, nei naudojant dietanolamino tirpiklį ir 4,5 karto nei nenaudojant jokios surinkimo sistemos. Likusiom kategorijom didžiausią poveikį daro sistema, kai anglies dioksidas surenkamas, panaudojant dietanolaminą. Rezultatų normalizavimas parodė, kad visos trys alternatyvos daro didžiausią poveikį žmogaus sveikatai, o mažiausią ištekliams. Atlikus būvio ciklo vertinimą cemento gamybai, nustatyta, kad naudojant anglies dioksido surinkimo sistemas, klimato kaitos kategorija mažėtų, tačiau poveikis kitoms kategorijoms būtų didesnis. Lyginant monoetanolamino ir dietanolamino tirpiklius, veiksmingiau būtų naudoti monoetanolaminą, kadangi jo kiekio ir šilumos sąnaudų reikėtų mažiau bei daugumai kategorijų jis daro mažesnę neigiamą poveikį.

Kazickaite Egle. Life Cycle Assessment in the cement industry. Master's Final Degree Project / supervisor doc. Inga Stasiulaitiene; Faculty of chemical technology, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): environmental engineering (E03), engineering sciences (E).

Keywords: cement, industry, carbon dioxide, capture, life cycle assessment.

Kaunas, 2020. 61.

Summary

Cement is one of the most abundant building materials, which requires significant resources and the production of which has a significant impact on the environment. As much as 5% of total carbon emissions come from cement production. At present, the concentration of carbon dioxide in the atmosphere is 0.041%, the highest in 650,000 years and growing rapidly, so opportunities need to be explored to reduce and use CO₂. One option is to capture carbon dioxide using a "post-combustion" system. However, it needs to be assessed whether the use of collection systems will not cause more damage to the environment. Therefore, this master thesis carried out a life cycle assessment for cement production and analyzed three alternatives: cement production without carbon dioxide capture, carbon capture using post-combustion system with a monoethanolamine solvent, and collection using the same system but with a solvent changed to diethanolamine.

The characterized results showed that without carbon capture, the largest negative impact of cement production on climate change is 3.68 times higher than with the second alternative and 3.63 times higher than with the third. For other categories, however, the first alternative has the least impact. When used with monoethanolamine, the highest adverse effect on marine eutrophication was observed in all categories, 1.1 times higher than with diethanolamine solvent and 4.5 times higher than without any collection system. For the remaining categories, the system is most affected when the carbon dioxide is captured using diethanolamine. Normalization of the results showed that all three alternatives have the greatest impact on human health and the least on resources. A life cycle assessment of cement production has shown that the use of carbon capture systems would reduce the climate change category, but the impact on other categories would be significant. When comparing monoethanolamine and diethanolamine solvents, the use of monoethanolamine would be more efficient, as it would require less quantity and heat consumption and have a lower negative impact on most categories.

Turinys

Lentelių sąrašas	8
Paveikslų sąrašas	9
Santrumpų sąrašas	11
Įvadas	12
1. Literatūros apžvalga	13
1.1. Cemento gamybos pramonė	13
1.1.1. Cemento gamybos procesas.....	13
1.2. Anglies dioksido susidarymas ir emisijos	15
1.3. Daugiausiai teršiančios pasaulio šalys.....	15
1.4. Anglies dioksido poveikis klimatui	16
1.5. Tarptautiniai įsipareigojimai klimato kaitos srityje.....	16
1.5.1. Kioto protokolas	16
1.5.2. Paryžiaus klimato susitarimas ir ES įsipareigojimai klimato kaitos srityje.....	17
1.5.3. Anglies dioksido emisijų mažinimas cemento pramonėje	17
1.6. Anglies dioksido emisijų mažinimo galimybės.....	18
1.6.1. Švelninimas	18
1.6.2. Prisitaikymas	18
1.7. Anglies dioksido surinkimas, saugojimas ir panaudojimas	19
1.7.1. Surinkimas	19
1.7.2. Saugojimas.....	22
1.7.3. Panaudojimas.....	23
1.8. Būvio ciklo vertinimo principai.....	25
1.8.1. Cemento gamybos aplinkosauginis vertinimas būvio ciklo vertinimo metodu.....	26
2. Tyrimų metodika	28
2.1. Būvio ciklo vertinimas.....	28
2.1.1. Tyrimo tikslų ir apimties apibrėžimas	28
2.1.2. Būvio ciklo inventorinė analizė (BCIA).....	30
2.1.3. Būvio ciklo poveikio vertinimas (BCPV)	33
2.1.4. Interpretavimas	34
2.2. Jautrumo analizė	35
3. Tyrimų rezultatai	36
3.1. Inventorinės analizės rezultatai	36
3.2. Poveikio vertinimas charakterizuojant rezultatus.....	39
3.3. Poveikio vertinimas normalizuojant rezultatus	44
3.4. Jautrumo analizė	48
Išvados	51
Literatūros sąrašas	52
Priedai	58
1 priedas. Cemento gamybos poveikio aplinkai žalos įvertinimas, nenaudojant anglies dioksido surinkimo sistemos	58
2 priedas. Cemento gamybos poveikio aplinkai žalos įvertinimas, naudojant anglies dioksido surinkimo sistemą su monoetanolamino tirpikliu.....	59
3 priedas. Cemento gamybos poveikio aplinkai žalos įvertinimas, naudojant anglies dioksido surinkimo sistemą su dietanolamino tirpikliu.....	60

4 priedas. Cemento gamybos poveikio aplinkai žalos įvertinimas ir palyginimas visų alternatyvų . 61

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Monoetanolamino ir dietanolamino tirpiklių savybių palyginimas	31
2 lentelė. Inventorinė cemento gamybos duomenų lentelė, kai nenaudojamas anglies dioksido surinkimo procesas.	31
3 lentelė. Inventorinė cemento gamybos duomenų lentelė, kai naudojamas „Po degimo“ anglies dioksido surinkimo proceso metodas, panaudojant monoetanolamino tirpiklį.	32
4 lentelė. Inventorinė cemento gamybos duomenų lentelė, kai naudojamas „Po degimo“ anglies dioksido surinkimo proceso metodas, panaudojant dietanolamino tirpiklį.	32
5 lentelė. Inventorinė įvesties ir išvesties cemento gamybos duomenų lentelė, kai nenaudojamas anglies dioksido surinkimo procesas.	36
6 lentelė. Inventorinė įvesties ir išvesties cemento gamybos duomenų lentelė, kai naudojamas „Po degimo“ anglies dioksido surinkimo proceso metodas, panaudojant monoetanolamino tirpiklį.	37
7 lentelė. Inventorinė įvesties ir išvesties cemento gamybos duomenų lentelė, kai naudojamas „Po degimo“ anglies dioksido surinkimo proceso metodas, panaudojant dietanolamino tirpiklį.	37

Paveikslų sąrašas

1 pav. Cemento gamybos technologinė schema	14
2 pav. Kalcinavimo procesas	15
3 pav. Anglies dioksido pagrindinės surinkimo technologijos	20
4 pav. Anglies dioksido panaudojimo būdai	24
5 pav. Būvio ciklo vertinimo principinė schema	26
6 pav. Būvio ciklo vertinimo struktūra (LST ISO 14044:2007).....	28
7 pav. Cemento gamybos sistemos ribos, kai nenaudojamas anglies dioksido surinkimo procesas .	29
8 pav. Cemento gamybos sistemos ribos, kai naudojamas „Po degimo“ anglies dioksido surinkimo proceso metodas, panaudojant monoetanolamino tirpiklį	29
9 pav. Cemento gamybos sistemos ribos, kai naudojamas „Po degimo“ anglies dioksido surinkimo proceso metodas, panaudojant dietanolamino tirpiklį	30
10 pav. Medžiagų srautų schema, gaminant 1 toną cemento	30
11 pav. Cemento gamybos poveikio aplinkai vertinimas, nenaudojant anglies dioksido surinkimo sistemos (charakterizuotas poveikis)	40
12 pav. Cemento gamybos poveikio aplinkai vertinimas, naudojant anglies dioksido surinkimo sistemą su monoetanolamino tirpikliu (charakterizuotas poveikis)	41
13 pav. Cemento gamybos poveikio aplinkai vertinimas, naudojant anglies dioksido surinkimo sistemą su dietanolamino tirpikliu (charakterizuotas poveikis)	42
14 pav. Cemento gamybos poveikio aplinkai vertinimas ir palyginimas visų procesų (charakterizuotas poveikis)	43
15 pav. Cemento gamybos poveikio aplinkai vertinimas, nenaudojant anglies dioksido surinkimo sistemos (normalizuotas poveikis).....	45
16 pav. Cemento gamybos poveikio aplinkai vertinimas, naudojant anglies dioksido surinkimo sistemą su monoetanolamino tirpikliu (normalizuotas poveikis).....	46
17 pav. Cemento gamybos poveikio aplinkai vertinimas, naudojant anglies dioksido surinkimo sistemą su dietanolamino tirpikliu (normalizuotas poveikis).....	47
18 pav. Cemento gamybos poveikio aplinkai vertinimas ir palyginimas visų procesų (normalizuotas poveikis)	48
19 pav. Cemento gamybos poveikio aplinkai normalizavimas, taikant jautrumo analizę	49
20 pav. Cemento gamybos, naudojant anglies dioksido surinkimo sistemą su monoetanolamino tirpikliu, poveikio aplinkai normalizavimas, taikant jautrumo analizę	49
21 pav. Cemento gamybos, naudojant anglies dioksido surinkimo sistemą su dietanolamino tirpikliu, poveikio aplinkai normalizavimas, taikant jautrumo analizę	50
22 pav. Cemento gamybos poveikis aplinkai, nenaudojant anglies dioksido surinkimo sistemos (žalos įvertinimo grafikas)	58
23 pav. Cemento gamybos poveikis aplinkai, nenaudojant anglies dioksido surinkimo sistemos (žalos įvertinimo duomenys).....	58
24 pav. Cemento gamybos poveikis aplinkai, naudojant anglies dioksido surinkimo sistemą su monoetanolamino tirpikliu (žalos įvertinimo grafikas).....	59
25 pav. Cemento gamybos poveikis aplinkai, naudojant anglies dioksido surinkimo sistemą su monoetanolamino tirpikliu (žalos įvertinimo duomenys)	59
26 pav. Cemento gamybos poveikis aplinkai, naudojant anglies dioksido surinkimo sistemą su dietanolamino tirpikliu (žalos įvertinimo grafikas).....	60

27 pav. Cemento gamybos poveikis aplinkai, naudojant anglies dioksido surinkimo sistemą su dietanolamino tirpikliu (žalos įvertinimo duomenys)	60
28 pav. Cemento gamybos poveikis aplinkai ir palyginimas visų alternatyvų (žalos įvertinimo grafikas).....	61
29 pav. Cemento gamybos poveikis aplinkai ir palyginimas visų alternatyvų (žalos įvertinimo duomenys)	61

Santrumpų sąrašas

AAS – anglies dioksido surinkimas ir saugojimas
AAP – anglies dioksido surinkimas ir panaudojimas
TEA – tarptautinė energetikos agentūra
UNFCCC – Jungtinių Tautų bendroji klimato kaitos konvencija
CLC – cheminio ciklo deginimas
CLR – cheminės grandinės pertvarkymas
DAC – tiesioginis oro surinkimas
EOR – naftos regeneravimas
EGR – dujų regeneravimas
BCV – būvio ciklo vertinimas
BCIA – būvio ciklo inventorinė analizė
BCPV – būvio ciklo poveikio vertinimas
MEA – monoetanolaminas
DEA – dietanolaminas

Ivadas

Žmogaus veikla yra pagrindinė globalinio atšilimo priežastis. Tarp šių žmogaus veiklų, energijos suvartojimas sudaro didžiausią šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisijos dalį. Anglies dioksidas tai atmosferos dujos, kurios susideda iš vieno anglies ir dviejų deguonies atomų [1, 2].

Šiuo metu anglies dioksido koncentracija atmosferoje yra 0,041%, tai yra aukščiausia per 650 000 metų ir sparčiai vis didėja, todėl reikia ieškoti galimybių, kaip mažinti ir panaudoti CO₂ [1, 2].

Pagrindinė to priežastis – iškastinio kuro deginimas, miškų kirtimas, pramonė ir net 5% viso išmetamo anglies dioksido kiekio kyla iš cemento gamybos. Cementas yra viena iš gausiausiai gaminamų statybinių medžiagų, kuriai reikia didelių išteklių ir kurios gamyba daro didelį poveikį aplinkai [3, 4].

2015 m. buvo priimtas Paryžiaus susitarimas dėl klimato kaitos, kuriuo siekiama mažinti išmetamųjų šiltnamio efektą sukeliančių dujų kiekį ir kad pasaulinis atšilimas nepadidėtų daugiau nei 2°C. Anglies dioksido emisija iki 2100 m. turi sumažėti beveik iki nulio, kad būtų išvengta negrįžtamos žalos mūsų aplinkai. Todėl dėmesys skiriamas anglies dioksido surinkimui ir panaudojimui, kuriuo siekiama naudoti CO₂ kaip žaliavą [1, 3, 4].

Darbo tikslas - atlikti cemento gamybos poveikio aplinkai vertinimą, remiantis būvio ciklo vertinimo metodika.

Darbo uždaviniai:

1. išanalizuoti mokslinę literatūrą apie anglies dioksido surinkimo metodus cemento gamyboje bei būvio ciklo vertinimą šioje pramonės srityje;
2. surinkti duomenis ir sudaryti cemento gamybai būvio ciklo vertinimo metodiką;
3. atlikti būvio ciklo vertinimą cemento gamybai, panaudojant anglies dioksido surinkimo sistemas bei jas palyginti;
4. pateikti išvadas.

1. Literatūros apžvalga

1.1. Cemento gamybos pramonė

Cementas yra viena iš gausiausiai gaminamų statybinių medžiagų, kuriai reikia didelių išteklių ir kurios gamyba daro didelį poveikį aplinkai. Pagrindinės žaliavos cemento gamybai yra kalkakmenis, molis, smėlis, geležies rūda, akmens anglis, naftos koksas bei gipsas. Šių žaliavų galima rasti daugelyje šalių, o pramonės plėtrą lemia miestų augimas, industrializacijos procesai, drėkinimo sistemų bei hidroelektrinių statyba [5, 6, 7].

Pasaulinė cemento gamyba pradėta 19 amžiuje, o nuo šeštojo dešimtmečio stabiliai auga. Iki 1855m cementą gamino tik Didžioji Britanija. Tais metais Vokietijoje taip pat buvo pastatyta cemento gamykla, o sekančiais metais gamyklos pastatytos ir Rusijoje bei Prancūzijoje. Cemento gamyba greitai išplito visoje Europoje, o apie 1870m gamyklos buvo pradėtos statyti ir Jungtinėse Amerikos Valstijose. 1890m pasaulyje jau buvo pagaminta 6,5mln tonų, 1913m – 40 mln tonų, 1940m – 74,8 mln tonų cemento. Ypač sparčiai cemento gamyba pradėjo plisti po antrojo pasaulinio karo ir jau 1950 – 1995 pasaulinė cemento gamyba jau buvo padidėjus 11,7 karto [7].

Lietuvoje cemento gamyba prasidėjo 1912m. Tais metais buvo įkurta Lietuvos cemento fabriko bendrovė ir 1914m buvo įkurtas fabrikas, kuriame buvo pradėta gaminti cementas iš vietinės žaliavos - kreidos ir molio. Per pirmąjį pasaulinį karą fabrikas buvo sugriautas ir cementas buvo importuojamas iš kitų šalių. 1952m pastatyta Akmenės cemento gamykla, kuri yra iki šiol. 2006m ši bendrovė priėmė sprendimą modernizuoti klinkerio gamybos technologiją ir iš šlapio klinkerio gamybos būdo, pakeitė į sausą. Įgyvendinus šį projektą, per metus klinkerio pagamina 1,5mln tonų. Ši technologija leido sumažinti kurio sąnaudas, kurie lemia į aplinką patenkančių teršalų kiekį [7, 8].

Cementas daugiausia naudojamas betonui gaminti. Betonas yra inertiškų mineralinių užpildų, pvz., smėlio, žvyro, smulkintų akmenų ir cemento, mišinys. Cemento vartojimas ir gamyba yra glaudžiai susiję su statybų veikla, taigi ir su bendra ekonomine veikla. Dėl cemento, kaip statybinės medžiagos, svarbos ir dėl geografinės pagrindinių žaliavų gausos cementas gaminamas beveik visose šalyse [5, 6].

1.1.1. Cemento gamybos procesas

Cemento gamyba yra daug energijos reikalaujantis gamybos procesas. Apskaičiuota, kad cemento pramonės suvartota energija sudaro apie 2% viso pasaulyje suvartojamos pirminės energijos arba beveik 5% viso pasaulio energijos suvartojimo [6].

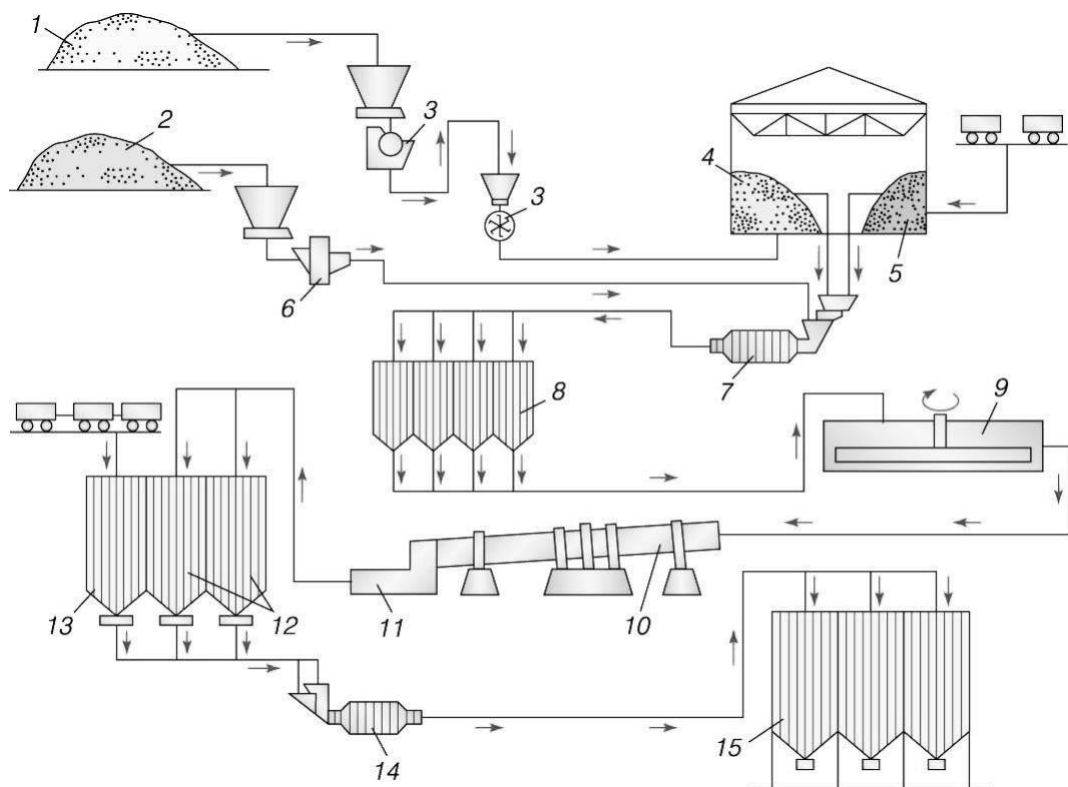
Cemento gamybos procesą galima išskirti į 10 pagrindinių etapų:

1. žaliavų eksploatavimas;
2. smulkinimas;
3. homogenizavimas ir neapdorotų medžiagų maišymas;
4. kaitinimas;
5. kalcinavimas;
6. klinkerio gamyba;

7. klinkerio aušinimas;
8. maišymas su gipsu;
9. cemento šlifavimas;
10. cemento saugojimas [9].

Žaliavos eksploatuojamos į sandėlius, o iš jų į smulkintuvus, kuriuose jos gerai susmulkinamos. Vėliau patenka į malūnus, kur medžiagos sumaišomos ir sumaišytos medžiagos patenka į krosnį, kur yra kaitinamos 1450-1500 °C temperatūroje. Cementą, apie 93–97%, sudaro medžiaga, vadinama klinkeriu. Klinkeris susidaro, kai žaliavos kalkakmenis dega esant aukštai temperatūrai cemento krosnyje. Didžioji išmetamų teršalų dalis būtent ir susidaro atliekant kalcinavimo procesą 4, 5 ir 6 etapuose, kai prasideda klinkerio gamyba. Šių proceso metu išleidžiamas kalkakmenyje įstrigęs CO₂. Paprastai dėl šio cheminio skilimo susidaro 60–65% visų išmetamų teršalų. Tada klinkeris sumalamas iki afininių miltelių ir sumaišomas su gipso ar panašiais sulfatais ir galbūt kitais priedais (pvz., Orą sulaikančiomis medžiagomis, pigmentais) [9, 10].

1 paveiksle pateikiama technologinė cemento gamybos schema, kurioje pavaizduota įrenginių eiliškumo tvarka.



1 pav. Cemento gamybos technologinė schema [11]

1 – klinties sandėlis; 2 – molio sandėlis; 3 – klinties smulkintuvas; 4 – maltos klinties sandėlis; 5 – priedų sandėlis; 6 – molio malūnas; 7 – šlapiojo malimo malūnas; 8 – vertikalieji baseinai; 9 – horizontalieji baseinai; 10 – sukamoji krosnis; 11 – aušintuvas; 12 – klinkerio silosai; 13 – gipso silosas; 14 – cemento malūnas; 15 – cemento silosai [11].

Proceso metu CO₂ susidaro kalcinuojant ir procesą galima išreikšti šia lygtimi:



$$1\text{kg} = 0,56\text{kg} + 0,44\text{kg}$$

2 pav. Kalcinavimo procesas [4]

CaO dalis klinkeryje sudaro 64–67%. Likusią dalį sudaro geležies oksidai ir aliuminio oksidai. Taigi klinkerio gamybos metu išmetama maždaug 0,5 kg CO₂/kg klinkerio. Konkretus proceso metu išmetamas CO₂ kiekis cemento gamyboje priklauso nuo klinkerio ir cemento santykio. Šis santykis paprastai kinta nuo 0,5 iki 0,95 [4].

Klinkerio gamyboje daugiausia naudojamas daug anglies reikalaujantis kuras. Dėl išmetamųjų taršos šaltinių ir dėl elektros energijos gamybos išmetamų teršalų kiekis cemento pramonėje yra pagrindinis išmetamo anglies šaltinis, todėl vertas dėmesio vertinant anglies išmetimo mažinimo galimybes [6].

Negalima užkirsti kelio šiems CO₂ išmetimams, nes jie yra būdingi gaminant cemento klinkerius. Tai yra viena iš priežasčių, kodėl anglies dioksido sugavimas yra būtinas, norint sumažinti betono pramonės išmetamą CO₂ kiekį. Pagamintame produkte, cimente, yra maždaug 66% CaO, 20% SiO₂, o likusi dalis yra įvairaus laipsnio geležies, aliuminio ir sieros oksidai. Šios sudedamosios dalys sudaro keletą skirtingų mineralinių fazių cemento klinkeryje. Svarbios cemento mineralinės fazės yra: trikalcio silikatas ((CaO) 3 · SiO₂ ir sudaro 45–75%), dikalcio silikatas ((CaO) 2 · SiO₂ ir sudaro 7–32 %), trikalcio aluminatas ((CaO) 3 · Al₂O₃ ir sudaro 0–13%), kalcio aluminoferitas ((CaO) 4 · Al₂O₃ · Fe₂O₃ ir sudaro 0–18%) ir kalcio sulfato dihidratas (dar vadinamas gipsu, (CaSO₄) · 2 H₂O, kuris sudaro 2–10%) [12].

1.2. Anglies dioksido susidarymas ir emisijos

Žmogaus veikla yra pagrindinė globalinio atšilimo priežastis. Tarp šių žmogaus veiklų energijos suvartojimas sudaro didžiausią šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisijos dalį. Iki 2014m CO₂ koncentracija yra maždaug 40% didesnė nei 1800m viduryje. Visame pasaulyje anglies dioksido deginimas vis dar yra pigiausias būdas gaminti elektros energiją [13].

Anglies dioksidas be cemento gamybos taip pat susidaro deginant iškastinį kurą ir iš žaliavų konversijos. Mažiau jo susidaro iš elektros energijos vartojimo, tačiau daroma prielaida, kad elektros energija taip pat gaunama iš iškastinio kuro [14].

1.3. Daugiausiai teršiančios pasaulio šalys

Daugiausiai anglies dioksido susidaro turtingose šalyse, kuriuose daugiausiai naudojamas iškastinis kuras: JAV, Kinija, Indija, Saudo Arabija, Pietų Afrika, Iranas, Brazilija ir Meksika, o šalys, kurios mažiausiai teršia aplinką iš iškastinio kuro yra: Nigerija, Venesuela, Kuveitas, Angola, Malaizija ir Libija [15].

Tačiau išsivysčiusiose šalyse, kurios išmeta pernelyg daug šiltnamio efektą sukeliančių dujų, klimato kaitos poveikis nebus jaučiamas taip stipriai, nes politikos ir infrastruktūros sistemos yra geriau pasirengusios susidoroti su klimato kaitos poveikiu [16].

1.4. Anglies dioksido poveikis klimatui

Anglies dioksidas yra svarbiausios ilgalaikės šiltnamio efektą sukeliančios dujos žemės atmosferoje. Pramoninės revoliucijos atropogeniniai teršalai, pirmiausia naudojant iškastinį kurą ir miškų naikinimą, sparčiai didino jo koncentraciją atmosferoje, kas lemia klimato kaitą. Klimato kaita yra ilgalaikis pokytis tam tikroje vietoje, regione ar visoje planetoje. Tai gali būti vidutinės temperatūros, vėjuotumo ar kritulių kiekio pokyčiai. Klimato kaita gali apimti įvairios trukmės laikotarpius, nuo dešimtmečių iki milijonų metų. Žemės klimatas labai pasikeitė dėl geologinės praeities, kuomet vidutinė temperatūra buvo net 58°C laipsniais mažesnė už dabartinę. Šiuos pokyčius sukėlė saulės radiacijos pokyčiai bei šiltnamio efektas dėl anglies dioksido. Per pastaruosius 400 000 metų anglies dioksido koncentracija pakito nuo 180 iki 310ppm. O vidutinė oro temperatūra pasaulyje per pastaruosius 100 metų pakilo nuo 1,4 iki 5,8°C laipsnių. Pasaulinio atšilimo grėsmė nuolat auga [17].

Taip pat anglies dioksidas sukelia ir vandenyno rūgštėjimą, nes jis ištirpsta vandenyje ir sudaro anglies rūgštį [17].

Remiantis Didžiosios Britanijos moksliniais tyrimais, manoma, kad CO₂ emisija iki 2080m padidės net 30 kartų. Potvynių lygis Anglijoje, kuris dabar tikėtinas tik kartą per 100 metų, galės pasikartoti kas 3 metus. Potenciali ekonominė žala gali siekti dešimtis milijardų svarų per metus [18].

1.5. Tarptautiniai įsipareigojimai klimato kaitos srityje

Jungtinių Tautų bendroji klimato kaitos konvencija (UNFCCC) yra pagrindinis tarptautinis susitarimas klimato politikos srityje. Tai viena iš trijų konvencijų, priimtų 1992 m. Rio de Žaneire vykusiame “Žemės aukščiausiojo lygio susitikime”. Iki dabar ją yra ratifikavusios 195 šalys. Iš pradžių tai buvo būdas šalims dirbti kartu, siekiant apriboti pasaulinės temperatūros kilimą bei klimato kaitą ir įveikti šių reiškinių poveikį [19].

Taryboje šiuo metu nagrinėjami du klausimai, susiję su UNFCCC:

- Kioto protokolo Dohos pakeitimo dėl antrojo laikotarpio – nuo 2013 m. iki 2020 m. – įsipareigojimų ratifikavimas
- Paryžiaus klimato susitarimas – naujas pasaulinis susitarimas dėl klimato kaitos, apimantis visas UNFCCC šalis, jo ratifikavimas, įgyvendinimas ir įsigaliojimas 2020 m. [19].

1.5.1. Kioto protokolai

XXa. 10-ojo dešimtmečio viduryje UNFCCC šalys signatarės sutarė, kad norint sumažinti išmetamųjų teršalų kiekį būtini griežtesni reikalavimai. 1997 m. jos susitarė dėl Kioto protokolo, kuriame buvo nustatyta, kaip teisiškai mažinti išmetamųjų teršalų kiekius išsivysčiusioms šalims [19].

Antrasis Kioto protokolo įsipareigojimų etapas prasidėjo 2012m sausio 1d., o jo pabaiga numatoma 2020m. Šiuos įsipareigojimus priėmė 38 išsivysčiusios šalys, įskaitant ir Europos Sąjungos 28 valstybes. Šiam antrajam etapui yra taikomas Dohos pakeitimas, pagal kurį visos įsipareigojusios valstybės privalo sumažinti išmetamųjų teršalų kiekį tiek, kad jis būtų bent 18% mažesnis nei 1990m. Europos sąjunga yra įsipareigojusi išmetamųjų teršalų kiekį sumažinti net 20%, nei buvo 1990m. [20].

Kioto protokolas taip pat turi ir trūkumų ir pagrindinis yra tai, kad mažinti išmetamuosius teršalus reikalaujama tik išsivysčiusių šalių, o Jungtinės Valstijos nėra pasirašiusios Kioto protokolo. Kanada pasitraukė iš Kioto protokolo prieš pat pirmojo etapo pabaigą, o Rusija, Naujoji Zelandija bei Japonija nebedalyvauja antrame etape. Taigi šis Kioto protokolas šiuo metu taikomas tik apie 14% visų pasaulio išmetamų teršalų mažinimui. Tačiau daugiau nei 70 viso pasaulio besivystančių ir išsivysčiusių valstybių yra priėmusios įvairių neprivalomų įsipareigojimų, siekiant mažinti ir apriboti išmetamų teršalų kiekį [20].

1.5.2. Paryžiaus klimato susitarimas ir ES įsipareigojimai klimato kaitos srityje

Paryžiaus klimato susitarimo konferencija dėl klimato kaitos vyko 2015m nuo lapkričio 30d. iki gruodžio 11d. [19].

Gruodžio 12d. vartybės nutarė dėl pasaulinio klimato kaitos mažinimo. Šio susitarimo tikslas yra, kad visuotinis atšilimas nepadidėtų daugiau nei 2°C [19].

Paryžiaus klimato susitarimas pradėjo galioti nuo 2016m. lapkričio 4d. ir jį pasirašė 55 valstybės, kurių išmetamųjų teršalų kiekis sudaro bent 55% viso pasaulio išmetamų teršalų kiekio. Europos Sąjungos visos valstybės pasirašė šį susitarimą [19].

Pagal Paryžiaus susitarimą, kiekviena jį pasirašiusi valstybė, privalo išsikelti konkrečius tikslus, kurie padės mažinti klimato kaitą ir išmetamųjų teršalų kiekį. Europos Sąjungos tikslas yra, kad iki 2030m. būtų sumažintas šiltnamio efektą sukeliančių medžiagų kiekis bent 40%, palyginti su 1990m. [19, 20].

Šis įsipareigojimas turi būti atnaujintas kas penkis metus. Daugelis šalių, įskaitant ir Europos Sąjungos valstybes, pirmą kartą apie savo tikslus pranešė 2015m., todėl griežtesnių įsipareigojimų tikimasi iki 2020m. pabaigos. Europos Sąjunga buvo viena iš pirmųjų, kuri pranešė apie savo tikslus sumažinti išmetamųjų teršalų kiekį 40% iki 2030m. Artėjant antrajam susitarimo etapui, vis labiau svarstoma griežtinti Europos Sąjungos tikslus, susijusius su klimato kaitos mažinimu [19, 20].

1.5.3. Anglies dioksido emisijų mažinimas cemento pramonėje

Tarptautinė energijos agentūra (TEA, 2009) nustato keturis pagrindinius sprendimus, kaip sumažinti CO₂ išmetimą cemento pramonėje:

- šiluminio ir elektros energijos efektyvumo pagerinimas;
- alternatyviųjų degalų naudojimas;
- klinkerio pakeitimas;
- anglies dioksido surinkimas ir saugojimas (AAS) ir anglies dioksido surinkimas ir panaudojimas (AAP) [5, 21].

2016 m. Pasaulinė gamyba siekė 4,2 milijardo tonų, o tai jau viršija TEA prognozes 2050 m. Anksčiau TEA prognozavo, kad iki 2050 m. Bus pagaminta 3,69–4,40 milijardų tonų produkcijos. Cemento pramonė yra viena iš daugiausiai energijos suvartojančių ir daug CO₂ išmetančių pramonės šakų, ji yra antras pagal dydį CO₂ išmetimo šaltinis, išmetantis maždaug 5% viso šiltnamio efektą sukeliančių dujų kiekio. Augant cemento gamybai, didėja ir CO₂ išmetimas. TEA cemento technologijos gairėse

numatyta, kad cemento pramonė iki 2050 m. Galėtų sumažinti 18% tiesioginių išmetamųjų teršalų, palyginti su dabartiniu lygiu. Norint pasiekti šį išmetamųjų teršalų mažinimo tikslą, anglies dioksido surinkimui ir saugojimui (arba jo panaudojimui) turėtų tekti 56% išmetamųjų teršalų, o kiti sumažinimai priklausytų nuo padidėjusio energijos vartojimo efektyvumo, klinkerio kiekio sumažinimo ir alternatyvaus kuro naudojimo. TEA pabrėžia, kad esamų galimybių nepakanka, kad būtų galima sumažinti išmetamųjų teršalų kiekį, todėl reikėtų atsižvelgti į naujus produktus ir technologijas, įskaitant ir naujus cemento tipus. Be to, pagal ES energetikos veiksmų planą 2050 m, anglies dioksido surinkimas yra svarbi galimybė dekarbonizuoti kelias energijos reikalaujančias pramonės šakas, tokias kaip naftos perdirbimas, aliuminio lydymas ir cemento gamyba [5, 21, 22, 23].

1.6. Anglies dioksido emisijų mažinimo galimybės

Siekiant apsaugoti mūsų gyvenamąją aplinką ir sumažinti anglies dioksido kiekį, daugelis mokslininkų institutuose ir universitetuose tiria CO₂ aktyvumą įvairiais fiziniais ir cheminiais būdais [24].

Visame pasaulyje didėjančios gamtinės nelaimės būtent ir atsiranda dėl klimato kaitos. Kaip nurodo Jungtinių Tautų vystymo programa, kad norint mažinti anglies dioksidą, reikia veikti dabar, nes ateityje CO₂ kiekis tik didės [25].

Dažniausiai naudojami du būdai mažinti anglies dioksidą, tai yra:

- klimato kaitos poveikio mažinimas – švelninimas;
- susidorojimas su klimato kaitos poveikiu – prisitaikymas [26].

Nepaisant skirtingų lygių, kuriuose veikia prisitaikymo ir švelninimo strategijos, jos yra tarpusavyje susijusios ir turi būti naudojamos kartu, siekiant užtikrinti aukščiausius rezultatus [26].

1.6.1. Švelninimas

Švelninimas yra plačiai aptartas ir sėkmingai taikomas įvairiuose kontekstuose tarptautiniu, nacionaliniu, regioniniu, vietos ir netgi atskirais lygmenimis. Tai apima investicijas į infrastruktūrą ir atsinaujinančios energijos panaudojimą. Taip siekiant sumažinti klimato kaitą ir pagerinti energetinį saugumą ir energijos vartojimo efektyvumą. Švelninimo priemonės gali būti plataus masto – viešo ar privataus sektoriaus lygmeniu. Švelninimo strategijos dažnai apima abipusiai naudingus scenarijus: energijos suvartojimo mažinimą ir asmenų ar vyriausybių lėšų ar kitų išteklių taupymą. Nors švelninimas yra būtinas, tačiau dabar pripažįstama, kad ankstesnis iškastinio kuro vartojimas ir su juo susiję išmetimai ir toliau didins pažeidžiamumą [25].

Sunku numatyti, kaip bus reaguojama į klimato kaitą, įvertinus bendrąsias šiltnamio efektą sukeliančių dujų išmetimo ribojimo politikos sąnaudas ir naudą arba numatant. Taip pat sunku numatyti socialinius, ekonominius bei demografinius pokyčius [26].

1.6.2. Prisitaikymas

Prisitaikymas prie klimato kaitos nėra aiškus. Prisitaikymo strategijose reikalaujama ilgalaikių perspektyvų, kurios gali būti nepalankios vyriausybės sistemoms. Dabar prisitaikymas prie klimato kaitos gali būti suvokiamas, kaip pripažinimas, kad riboti viešieji ištekliai skiriami grėsmei, kuri nėra neišvengiama. Todėl, dėl nepakankamos infrastruktūros, klimato kaitos politika (beveik visais

lygmenimis) iki šiol didžiausią dėmesį skiria švelninimui, bet taip pat papildomai įtraukia ir prisitaikymą [26].

Skirtingai nuo klimato kaitos švelninimo, prisitaikymas yra tinkamiausiai įgyvendinamas vietos lygmeniu, kur vyksta konkrečios klimato kaitos realijos, priklausomai nuo įvairių veiksnių, tokių kaip: klimato ir geografiniai skirtumai, valdymo sistemos, viešoji infrastruktūra, išteklių prieinamumas ir t.t. [27, 28].

1.7. Anglies dioksido surinkimas, saugojimas ir panaudojimas

CO₂ surinkimo, saugojimo ir panaudojimo sąvokos dažnai naudojamos anglies dioksido valdymo ir klimato kaitos kontekste. AAS - tai technologijos, orientuotos į selektyvų CO₂ išmetimą iš dujų srautų, jų suspaudimą į itin kritinę būklę ir galiausiai jų transportavimą ir paleidimą geologinėse formose, įskaitant nusodrintą naftą, dujų rezervuarus ir vandenynus [29].

Nepaisant pažadų sušvelninti didelį anglies dioksido kiekį ir nepaisant didelių vyriausybės paskatų ir reguliavimo priemonių, didelės CO₂ surinkimo sąnaudos iš esmės paveikė jų plataus masto diegimą. Didelės sąnaudos visų pirma kyla dėl surinkimo ir suspaudimo, kuris sudaro 75% visų sąnaudų. Pagal TEA ataskaitą, CO₂ surinkimas labai prisidės prie išmetamųjų teršalų kiekio mažinimo [30].

AAP technologijos neseniai gavo daug dėmesio, nes CO₂, kaip nuolat atsinaujinanti anglies žaliava, būtų paversta vertingais produktais, o ne nuolat suskaidant. Anglies dioksidas laikomas atsinaujinančiu ištekliu, kad papildytų arba pakeistų įprastas naftos chemijos žaliavas [31].

Nepaisant didelių AAP teikiamų privalumų, palyginti su AAS, anglies dioksido konversija ir panaudojimas cheminėse reakcijose yra labai sudėtingas procesas [31].

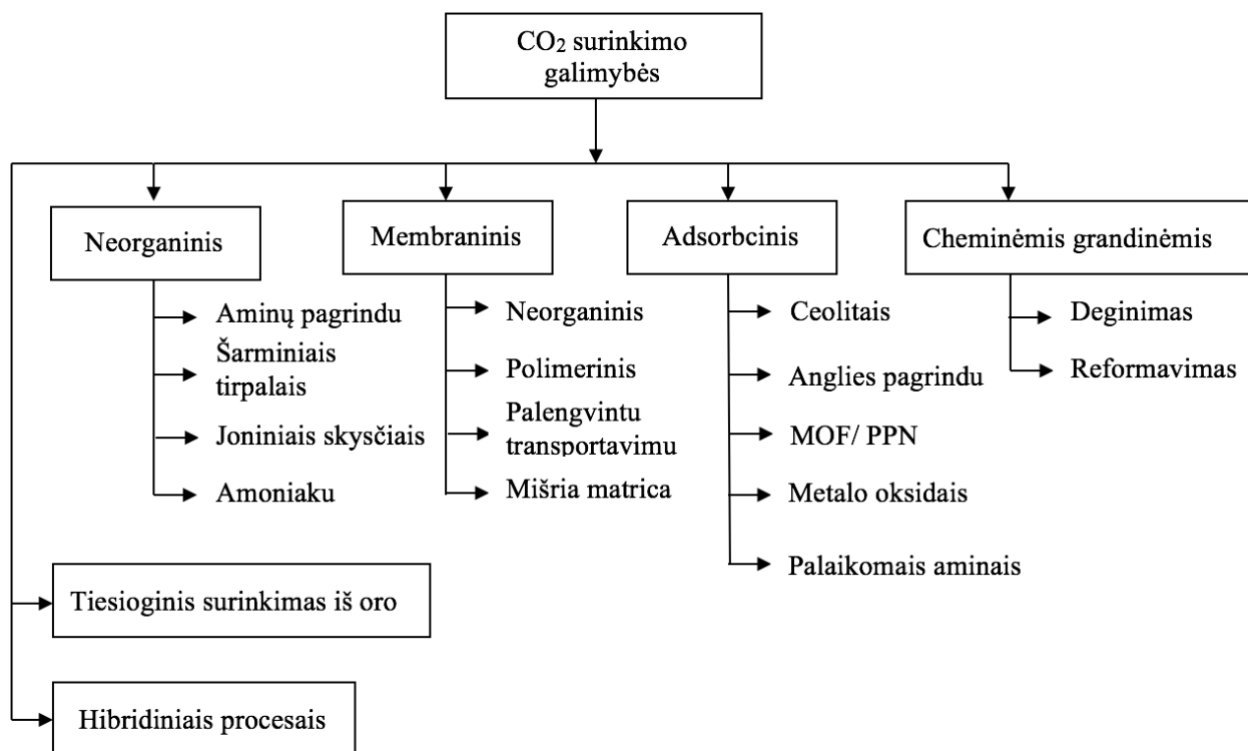
1.7.1. Surinkimas

Anglies dioksido surinkimo technologijos yra susijusios su tiesioginiu CO₂ išmetimu iš dujų srautų (po degimo) arba pažangių mažai anglies dioksido į aplinką išskiriančių sistemų kūrimu (prieš degimą) [32].

Technoekonominės analizės parodė, kad dabartinės CO₂ pajėgumų technologijos suvartoja daug energijos ir dėl to smarkiai sumažėja degimo efektyvumas bei padidėja elektros energijos kaina. Surinkimo technologijų pasirinkimas įvairiose pramonės šakose labai skiriasi, priklausomai nuo anglies dioksido šaltinio ir pramoninių procesų, išskiriančių dujas [33].

Paprastai vien tik elektrinės sudaro apie 45% viso pasaulio išmetamų CO₂ kiekio. Pramoninio anglies dioksido išmetimo technologijų diegimas po panaudojimo technologijos, turės didesnę ekonominę poveikį surinkimo išlaidų mažinimui nei kitos galimybės [16].

1 paveiksle parodyti įvairūs surinkimo būdai, kurie buvo ištirti pramonėje ir akademinėje bendruomenėje per pastaruosius kelis dešimtmečius.



3 pav. Anglies dioksido pagrindinės surinkimo technologijos [34]

Absorbcinis anglies dioksido surinkimas

Labiausiai ištirtas atskyrimo metodas naftos ir chemijos pramonėje apima absorbciją cheminėmis ar fizinėmis medžiagomis. Ši technologija buvo intensyviai naudojama tiek po degimo (su cheminiais tirpikliais), tiek ir prieš degimą, iš anksto surinkus (su fiziniais tirpikliais). Dažniausiai naudojamas cheminis absorbcavimas vandeniniu amoniaku, amino pagrindu naudojamais tirpikliais, pvz: monoetanoliumu, dietanolaminu bei šarminiais tirpikliais, tokiais kaip NaOH [35, 36].

Nors absorbcija yra senas ir nusistovėjęs atskyrimo metodas, dėl kurio gaunamas didelis surinkimo efektyvumas, susidariusi energinė sankcija yra labai didelė daugiausiai dėl didelio energijos poreikio tirpiklio regeneravimui. [20] Šilumos integracija gali sumažinti energijos poreikį kai kuriose pramonės šakose, pvz: elektrinėse, cemento, geležies ar plieno gamyboje. Paprastai cheminė absorbcija priklauso nuo terminio svyravimo regeneracijos, todėl optimalus tirpiklių parinkimas su optimaliu terminiu ir fizinių savybių deriniu yra labai svarbus, kuriant efektyviai energiją naudojančią technologiją. Pavyzdžiui, piperizinas ir jo dariniai buvo pasiūlyti kaip alternatyva tradiciniams cheminiams tirpikliams, atsižvelgiant į jų aukštą našumą, greitą reakcijos kinetiką, mažą cheminį reaktyvumą ir mažą regeneracijos energiją [37].

Be medžiagų tobulinimo ir optimalaus tirpiklių pasirinkimo su geresniu energijos efektyvumu, proceso tobulinimai yra vienodai svarbūs, siekiant pagerinti naujos kartos absorbcijos technologijas. Šiuo atžvilgiu yra naujos kartos sugėrimo procesai su optimizuotomis procesų konfigūracijomis ir intensyvumu, kurie teikia šilumos integravimo strategijas [37].

Anglies dioksido surinkimas, naudojant membranas

Anglies dioksido surinkimas, naudojant membranas, yra taupesnis ir ekologiškesnis nei kiti atskyrimo metodai. Tačiau, skirtingai nuo kitų surinkimo būdų, membraniniu būdu surenkamas anglies dioksidas apima daugiapakopę operaciją ir srautų perdirbimą, kuris dažnai suvokiamas kaip problema, dėl kurios ši operacija tampa sudėtinga. Membraniniam CO₂ išskyrimui paprastai veikia nuolatinės, pastovios būklės sąlygos, o slėgio skirtumas per membraną skatina pralaidumo procesą. Membranos medžiaga, be jos konfiguracijos, morfologijos, sudėties ir veikimo sąlygų, yra svarbiausias veiksnys, lemiantis didelį dujų atskyrimo kiekį [38].

Įvairios neorganinės membranos, paprastai sudarytos iš ceolitų, metalo organinių karkasų, anglies molekulių sietų, keramikos ir keletų oksidų, buvo plačiai ištirtos dėl CO₂ surinkimo iš dujų ar kitų nuotekų srautų. Nors organinės membranos gali atlaikyti aukštą temperatūrą ir dažnai turi mechaninį stabilumą, jų didelės išlaidos vis dar trukdo jų prekybai. Neorganinės membranos dar nėra plačiai naudojamos, nes jas brangu pagaminti, jos mažiau stabilios ir mažiau patikimos. Polimerinės membranos, kurias galima laisvai suformuoti į tuščividurio pluošto modulius, turi didelį potencialą didelės apimties pramoninėms reikmėms. Be to, organinės membranos negali pasiekti tokio didelio membranų pakavimo tankio, kaip polimerinės [39].

Norint, kad polimerinės membranos būtų ekonomiškai efektyvios, reikalingas CO₂/N₂ selektyvumas 200 ir turi būti išlaikytas santykinai dideli pralaidumas. Didelis pralaidumas pašalina didelės membranos ploto poreikį priimtino atskyrimo greičiui, o tai sumažina atskyrimo proceso kapitalo sąnaudas. Vienas iš būdų, kaip įveikti tradicinių polimerinių membranų problemas, yra naudoti vidinius mikroporozės polimerus, kuriuose yra didelių laisvų porų polimerinėje matricoje, kuri leidžia didesnę anglies dioksido srautą [40].

Adsorbcinis anglies dioksido surinkimas

CO₂ surinkimas per akytas kietas medžiagas suteikia perspektyvų metodą, leidžiantį selektyviai pašalinti anglies dioksidą iš įvairių pramonės šakų, kurios išskiria dujas. Iki šiol įvairūs adsorbentai buvo išsamiai įvertinti dėl CO₂ surinkimo iš priešgaisrinių dujų ir išmetamų dujų. Paprastai naudojami adsorbentai klasifikuojami kaip aukštos temperatūros arba žemos temperatūros medžiagos. Pagrindinės aukštos temperatūros medžiagų klasės apima hidrotalcitus, šarminius arba šarminius žemės oksidus, tokius kaip kalcio oksidai, šarminiai silikatai ir cirkonatai. Žemos temperatūros adsorbentai apima įprastas akytas medžiagas, tokias kaip ceolilai, molekuliniai sietai, akyti polimerų tinklai ir kovalentinės organinės struktūros. Aukštos temperatūros adsorbentai yra visi chemisorbentai, o žemos temperatūros adsorbentai daugiausia yra fiziologiniai junginiai [41].

Nors adsorbciniu atskyrimu galima išpręsti daugumą adsorbcijos procesų apribojimų, esamos iki šiol sukurtos technologijos nėra ekonomiškai efektyvios dabartiniu jų vystymosi etapu. Didelio našumo adsorbentų projektavimas, kūrimas ir įvertinimas turėtų būti glaudžiai susietas su jų praktinių rezultatų ir proceso svarstymo įvertinimu. Taip pat, projektuojant, konfigūruojant ir optimizuojant bet kurį ciklinį procesą, turi būti atsižvelgta į specifinio adsorbento charakteristikas, kurios galiausiai bus naudojamos [42, 43].

Anglies dioksido surinkimas, naudojant chemines grandines

Cheminio ciklo deginimas (CLC) ir cheminės grandinės pertvarkymas (CLR) yra du procesai, kurie laikomi potencialiai ekonomiškai efektyviais CO₂ surinkimo būdais, turinčiais mažiausius energijos nuostolius, kuriuose CO₂ ir H₂O yra savaimė atskirti nuo išmetamųjų dujų. Jie taip pat gali labai sumažinti NO_x susidarymą reakcijos metu [44].

Šios technologijos naudoja metalo oksidą, kaip deguonies nešiklį deguonies cirkuliavimui tarp oro ir kuro reaktorių. Taigi, jų taikymas dideliu masto labai priklauso nuo tinkamo deguonies nešiklio prieinamumo. Didelis oksidacijos/ redukcijos aktyvumas, mechaninis stabilumas, aukštas lydymosi taškas, ilgalaikis stabilumas esant pakartotinai oksidacijai/ redukcijai, taip pat sąnaudos ir poveikis aplinkai yra pagrindinės metalų oksidų savybės cheminių grandinių procesams. Iš šių savybių svarbiausias kriterijus, į kurį reikia atsižvelgti, yra reaktyvumas oksidacijos ir redukcijos cikluose [44].

Tiesioginis anglies dioksido surinkimas iš oro

Tiesioginis CO₂ šalinimas iš aplinkos, vadinamas tiesioginiu oro surinkimu (DAC). Šis metodas galėtų sumažinti problemas, susijusias su dideliu anglies dioksido kiekio transportavimu iš teršėjų į tinkamas vietas. Skirtingai nuo įprastų surinkimo procesų, kurie nukreipti tik į didelio masto šaltinius ir geriausiu atveju gali sulėtinti atmosferos CO₂ koncentracijos didėjimo tempą, DAC, jei ji plačiai naudojama, gali sumažinti pati anglies dioksido kiekį. DAC procesui naudojami įvairūs vandeniniai hidroksidai, tokie kaip kalcio hidroksido tirpalas, NaOH ir KOH tirpalai bei kietos medžiagos, įskaitant šarmus ir amino funkcionalizuotus metalo oksidus [45, 46].

Anglies dioksido surinkimas, naudojant hibridinius procesus

Vienas iš perspektyviausių metodų, siūlančių ekonomišką, keičiamąjį ir tvarų surinkimo būdą, apima hibridinius atskyrimus, kurie sujungia du ar daugiau surinkimo posistemių. Hibridinės technologijos turi privalumų, kai lygiagrečiai arba nuosekliai yra du ar daugiau atskyrimo vienetų, siekiant padidinti atskyrimo efektyvumą, tuo pačiu sumažinant bendrąsias išlaidas [47, 48].

Vienas iš hibridinių procesų atskyrimo metodų yra naudoti hibridinio membraninio ir kriogeninio distiliavimo procesus. Šio proceso tikslas – modernizuoti jau esamas anglimi kūrenamas jėgaines ir padidinti tiek membraninio modulio produktyvumą, tiek selektyvumą, mažinant energijos surinkimo ir proceso sąnaudas. Siekiant, kad ši technologija būtų plačiai naudojama, labai svarbu yra gera šilumos integravimo strategija [47, 48].

Atsižvelgiant į dabartinę naujausių technologijų būklę, hibridiniai procesai, sujungiantys du ar daugiau surinkimo būdų, turėtų būti laikomi naujuoju metodu, siekiant pagerinti atskyrimo efektyvumą ir sąnaudas [47, 48].

1.7.2. Saugojimas

Sugautas CO₂ suspaudžiamas ir išsiunčiamas arba vamzdynu laikomas ir saugomas žemėje, vandenyne arba kaip mineralinis karbonatas. Pirmasis variantas, žinomas kaip geologinis saugojimas, apima CO₂ įpurškimą į geologines formacijas, tokias kaip išeikvoti naftos ir dujų rezervuarai, giluminiai druskingi vandeniniai sluoksniai ir anglies sluoksnio formacijos, 800–1000 m gylyje. Atsižvelgiant į aikštelės ypatybes, CO₂ galima kaupti naudojant skirtingus gaudyklų mechanizmus,

įskaitant nepralaidžius sluoksnius, žinomus kaip „kaparokai“ (pvz., Purvo akmenis, molius ir skalūnus), kurie kaupia CO₂ po vandeniu, taip pat in situ skysčius ir organines medžiagas. CO₂ ištirpinamas arba adsorbuojamas. Atsižvelgiant į rezervuaro slėgį ir temperatūrą, CO₂ galima laikyti suslėgtomis dujomis, skysčiu arba superkritinėje būsenoje. Pastaroji padaro ją tankesnę, padidindama porų erdvės panaudojimą ir apsunkindama nutekėjimą [49, 50].

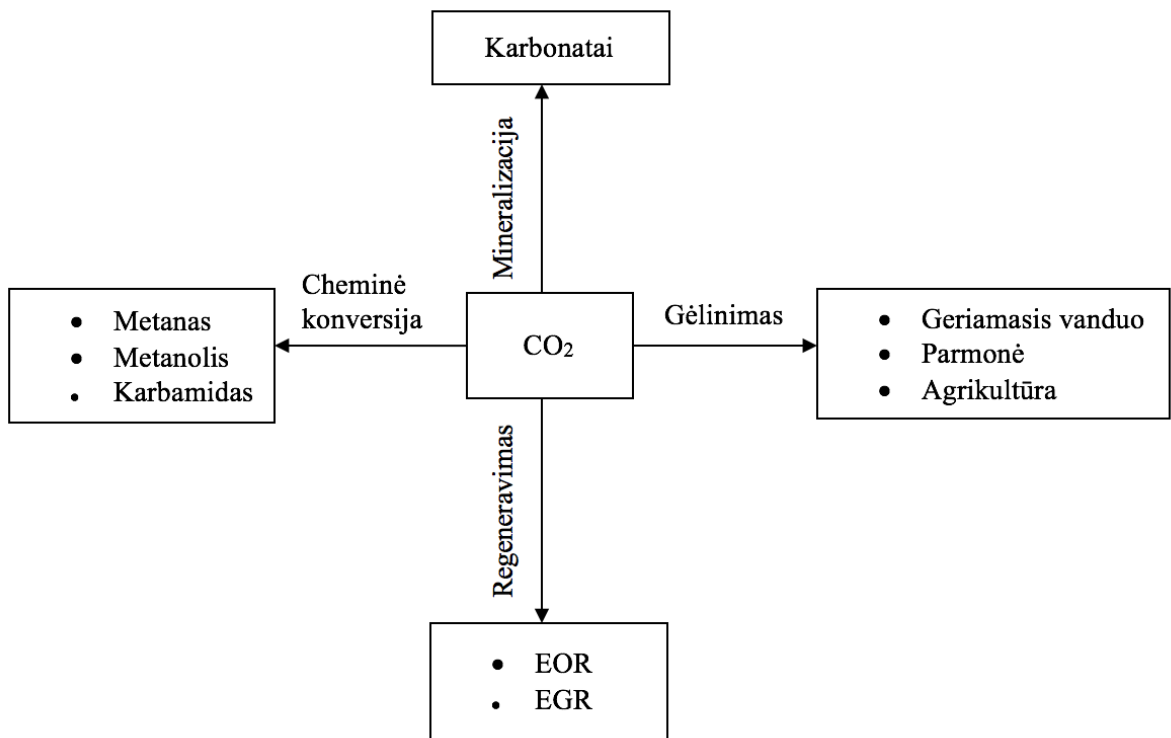
CO₂ saugojimas geologinėse formacijose šiuo metu yra turbūt vienas perspektyviausių variantų dėl ankstesnės naftos ir dujų pramonės patirties. Pavyzdžiui, pramonė gerai supranta išekvotų naftos ir dujų rezervuarų konstrukcines savybes ir elgseną, o esamus gręžinių gręžimo ir įpurškimo būdus galima pritaikyti naudojant anglies atsargas. Taip pat galima laikyti giliai druskingus vandeningus sluoksnius, kurių saugojimo talpa yra 700–900 Gt CO₂. Tačiau apie anglies sluoksnio formavimąsi žinoma labai mažai ir reikia atlikti papildomus tyrimus, kad juos būtų galima laikyti saugaus laikymo galimybe. Vandenyno saugykla remiasi principu, kad vandenyno dugnas turi didžiulį pajėgumą sukauptą CO₂ saugoti dideliame gylyje. Tačiau vandenynų saugykla niekada nebuvo išbandyta dideliu mastu, nors ji buvo tiriama daugiau nei 25 metus [49, 51].

Pagrindinės problemos, susijusios su CO₂ saugojimu, yra galimas jo nutekėjimas ir su tuo susijusi žala, kurią koncentruoto CO₂ srautas padarytų, jei jis patektų į aplinką. Literatūroje nurodytos metinės nuotėkio normos svyruoja nuo 0,00001% iki 1%, atsižvelgiant į geologinės struktūros pralaidumą ir jos trūkumus ar defektus [49].

Galiausiai mineralinis karbonizavimas apima CO₂ reagavimą su metalo oksidais, tokiais kaip magnio ir kalcio oksidai, kad susidarytų karbonatai. Garavimas, dar žinomas kaip „mineralų sekvestracija“, gali būti laikomas saugojimo ir naudojimo galimybe. Pastaroji nuostata taikoma, jei numatytas karbonatų panaudojimas viršija CO₂ kaupimą, kad būtų naudojama kaip medžiaga; pavyzdžiui, statybų pramonėje. Panašiai, dvi kitos galimybės taip pat gali būti laikomos ir saugojimo, ir panaudojimo metodais: padidintas naftos gavyba (EOR) ir pagerintas metano panaudojimas anglies sluoksnyje (ECBM) [52].

1.7.3. Panaudojimas

Anglies dioksido panaudojimas gali būti laikomas perspektyvia alternatyva gaminti įvairiems vertingiems produktams. Procesas turi būti ekonomiškai gyvybingas, saugus ir ekologiškas. Pirminis naudojimo būdas gali būti sustiprintas naftos, dujų regeneravimas, cheminė konversija, mineralizacija ir gėlinimas. 2 paveiksle parodyti įvairūs būdai, kuriais galima panaudoti anglies dioksidą [53].



4 pav. Anglies dioksido panaudojimo būdai [53]

Anglies dioksido panaudojimas geresnei naftos ir dujų regeneracijai

Geresnis naftos ir dujų regeneravimas (EOR/EGR) – tai procedūra, kai medžiaga įleidžiama į rezervuarą, kad būtų galima slopinti uolienu susidarymą ir išleisti bet kokią naftos ar dujų dalį, kuri galėjo būti įstrigusi. Anglies dioksido EOR proceso metu įleidžiamas CO₂ ir sumaišomas su aliejumi ir atleidžia jį iš sunkiai regeneruojamų uolienu formų. Tada šis srautas pumpuojamas į paviršių, o su nafta susidarantis anglies dioksidas išskiriamas ir pakartotinai įterpiamas į ciklą, kad būtų pakartotas procesas. Paprastai šis būdas naudojamas iš natūraliai atsirandančio CO₂, tačiau pastaruoju metu, dėmesys sutelkiamas į CO₂ surinkimą iš potencialiai pavojingų dujų srautų. Efektyvumas priklauso nuo naudojamos įrangos, temperatūros ir slėgio [54].

Anglies dioksido panaudojimas kurui ir chemikalams gaminti

Anglies dioksidas yra vertingas, nes iš dalies gali būti pakeistas iškastiniu kuru, kaip pagrindinis energijos šaltinis. Jis gali atverti naujas galimybes kuriant tvarias technologijas, papildančias tradicinius iškastinius išteklius [55].

Anglies dioksido konversija į kurą yra laikoma geriausiu CO₂ panaudojimo būdu. Metanas, metanolis, alkanai yra tik keletas junginių, kurie gali būti gaminami naudojant CO₂ kaip žaliavą. Pagamintas kuras gali būti naudojamas įvairiuose sektoriuose, įskaitant kuro elementus, elektrines ir transportavimą [29].

Taip pat CO₂ gali būti naudojamas kaip žaliava gaminti daugybę smulkių cheminių medžiagų. Svarbiausios jų yra karbamidas, neorganiai karbonatai, polikarbonatai ir alkileno karbonatai [56].

Anglies dioksido panaudojimas mineralizacijos procesams

Anglies dioksido negeologinis saugojimas arba mineralinis karbonizavimas lemia stabilų mineralinių karbonatų gamybą, apdorojant CO₂ metalo oksidais, tokiais kaip kalcio ir magnio oksidai, kurie yra natūraliai gausūs mineralinėmis medžiagomis. Dirbtinis karbonizacijos kinetikos gerinimas gali būti pasiektas, leidžiant didesnę CO₂ koncentraciją ir didinant temperatūrą. Nepaisant didelių pastangų, skirtų šiai reakcijai paspartinti, lėta kinetika vis dar yra pagrindinis trūkumas didinant mineralizacijos procesą. Tam tikra prasme mineralizacijos procesas gali būti laikomas sulaikymo metodu, nes juo siekiama nuolat nustatyti CO₂ [57].

Galimybė atnaujinti šarminių metalų atliekas į didelę komercinę pridėtinę vertę turinčius produktus, pavyzdžiui, didelio grynumo nuosėdas CaCO₃ per karbonizaciją, yra perspektyvus metodas, kuris turėtų būti pagrindinis šios srities tiriamasis objektas. Karbonatinių cementinių medžiagų karbonizavimas, reaguojant su CO₂, sukuria aukštą ankstyvos stadijos stiprumą statybinių medžiagų naudojimui, o procesu metu pasiekiamas 7 – 12% anglies dioksido suvartojimas [58].

Anglies dioksido panaudojimas vandens nudurkinimui ir gėlinimui

Dar vienas perspektyvus panaudojimo metodas gali būti naudojamas ištirpintoms kietosioms medžiagoms pašalinti ir vandens nudurkinimui. Gautas geriamasis vanduo gali būti naudojamas tose vietose, kuriose yra trūkumas. Daugelis gėlinimo įrenginių nenaudoja CO₂, todėl šiuo metu yra kuriamos naujos technologijos, skirtos ekonomiškam ir efektyviam anglies dioksido panaudojimui [59, 60].

Jei jūros vanduo, sumaišytas su amoniaku, yra veikiamas CO₂, pradeda formuotis netinkamos silpnosios jungtys, dėl kurių jonai pašalinami iš vandens fazės. Susiformavę produktai yra sunkūs ir nusėda į apačią [59, 60].

Apskaičiuotos gėlinimo sąnaudos šiuo metu yra didesnės nei žemės ūkio ar savivaldybių vandens sąnaudos, todėl CO₂ pagrindu sukurta gėlinimo technologija yra mažiau patraukli spręsti su vandeniu susijusias problemas. Nors CO₂ išlieka patraukli alternatyva gėlinimui, dabartinės geriamojo vandens sąnaudos, pagamintos naudojant anglies dioksido technologijas, nėra konkurencingos [59, 60].

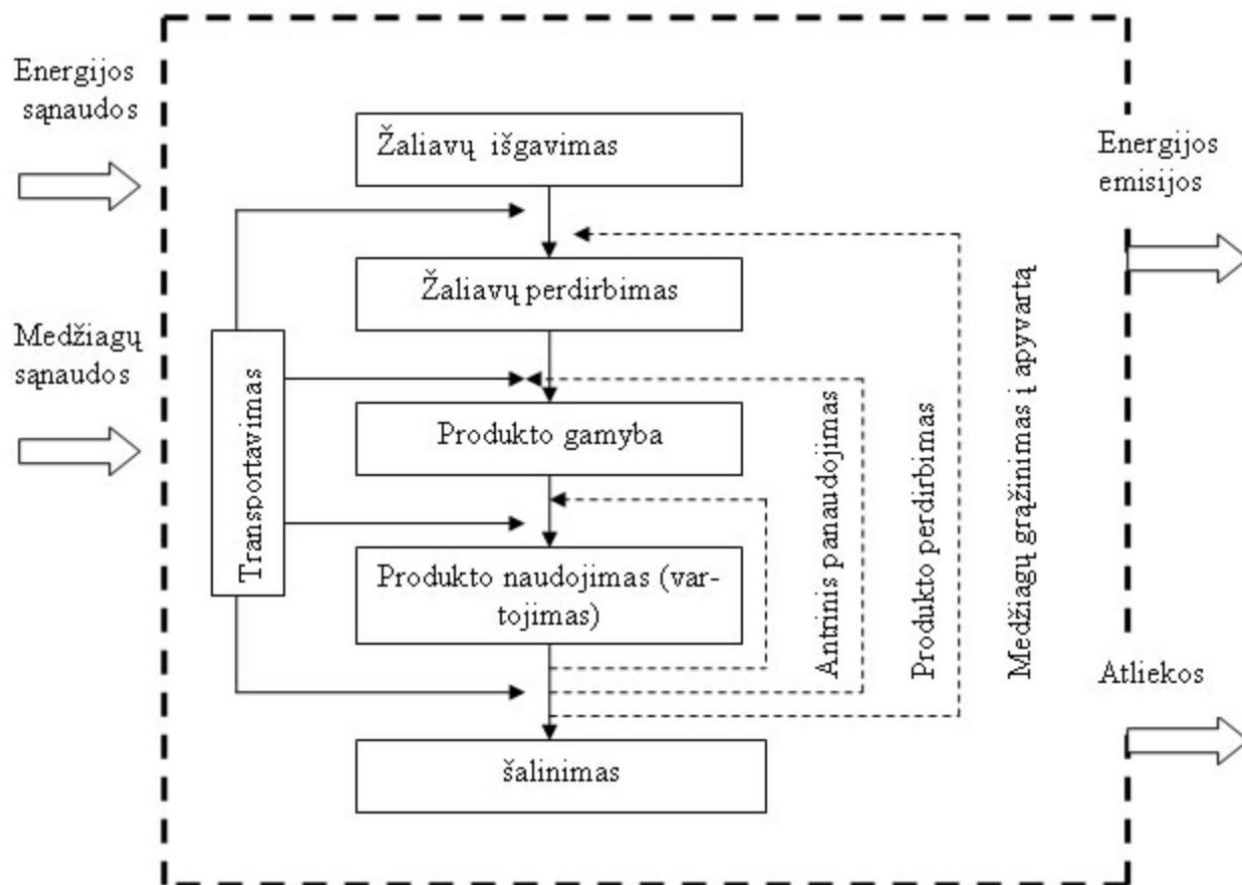
1.8. Būvio ciklo vertinimo principai

Būvio ciklo vertinimas (BCV) yra tinkama priemonė visapusiškai analizuoti produkto poveikį aplinkai per visą gyvavimo ciklą. BCV tikslas yra kiekybiškai įvertinti visus energijos ir medžiagų srautus, patenkančius į sistemą ir iš jos, įskaitant visas į aplinką patenkančias emisijas ir atliekas. Gali būti naudojamas palyginti skirtingų produktų ar procesų poveikį aplinkai. Tai apima, pavyzdžiui, reikalingų medžiagų ir energijos nešiklių iškasimą, elektrinių ir surinkimo įrenginių gamybą ir eksploatavimą, taip pat galutinį šalinimą pasibaigus jų gyvavimo laikui [61, 62].

BCV metodika yra nustatyta ISO 14040 ir 14044 (ISO 14044:2007). Tai yra tarptautiniai standartai, suteikiantys būvio ciklo vertinimo struktūrą ir praktikuojančių specialistų nurodymus, kuriais vadovautis [61, 62, 63].

Norint atlikti išsamų lyginamąjį prekių ir paslaugų aplinkosauginio veiksmingumo vertinimą, reikalinga BCV, apimanti visą gamybos ir vertės grandinę. CO₂ surinkimo ir saugojimo dėmesys sutelkiamas į išmetamų teršalų mažinimą, ty neigiamo klimato kaitos poveikio sušvelninimą.

Nepaisant to, svarbu, kad CO₂ surinkimas nesukeltų neigiamo poveikio aplinkai, taip nusverdama siekiamą teigiamą poveikį [61].



5 pav. Būvio ciklo vertinimo principinė schema [64]

1.8.1. Cemento gamybos aplinkosauginis vertinimas būvio ciklo vertinimo metodu

Kadangi cemento gamyboje naudojamas didelis žaliavų ir energijos kiekis, iškyla klausimas, ar reikia įvertinti jo poveikį aplinkai ir išanalizuoti, kaip pramonė turėtų mažinti taršą. BCV yra vertinga priemonė nustatant gaminių keliamą pavojų aplinkai ir optimizuojant gamybos procesą, kad būtų sumažintas neigiamas poveikis aplinkai [65].

Skirtingi autoriai nagrinėja cemento gamybos poveikį iš skirtingų pozicijų. Remiantis straipsniu „Portlando cemento gamybos būvio ciklo vertinimas: tradicinio proceso palyginimas su alternatyviomis technologijomis“, kurio autorius Deborah N. Huntzinger ir kt., švelninantys antropogeninės anglies išmetimo šaltiniai padės sumažinti šiltnamio efektą sukeliančių dujų kiekį visame pasaulyje. Didžioji dalis absoliutaus poveikio aplinkai priklauso nuo energijos sąnaudų, kurios skiriasi atsižvelgiant į procesus. Tyrime buvo lyginama tradicinis cemento gaminimo būdas su cemento krosnies dulkių perdirbimo procesu cemento gamyboje ir nustatyta, kad cemento krosnies dulkių perdirbimo procesas nedaug saugo aplinką, palyginti su tradiciniu procesu [66].

Diego Garcia – Gusano ir kt. straipsnyje „Būvio ciklo vertinimas, naudojant CO₂ “post combustion” metodą Ispanijos cemento gamyboje“ nagrinėjo kaip cemento gamyboje panaudojus anglies dioksido surinkimo “post combustion” metodą pasikeis išmetamų teršalų kiekis, atsižvelgiant į BVC bei kaip

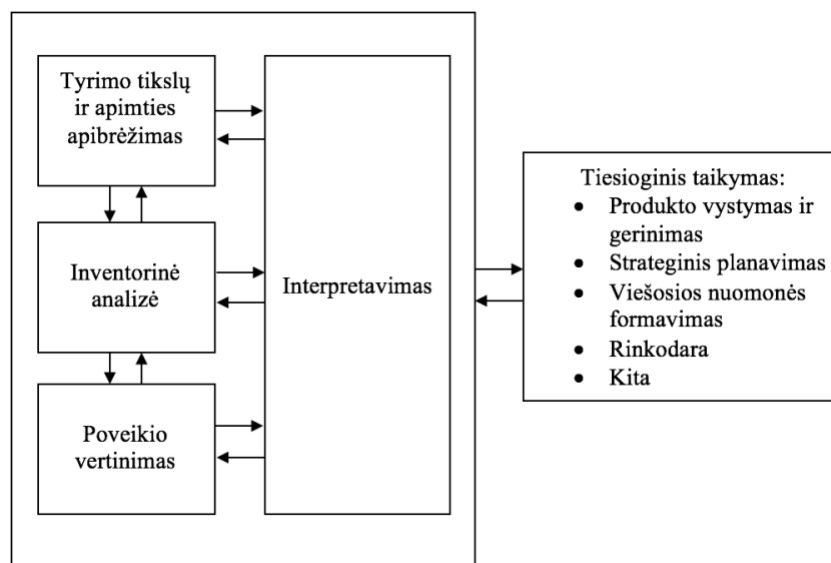
sumažinti CO₂ kiekį, išsiskiriantį cemento gamyboje. Šio darbo rezultatai rodo, kad naudojant akmens anglimi kūrenamą kogeneracinę elektrinę, išsiskiria daugiau teršalų nei naudojant alternatyvųjį kurą, tokį kaip gamtinės dujos ar biomasė. Kitas sprendimas kaip sumažinti CO₂ yra dekarbonizuoti energijos mišinį. Anglies dioksido surinkimo metodui reikalingos papildomos medžiagos tokios kaip: amoniakas, monoetanolaminas, kalkakmenis. Remiantis šiuo straipsniu, buvo nustatyta, kad CO₂ surinkimo technologijos padeda sumažinti globalinio atšilimo potencialą, tačiau tam reikia mažinti išmetamo anglies dioksido kiekį pačiame cemento gamybos procese [21].

2. Tyrimų metodika

2.1. Būvio ciklo vertinimas

Būvio ciklo vertinimas išskiriamas į 4 etapus:

- tyrimo tikslų ir apimties apibrėžimas;
- būvio ciklo inventorinė analizė (BCIA);
- būvio ciklo poveikio vertinimas (BCPV);
- interpretavimas [63].



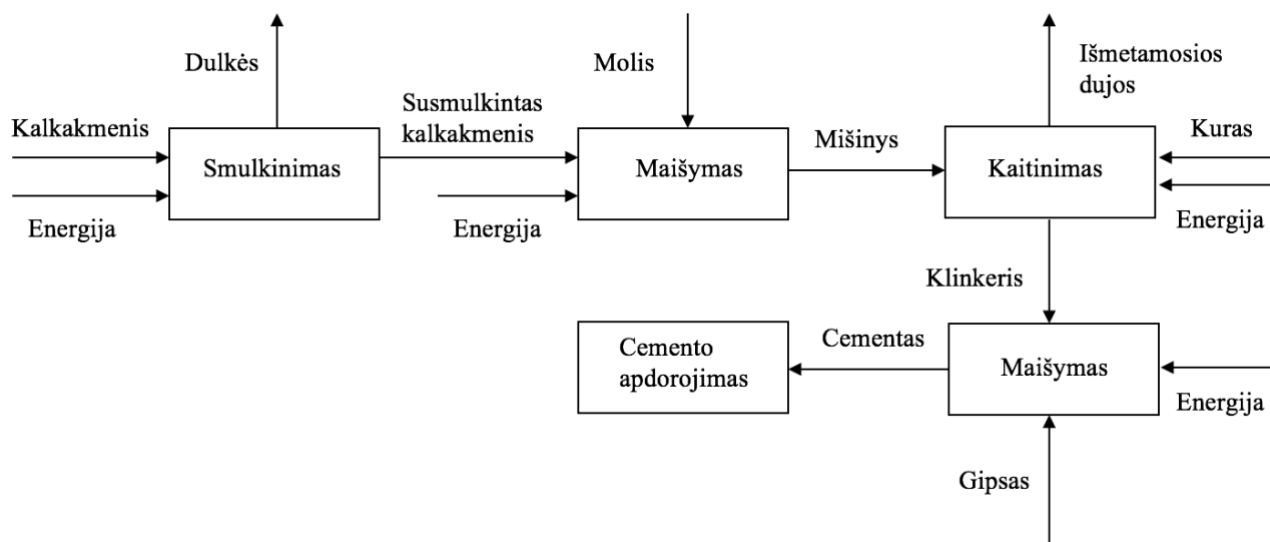
6 pav. Būvio ciklo vertinimo struktūra (LST ISO 14044:2007) [63]

2.1.1. Tyrimo tikslų ir apimties apibrėžimas

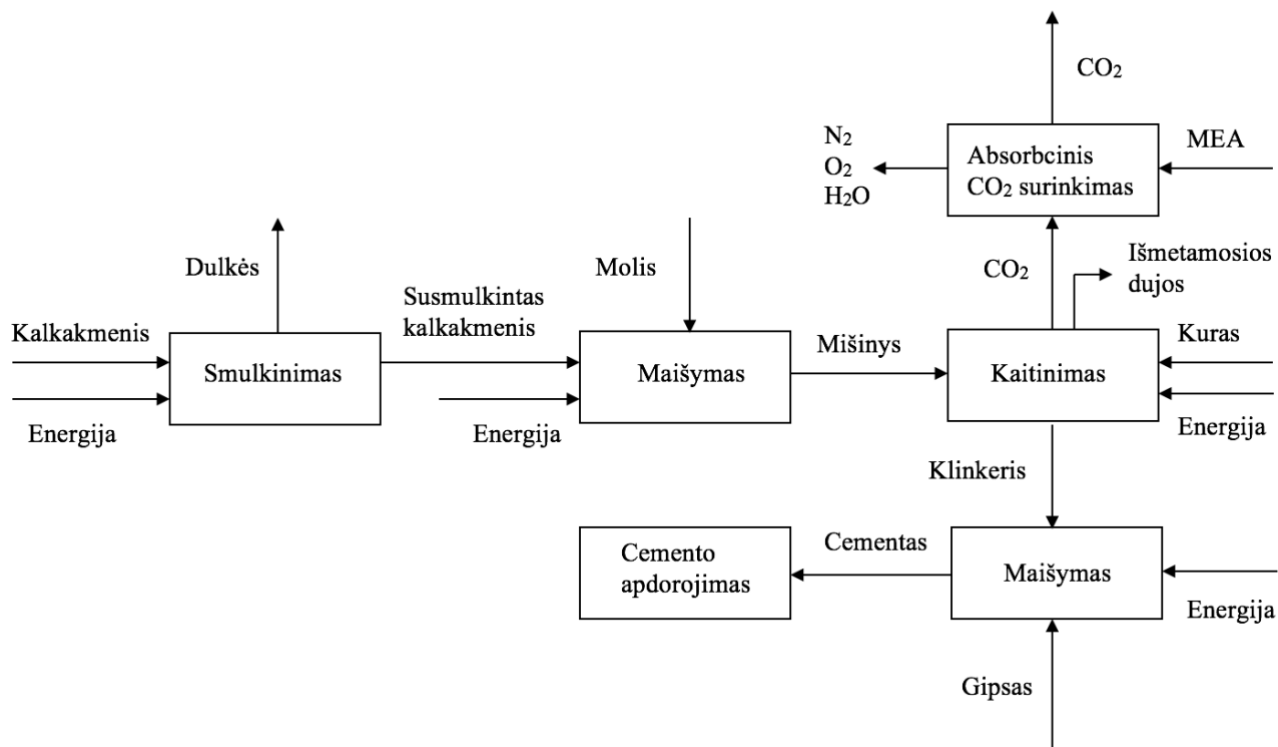
Šis žingsnis apibūdina pagrindinį analizės tikslą. Norint atlikti palyginimą, reikia apibrėžti palyginimo vienetą. Šis palyginimo vienetas vadinamas funkciniu vienetu [61, 62].

Šio projekto tikslas yra atlikti cemento gamybos pramonės poveikio aplinkai vertinimą, remiantis būvio ciklo vertinimo metodika. Funkcinis vienetas yra 1t cemento ir naudojamos šios alternatyvos:

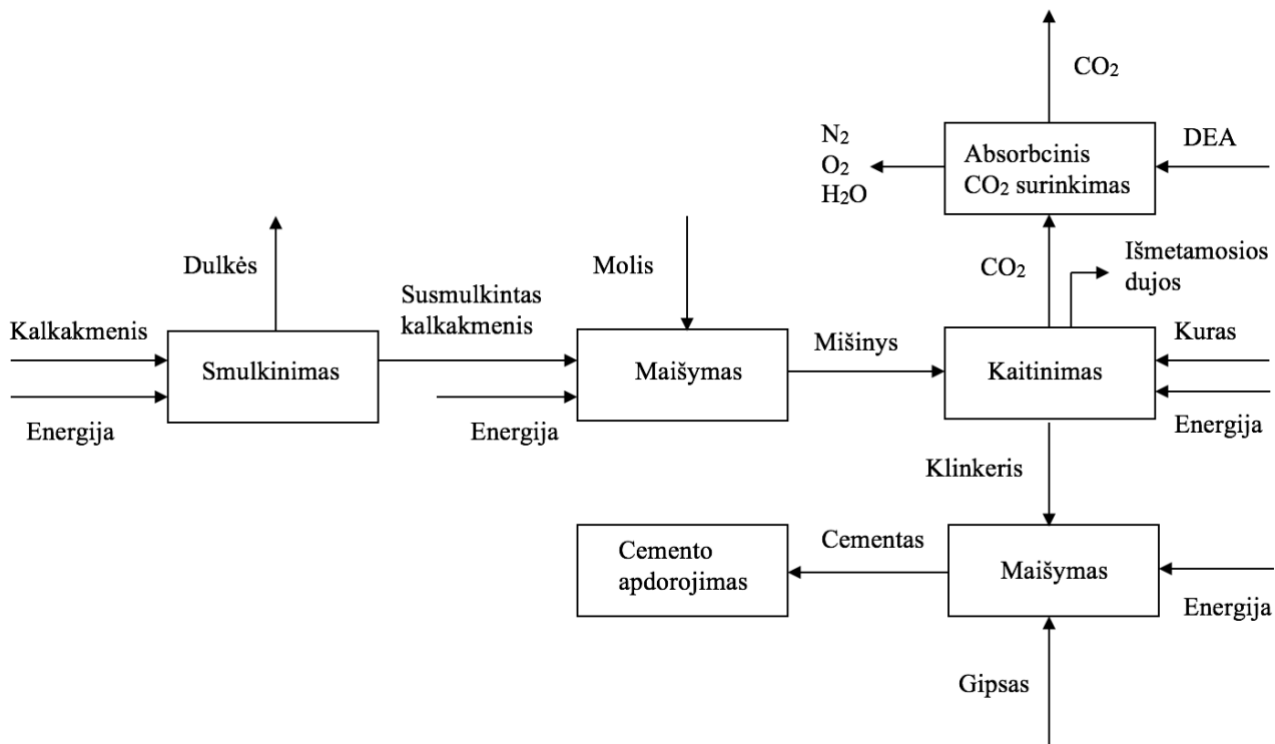
1. cemento gamyba, kai nenaudojamas joks anglies dioksido surinkimo proceso metodas (7pav.);
2. cemento gamyba, kai naudojamas anglies dioksido „Po degimo“ surinkimo proceso metodas, panaudojant monoetanolamino (MEA) tirpiklį (8pav.);
3. cemento gamyba, kai naudojamas anglies dioksido „Po degimo“ surinkimo proceso metodas, panaudojant dietanolamino (DEA) tirpiklį (9pav.).



7 pav. Cemento gamybos sistemos ribos, kai nenaudojamas anglies dioksido surinkimo procesas



8 pav. Cemento gamybos sistemos ribos, kai naudojamas „Po degimo“ anglies dioksido surinkimo proceso metodas, panaudojant monoetanolamino tirpiklį

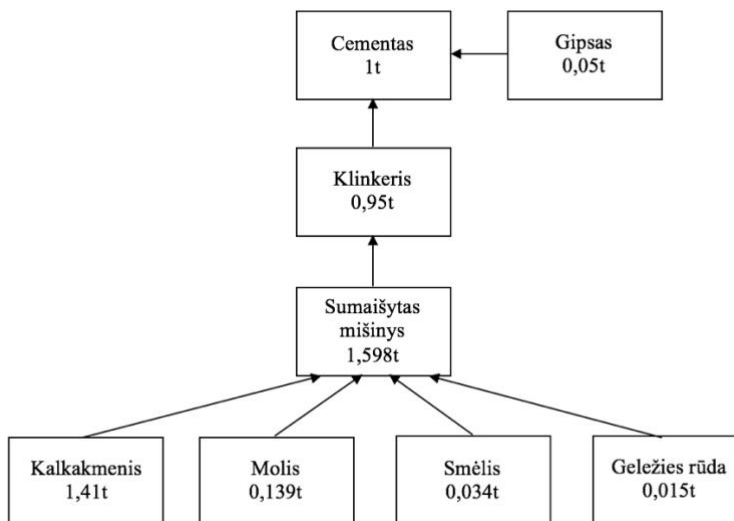


9 pav. Cemento gamybos sistemos ribos, kai naudojamas „Po degimo“ anglies dioksido surinkimo proceso metodas, panaudojant dietanolamino tirpiklį

2.1.2. Būvio ciklo inventorinė analizė (BCIA)

Šiame etape visos svarbios tiriamos sistemos medžiagų ir energijos sąnaudos ir išeiga yra surenkami, apskaičiuojami ir analizuojami vienoje proceso skalėje [62].

Šiame projekte, norint pagaminti cementą, naudojamos šios medžiagos: kalkakmenis, molis, smėlis, geležies rūda bei gipsas (10pav.). Taip pat reikalinga energija, šiluma, akmens anglis, naftos koksas, gaminant klinkerį iš ankščiau išvardintų medžiagų.



10 pav. Medžiagų srautų schema, gaminant 1 toną cemento [67]

Anglies dioksido surinkimui šiame projekte, buvo naudojami MEA ir DEA tirpikliai, kurių palyginimas pateikiamas 1 lentelėje.

1 lentelė. Monoetanolamino ir dietanolamino tirpiklių savybių palyginimas [68]

Savybė	MEA	DEA
Cheminė formulė	C ₂ H ₇ NO	C ₄ H ₁₁ NO ₂
Molekulinė masė	61,09	105,14
Tirpumo temperatūra (°C)	10,00	28,00
Virimo temperatūra (°C)	170,00	217,00
pH	12,10	11,00
Ekotoksiškumas (mg/l)	250,00	500,00
Toksiškumas (mg/kg)	1720,00	710,00
Biologinis skaidymas (%ThOD)	27,00	42,00
Garų slėgis (mmHg@20 °C)	0,36	0,01
Tirpumas vandenyje (wt.% 20°C)	Pilnai	96,40
Tirpalo koncentracija (wt.%)	10-30	25-35
Tirpalo įkėlimas (moliai CO ₂ /moliai aminu)	0,25-0,45	0,40-0,80

Projekte buvo pasirinktos dažniausiai naudojamos medžiagos, gaminant cementą, kurios išvardintos kartu su matavimo vienetais 2, 3 ir 4 lentelėse skirtingoms alternatyvoms [8, 21, 67, 69, 70].

2 lentelė. Inventorinė cemento gamybos duomenų lentelė, kai nenaudojamas anglies dioksido surinkimo procesas [8, 21, 67]

Procesas	Įvestis		Išvestis	
	Medžiagos	Vienetai	Medžiagos	Vienetai
Smulkinimas	Kalkakmenis	t	Susmulkintas kalkakmenis	t
	Energija	kWh	PM ₁₀	t
Maišymas	Susmulkintas kalkakmenis	t	Klinkeris	t
	Molis	t		
	Smėlis	t		
	Geležies rūda	t		
	Energija	kWh		
Kaitinimas	Klinkeris	t	Klinkeris	t
	Akmens anglis	kg	CO ₂	t
	Naftos koksas	kg	PM ₁₀	kg
	Šiluma	MJ	CO	kg
	Energija	kWh	NO _x	kg
			SO ₂	kg
			HCL	kg
			HF	kg
			NH ₃	kg
Maišymas	Klinkeris	t	Cementas	t
	Gipsas	t		
	Energija	kWh		

3 lentelė. Inventorinė cemento gamybos duomenų lentelė, kai naudojamas „Po degimo“ anglies dioksido surinkimo proceso metodas, panaudojant monoetanolamino tirpiklį [8, 21, 67, 69]

Procesas	Įvestis		Išvestis	
	Medžiagos	Vienetai	Medžiagos	Vienetai
Smulkinimas	Kalkakmenis	t	Susmulkintas kalkakmenis	t
	Energija	kWh	PM ₁₀	t
Maišymas	Susmulkintas kalkakmenis	t	Klinkeris	t
	Molis	t		
	Smėlis	t		
	Geležies rūda	t		
	Energija	kWh		
Kaitinimas	Klinkeris	t	Klinkeris	t
	Akmens anglis	kg	CO ₂	t
	Naftos koksas	kg	PM ₁₀	kg
	Šiluma	MJ	CO	kg
	Energija	kWh	NO _x	kg
			SO ₂	kg
			HCL	kg
			HF	kg
„Po degimo“ CO ₂ surinkimas	CO ₂	t	CO ₂	t
	MEA	kg	N ₂	t
	Amoniakas	kg	O ₂	t
	Kalkakmenis	kg	H ₂ O	t
	Šiluma	MJ		
	Energija	kWh		
Maišymas	Klinkeris	t	Cementas	t
	Gipsas	t		
	Energija	kWh		

4 lentelė. Inventorinė cemento gamybos duomenų lentelė, kai naudojamas „Po degimo“ anglies dioksido surinkimo proceso metodas, panaudojant dietanolamino tirpiklį [8, 21, 67, 70]

Procesas	Įvestis		Išvestis	
	Medžiagos	Vienetai	Medžiagos	Vienetai
Smulkinimas	Kalkakmenis	t	Susmulkintas kalkakmenis	t
	Energija	kWh	PM ₁₀	t
Maišymas	Susmulkintas kalkakmenis	t	Klinkeris	t
	Molis	t		
	Smėlis	t		
	Geležies rūda	t		
	Energija	kWh		
Kaitinimas	Klinkeris	t	Klinkeris	t
	Akmens anglis	kg	CO ₂	t
	Naftos koksas	kg	PM ₁₀	kg
	Šiluma	MJ	CO	kg
	Energija	kWh	NO _x	kg
			SO ₂	kg
			HCL	kg
			HF	kg
		NH ₃	kg	

„Po degimo“ CO ₂ surinkimas	CO ₂	t	CO ₂	t
	DEA	kg	N ₂	t
	Amoniakas	kg	O ₂	t
	Kalkakmenis	kg	H ₂ O	t
	Šiluma	MJ		
	Energija	kWh		
Maišymas	Klinkeris	t	Cementas	t
	Gipsas	t		
	Energija	kWh		

2.1.3. Būvio ciklo poveikio vertinimas (BCPV)

Būvio ciklo poveikio vertinimo tikslas yra suteikti papildomos informacijos, kuri padėtų įvertinti gaminio sistemos būvio ciklo atsargų analizės rezultatus, kad būtų galima geriau suprasti jų svarbą aplinkai [62].

Poveikio vertinimu siekiama įvertinti galimo poveikio aplinkai reikšmingumą, naudojant būvio ciklo atsargų analizės rezultatus. Apskritai šis procesas apima atsargų duomenų susiejimą su konkrečiomis poveikio aplinkai kategorijomis ir kategorijų rodikliais. Būvio ciklo poveikio vertinimas suteikia informacijos būvio ciklo interpretavimui [62].

Surinkti ir apibendrinti sistemos įeinantys ir išeinantys srautai yra klasifikuojami pagal specifinius padarinius aplinkai, kurie vadinami poveikio kategorijomis. Pavyzdžiai yra visuotinio atšilimo potencialas arba rūgštėjimo potencialas [62].

Technologijų poveikiui aplinkai įvertinti naudojami būvio ciklo poveikio vertinimo metodai. Vienas iš jų yra ReCiPe metodas, kuris ir naudojamas šiame projekte, analizuojant procesus. Šis metodas pateikia ne tik europinius, bet ir globalius apibūdinimo veiksnius. Be to, apibūdina veiksnius, skirtus smulkių kietųjų dalelių susidarymui, fotocheminiam ozono susidarymui, parūgštinimui, gėlo vandens eutrofikacijai ir vandens naudojimui [71].

Šis metodas leidžia įvertinti taršą tiek vidurio taške, tiek ir baigties taške. Yra du pagrindiniai būdai, kaip gauti taršos apibūdinimo veiksnius, ty vidurio taško ir galutinio taško lygyje. ReCiPe metodu galima apskaičiuoti:

- 18 vidurio taško rodiklių;
- 3 galutinio taško rodiklius [71].

Vidurio taško rodikliai nukreipti į atskiras aplinkos problemas, pavyzdžiui, klimato pokyčius ar rūgštėjimą. Galutinio taško rodikliai rodo poveikį aplinkai trimis aukštesniais agregacijos lygiais:

- poveikis žmonių sveikatai;
- biologinė įvairovė;
- išteklių trūkumas [71].

Vidurinių taškų pavertimas galutiniais taškais supaprastina BCPV rezultatų aiškinimą. Tačiau kiekvienu apibendrinimo etapu rezultatų neapibrėžtumas didėja [71].

Šiame darbe būvio ciklo metu išmetami teršalų kiekiai bei poveikio kategorijos yra vertinami naudojant ReCiPe EndPoint (H) metodą, įdiegtą BCV programinėje įrangoje „SimaPro 9.0“.

2.1.4. Interpretavimas

Šis paskutinis žingsnis apibendrina BVIA ir BVPV rezultatus. Tai galutinis BCV proceso etapas, kurio metu apibendrinami ir aptariami būvio ciklo aprašų analizės arba būvio ciklo poveikio vertinimai. Interpretavimas turėtų atspindėti tai, kad būvio ciklo poveikio vertinimo rezultatai grindžiami santykiniu požiūriu ir jie neprognozuoja tikrojo poveikio kategorijos galutiniams parametrams, saugos ribų viršijimui ar rizikai [72].

Šiame darbe buvo nagrinėjama šios charakterizavimo kategorijos: klimato kaita žmonių sveikatai ir aplinkai, ozono sluoksnis, toksiškumas žmogui, gėlo vandens eutrofikacija, jūrų eutrofikacija, gėlo vandens ekotoksiškumas, jūrų ekotoksiškumas, sausumos ekotoksiškumas, mineralų išsekvojimas ir iškastinių išteklių išsekvojimas. Ir taip pat buvo nagrinėjama normalizavimo kategorijos: žmogaus sveikata, ekosistemos bei ištekliai.

Charakterizavimas

Vidurio taško apibūdinimo veiksniai, naudojami ReCiPe metode, galima apibūdinti taip:

- klimato kaita. Būdingas klimato kaitos veiksnys yra pasaulinio atšilimo potencialas. Vienetas yra metai / kg CO₂ ekvivalento;
- ozono sluoksnis. Ozono sluoksnio ardymo apibūdinimo faktorius parodo stratosferos ozono sluoksnio sunaikinimą dėl antropogeninių ozoną ardančių medžiagų (OAM). Vienetas yra metai / kg CFC-11 ekvivalento;
- toksiškumas žmogui. Šis faktorius atspindi cheminės medžiagos toksiškumą ir kaupimąsi žmogaus maisto grandinėje. Vienetas yra metai / kg 1,4-dichlorbenzeno;
- gėlo vandens eutrofikacija. Gėlo vandens eutrofikacijos apibūdinamasis faktorius sąlygoja fosforo su maistingųjų medžiagų išmetimą į aplinką. Vienetas yra metai / kg P (gėlo vandens ekvivalentai);
- jūrų eutrofikacija. Jūros eutrofikacijos apibūdinamasis faktorius lemia azoto (kurių sudėtyje yra maistinių medžiagų) išmetimą į aplinką. Vienetas yra metai / kg N (gėlo vandens ekvivalentai);
- gėlo vandens ekotoksiškumas. Šis faktorius atspindi cheminės medžiagos toksiškumą ir išlikimą gėlame vandenyje. Vienetas yra metai / kg 1,4-dichlorbenzeno;
- jūrų ekotoksiškumas. Šis faktorius atspindi cheminės medžiagos toksiškumą ir išlikimą jūrose. Vienetas yra metai / kg 1,4-dichlorbenzeno;
- sausumos ekotoksiškumas. Šis faktorius atspindi cheminės medžiagos toksiškumą ir išlikimą sausumoje. Vienetas yra metai / kg 1,4-dichlorbenzeno;
- mineralų išsekvojimas. Mineralų išsekvojimo požymis yra laipsnio sumažėjimas. Vienetas yra kg geležies (Fe) ekvivalentų;
- iškastinių išteklių išsekvojimas. Iškastinių išteklių išsekvojimo apibūdinamasis faktorius yra išgauto iškastinių išteklių kiekis, pagrįstas mažesne šildymo verte. Vienetas yra kg išteklių ekvivalento [73].

Žalos įvertinimas

Galutinio taško apibūdinimo veiksniai, naudojami ReCiPe metode, galima apibūdinti taip:

- žmonių sveikata, išreikšta prarastų metų ir neįgalių metų skaičiumi. Vienetas yra metai;

- ekosistemos, išreikšta rūšių nykimu tam tikrame plote per tam tikrą laiką. Vienetas yra metai;
- ištekliai, išreikšti būsimų išteklių gamybos perteklinėmis sąnaudomis per neribotą laiką (darant prielaidą, kad metinė produkcija bus pastovi). Vienetas yra 2000 US dolerių [73].

Normalizavimas

Normalizavimas yra išreiškiamas tiriamojo proceso ar medžiagos žala vienam žmogui. Pagrindinis normalizavimo tikslas yra išnagrinėti santykinę kategorijų reikšmę ir nustatyti ar rezultatai yra galimi. Sunormalizuoti rezultatai visi gaunami vienodais vienetais ir tai leidžia lengviau juos palyginti tarpusavyje. Normalizavimas gali būti taikomas ir charakterizavimo rezultatams ir žalos įvertinimo [73].

Lyginamasis svertinis vertinimas

Šiuo metodu svorio koeficientas atliekamas žalos kategorijos lygyje (galutiniame taške). Kai kuriuose metoduose, galima palyginti medžiagas skirtingose poveikio kategorijose, o šiame metode svertinis vertinimas yra skirstomas į tris žalos kategorijas, kurių kiekvienai yra specialus svorių koeficientas [73].

2.2. Jautrumo analizė

Jautrumo analizė yra svarbus žingsnis, tiriant rezultatų patikimumą bei jautrumą neapibrėžties faktoriams būvio ciklo vertinime. Faktoriai gali būti sistemos ribos, funkcinis vienetas ar duomenų parinkimas. Ši analizė parodo svarbiausią parametrų rinkinį bei leidžia nustatyti ar duomenys yra tikslūs ir kokybiški, ar juos reikia dar tobulinti. Taip pat leidžia pagerinti rezultatų interpretavimą. Atliekant jautrumo analizę, nustatoma, ar keičiant duomenis keičiasi ir rezultatai [74].

3. Tyrimų rezultatai

3.1. Inventorinės analizės rezultatai

Sudarant inventorinę analizę, kaip pavaizduota metodologinėje dalyje 2.1.1 skyriuje, buvo paimitos trys alternatyvos, gaminant cementą:

1. kai nenaudojamas joks anglies dioksido surinkimo procesas. Šis metodas sudarytas iš 4 procesų – kalkakmenio smulkinimo, susmulkinto kalkakmenio maišymo su moliu, smėliu bei geležies rūda, klinkerio kaitinimo ir klinkerio maišymo su gipsu; (7 pav.)
2. kai naudojamas anglies dioksido surinkimo procesas, naudojant MEA tirpiklį. Šis metodas sudarytas iš 5 procesų – kalkakmenio smulkinimo, susmulkinto kalkakmenio maišymo su moliu, smėliu bei geležies rūda, anglies dioksido surinkimo, naudojant, „Po degimo“ metodą ir panaudojant MEA tirpiklį, klinkerio kaitinimo ir klinkerio maišymo su gipsu; (8 pav.)
3. kai naudojamas anglies dioksido procesas, naudojant DEA tirpiklį. Šis metodas sudarytas iš 5 procesų – kalkakmenio smulkinimo, susmulkinto kalkakmenio maišymo su moliu, smėliu bei geležies rūda, anglies dioksido surinkimo, naudojante „Po degimo“ metodą ir panaudojant DEA tirpiklį, klinkerio kaitinimo ir klinkerio maišymo su gipsu. (9 pav.)

Darbe analizuojami charakterizuoti ir normalizuoti rezultatai, o žalos įvertinimo rezultatai pateikiami 1, 2, 3 ir 4 prieduose (22-29 pav.). Medžiagų rūšys buvo parinktos pagal tai, kokios medžiagos daugiausiai yra naudojamos pagaminti cementui, o tirpikliai parinkti pagal tai, kokie dažniausiai naudojami anglies dioksido surinkimui. Skaičiavimų rezultatai pateikiami žemiau (5, 6, 7 lentelėse)

5 lentelė. Inventorinė įvesties ir išvesties cemento gamybos duomenų lentelė, kai nenaudojamas anglies dioksido surinkimo procesas [75]

Procesas	Įvestis			Išvestis		
	Medžiagos	Vienetai	Reikšmė	Medžiagos	Vienetai	Reikšmė
Smulkinimas	Kalkakmenis	t	1,45* ₁	Susmulkintas kalkakmenis	t	1,41* ₁
	Energija	kWh	39,1* ₂	PM ₁₀	t	0,04* ₁
Maišymas	Susmulkintas kalkakmenis	t	1,41* ₁	Klinkeris	t	1,598* ₁
	Molis	t	0,139* ₁			
	Smėlis	t	0,034* ₁			
	Geležies rūda	t	0,015* ₁			
	Energija	kWh	39,1* ₂			
Kaitinimas	Klinkeris	t	1,598* ₁	Klinkeris	t	0,95* ₁
	Akmens anglis	kg	4,86e-10* ₂	CO ₂	t	0,81* ₃
	Naftos koksas	kg	3,22e-8* ₂	PM ₁₀	kg	0,012* ₃
	Šiluma	MJ	3359* ₂	CO	kg	1,363* ₃
	Energija	kWh	39,1* ₂	NO _x	kg	1,139* ₃
				SO ₂	kg	0,652* ₃
				HCL	kg	0,005* ₃
				HF	kg	0,00005* ₃
Maišymas				NH ₃	kg	0,004* ₃
	Klinkeris	t	0,95* ₁	Cementas	t	1
	Gipsas	t	0,05* ₁			
	Energija	kWh	39,1* ₂			

6 lentelė. Inventorinė įvesties ir išvesties cemento gamybos duomenų lentelė, kai naudojamas „Po degimo“ anglies dioksido surinkimo proceso metodas, panaudojant monoetanolamino tirpiklį [21, 70, 75]

Procesas	Įvestis			Išvestis		
	Medžiagos	Vienetai	Reikšmė	Medžiagos	Vienetai	Reikšmė
Smulkinimas	Kalkakmenis	t	1,45* ₁	Susmulkintas kalkakmenis	t	1,41* ₁
	Energija	kWh	39,1* ₂	PM ₁₀	t	0,04* ₁
Maišymas	Susmulkintas kalkakmenis	t	1,41* ₁	Klinkeris	t	1,598* ₁
	Molis	t	0,139* ₁			
	Smėlis	t	0,034* ₁			
	Geležies rūda	t	0,015* ₁			
	Energija	kWh	39,1* ₂			
Kaitinimas	Klinkeris	t	1,598* ₁	Klinkeris	t	0,95* ₁
	Akmens anglis	kg	4,86e-10* ₂	CO ₂	t	0,81* ₃
	Naftos koksas	kg	3,22e-8* ₂	PM ₁₀	kg	0,012* ₃
	Šiluma	MJ	3359* ₂	CO	kg	1,363* ₃
	Energija	kWh	39,1* ₂	NO _x	kg	1,139* ₃
				SO ₂	kg	0,652* ₃
				HCL	kg	0,005* ₃
				HF	kg	0,00005* ₃
„Po degimo“ CO ₂ surinkimas	CO ₂	t	0,81* ₃	CO ₂	t	0,081* ₄
	MEA	kg	2,508* ₂	N ₂	t	0,405* ₄
	Amoniakas	kg	1,938* ₂	O ₂	t	0,012* ₄
	Kalkakmenis	kg	13,395* ₂	H ₂ O	t	0,112* ₄
	Šiluma	MJ	2137,5* ₂			
	Energija	kWh	66,5* ₂			
Maišymas	Klinkeris	t	0,95* ₁	Cementas	t	1
	Gipsas	t	0,05* ₁			
	Energija	kWh	39,1* ₂			

7 lentelė. Inventorinė įvesties ir išvesties cemento gamybos duomenų lentelė, kai naudojamas „Po degimo“ anglies dioksido surinkimo proceso metodas, panaudojant dietanolamino tirpiklį [21, 69, 70, 75]

Procesas	Įvestis			Išvestis		
	Medžiagos	Vienetai	Reikšmė	Medžiagos	Vienetai	Reikšmė
Smulkinimas	Kalkakmenis	t	1,45* ₁	Susmulkintas kalkakmenis	t	1,41* ₁
	Energija	kWh	39,1* ₂	PM ₁₀	t	0,04* ₁
Maišymas	Susmulkintas kalkakmenis	t	1,41* ₁	Klinkeris	t	1,598* ₁
	Molis	t	0,139* ₁			
	Smėlis	t	0,034* ₁			
	Geležies rūda	t	0,015* ₁			
	Energija	kWh	39,1* ₂			
Kaitinimas	Klinkeris	t	1,598* ₁	Klinkeris	t	0,95* ₁
	Akmens anglis	kg	4,86e-10* ₂	CO ₂	t	0,81* ₃
	Naftos koksas	kg	3,22e-8* ₂	PM ₁₀	kg	0,012* ₃
	Šiluma	MJ	3359* ₂	CO	kg	1,363* ₃
	Energija	kWh	39,1* ₂	NO _x	kg	1,139* ₃
				SO ₂	kg	0,652* ₃
				HCL	kg	0,005* ₃
				HF	kg	0,00005* ₃
			NH ₃	kg	0,004* ₃	

„Po degimo“ CO ₂ surinkimas	CO ₂	t	0,81* ₃	CO ₂	t	0,081* ₄
	DEA	kg	3,762* ₅	N ₂	t	0,405* ₄
	Amoniakas	kg	1,938* ₂	O ₂	t	0,012* ₄
	Kalkakmenis	kg	13,395* ₂	H ₂ O	t	0,112* ₄
	Šiluma	MJ	2754,88* ₂			
	Energija	kWh	66,5* ₂			
Maišymas	Klinkeris	t	0,95* ₁	Cementas	t	1
	Gipsas	t	0,05* ₁			
	Energija	kWh	39,1* ₂			

***1:** Gaminant 1t cemento, reikės susmulkinti 1,45t kalkakmenio, iš kurio gaunama 1,41t susmulkinto kalkakmenio. Susmulkintą kalkakmenį maišant su 0,139t molio, 0,034t smėlio ir 0,015t geležies rūdos gaunama 1,598t klinkerio mišinys.

$1,41+0,139+0,034+0,015=1,598$ t klinkerio mišinio.

$1,45-1,41=0,04$ t PM₁₀

Pakaitinus 1,598t klinkerio mišinio, gaunama 0,95t klinkerio. Klinkerį sumaišius su 0,05t gipso, gaunama 1t cemento.

$0,95+0,05=1$ t cemento [75]

***2:** 1 tonai cemento, nenaudojant anglies dioksido surinkimo proceso, sunaudojama 0,0391MWh elektros energijos, tai yra 39,1kWh.

1 tonai cemento, naudojant anglies dioksido surinkimą „Po degimo“ proceso, sunaudojama 66,5kWh elektros energijos.

1 tonai cemento, naudojant anglies dioksido surinkimą „Po degimo“ proceso, šilumos kiekis yra 2137,5MJ

Monoetanolamino (MEA) reikalingas kiekis, norint sugauti CO₂, gaminant 1t klinkerio, yra 2,640kg, gaminant 0,95t klinkerio, MEA kiekis bus:

$0,95t*2,640kg/1t=2,508kg$

Amoniaکو reikalingas kiekis, gaminant 1t klinkerio yra 2,04kg, gaminant 0,95t klinkerio, amoniako kiekis bus:

$0,95t*2,04/1t=1,938kg$

Kalkakmenio reikalingas kiekis, gaminant 1t klinkerio yra 14,1kg, gaminant 0,95t klinkerio, kalkakmenio kiekis bus:

$0,95t*14,1kg/1t=13,395kg$ [21]

***3:** Gaminant 1 toną klinkerio, išskiriama 0,85t CO₂ į atmosferą, gaminant 0,95t klinkerio, CO₂ kiekis bus:

$0,95t*0,85t/1t=0,81t$ CO₂

Gaminant cementą, taip pat išsiskiria ir kiti teršalai, tokie kaip: PM₁₀, CO, NO_x, SO₂, HCL, HF, NH₃. Jų kiekiai apskaičiuoti, remiantis AB "Akmenės cementas" 2019m duomenų vidurkiu. [70]

***4:** CO₂ sugavimo norma "Po degimo" proceso yra 90%, tai reiškia, kad nesugauto CO₂ po "Po degimo" proceso lieka:

$100\% - 90\% = 10\%$ CO₂ po "Po degimo" proceso.

Kadangi po klinkerio kaitinimo išsiskiria 0,81t CO₂, tai po „Po degimo“ proceso, CO₂ kiekis bus:

$0,81t * 10\% / 100\% = 0,081t$ CO₂ po „Po degimo“ proceso.

Taip pat po "Po degimo" proceso išsiskiria ir N₂, H₂O ir O₂.

CO₂ sudaro 12-14% visų išsiskiriančių medžiagų kiekio, todėl imamas vidurkis, kad 13% CO₂ yra 0,081t.

N₂ sudaro 65% visų išsiskiriančių medžiagų kiekio:

$0,081t * 65\% / 13\% = 0,405t$ N₂

H₂O sudaro 18% visų išsiskiriančių medžiagų kiekio:

$0,081t * 18\% / 13\% = 0,112t$ H₂O

O₂ sudaro 2% visų išsiskiriančių medžiagų kiekio:

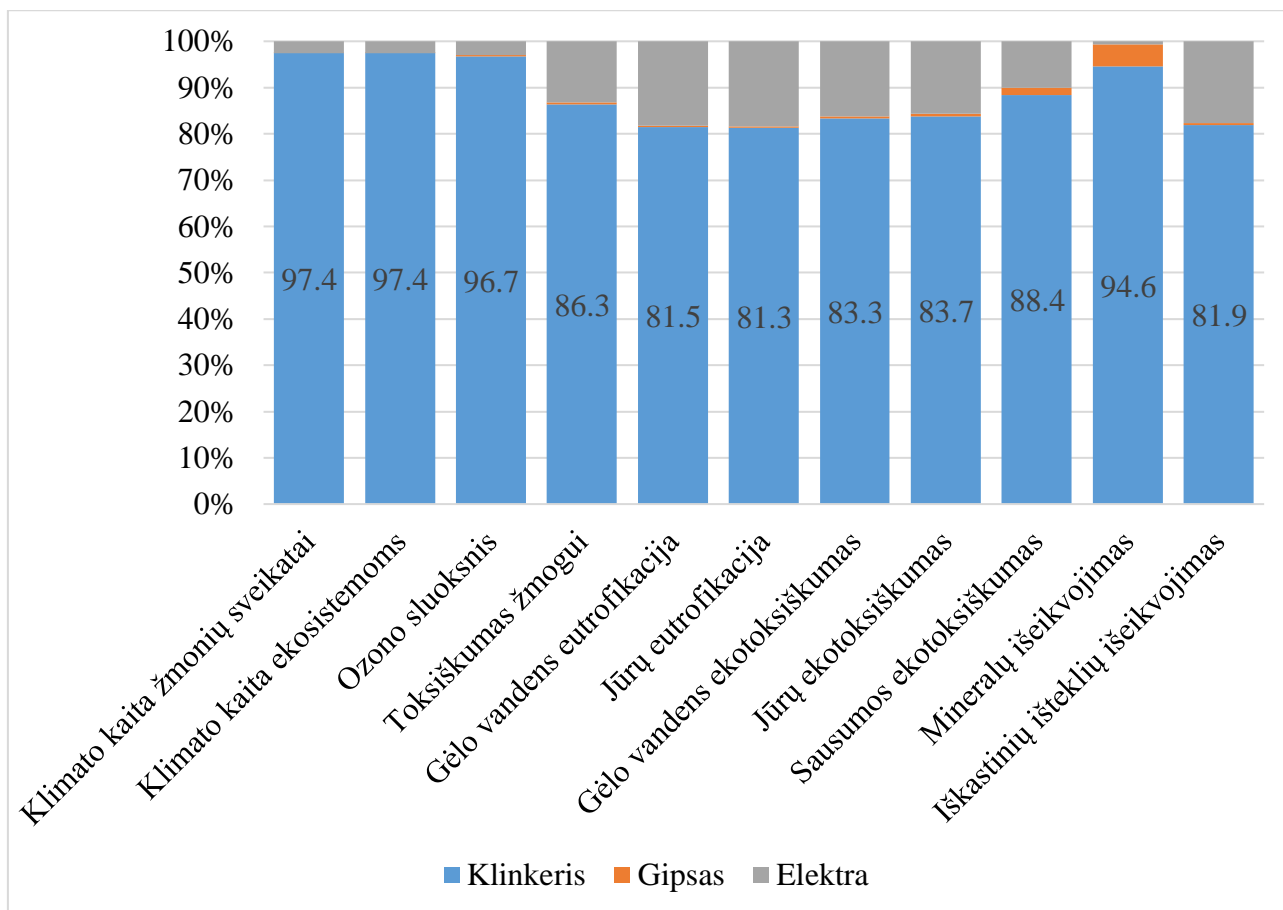
$0,081t * 2\% / 13\% = 0,012t$ O₂ [70]

***5:** Dietanolamino (DEA) reikalingas kiekis, norint sugauti 1mol CO₂, reikia 0,2mol MEA arba 0,3mol DEA tirpiklio. Pagal *2 skaičiavimų rezultatus, MEA kiekis yra 2,508kg, tai DEA reikalingas kiekis bus:

$0,3mol * 2,508kg / 0,2mol = 3,762kg$ DEA [69]

3.2. Poveikio vertinimas charakterizuojant rezultatus

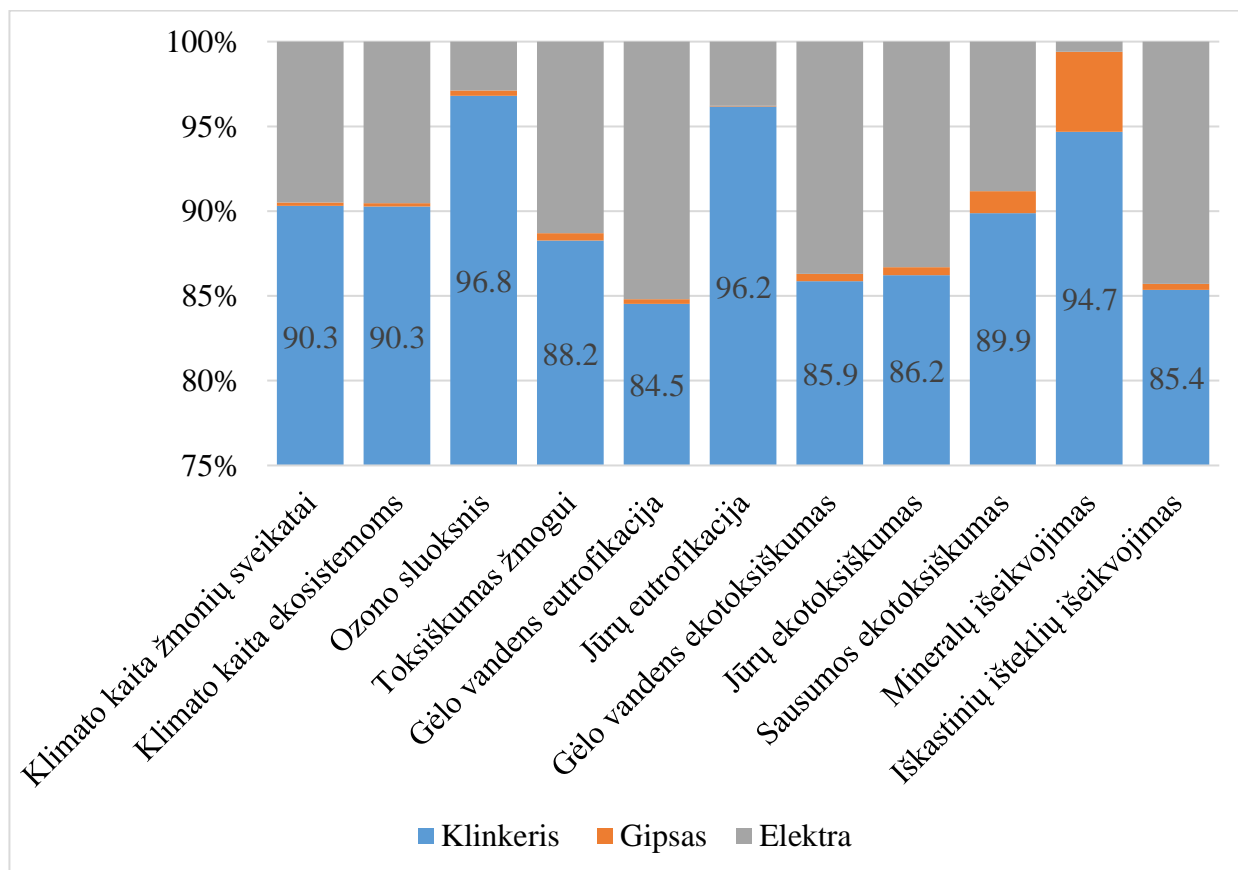
Atlikus būvio ciklo vertinimą SimaPro programinėje įrangoje ir naudojant ReCiPe metodą, gauti šie charakterizavimo grafikai. Jie rodo visų trijų vertintų alternatyvų šiame darbe poveikį aplinkai. Būvio ciklo vertinimo metodikoje pateiktos 18 poveikio aplinkai kategorijų, tačiau šiame darbe buvo vertinta 11 svarbiausių kategorijų, kurios turėjo didžiausią poveikį. Išskirtos šios kategorijos: klimato kaita žmonių sveikatai, klimato kaita ekosistemoms, ozono sluoksnis, toksiškumas žmogui, gėlo vandens eutrofikacija, jūrų eutrofikacija, gėlo vandens ekotoksiškumas, jūrų ekotoksiškumas, sausumos ekotoksiškumas, mineralų išsikvojimas bei iškastinių išteklių išsikvojimas. Šiame skyriuje pateikti charakterizuoti rezultatai visoms trimis cemento gamybos alternatyvoms. Reikšmingiausią poveikį sudarė klinkerio gamyba (po kaitinimo), gipsas bei elektros energijos sąnaudos. Kadangi iš kitų analizuotų medžiagų ir procesų didelis reikšmingumas aplinkai nepastebėtas, grafikuose jie nėra pateikti.



11 pav. Cemento gamybos poveikio aplinkai vertinimas, nenaudojant anglies dioksido surinkimo sistemos (charakterizuotas poveikis)

1 alternatyva. Gaminant cementą, nenaudojant anglies dioksido surinkimo sistemos, pastebimas tik neigiamas poveikis aplinkai. Didžiausias poveikis susidaro iš klinkerio gamybos. Labiausiai jo neigiamas poveikis pastebimas klimato kaitai žmonių sveikatai bei klimato kaitai ekosistemoms, kas sudaro net po 97,4% kiekvienai iš šių klasių, tai yra 37,5 kartų didesnis poveikis, nei iš gipso bei elektros energijos kartu sudėjus. Klinkerio gamyba taip pat turi didelį poveikį ozono sluoksniui, kas sudaro 96,7%, tai yra 29,3 karto didesnis poveikis nei iš kitų medžiagų. Taip pat didelis klinkerio poveikis yra mineralų išekvojimui, kas sudaro 94,6%, o gipsas sudaro 4,78%. Gipso poveikis mineralų išekvojimui turi didžiausią įtaką iš visų kitų kategorijų. Tai yra 3,27 karto didesnis poveikis nei sausumos ekotoksiškumui, 8,24 karto didesnis nei jūrų ekotoksiškumui, 8,97 karto didesnis nei gėlo vandens ekotoksiškumui, 15,83 karto didesnis nei jūrų eutrofikacijai ir 9,35 karto didesnis už toksiškumą žmogui. Klinkerio gamybos poveikis žmogaus toksiškumui sudaro 86,3%, tai yra 6,3 karto daugiau nei likusios medžiagos. Gėlo vandens eutrofikacijai klinkerio poveikis sudaro 81,5%, tai yra 4,4 karto daugiau nei likusios medžiagos. Jūrų eutrofikacijai klinkerio poveikis 81,3%, tai yra 4,35 karto daugiau nei likusios medžiagos ir iš visų kategorijų, klinkerio gamyba šioje klasėje, sudaro mažiausią poveikį. Tačiau šioje kategorijoje elektros energija turi didžiausią įtaką, lyginant su kitomis kategorijomis. Ji sudaro 18,398% ir tai yra 7,2 karto daugiau nei klimato kaitai žmonių sveikatai ir ekosistemoms, 6,17 karto daugiau nei ozono sluoksnio poveikiui, 1,4 karto daugiau nei žmogaus toksiškumui, nedaug skiriasi poveikis gėlo vandens eutrofikacijai – tik 1,01 karto. Gėlo vandens ekotoksiškumui elektros energijos poveikis yra mažesnis 1,13 karto, lyginant poveikį jūrų eutrofikacijai, taip pat 1,17 karto mažesnis poveikis jūrų ekotoksiškumui, 1,8 karto sausumos ekotoksiškumui, 29,67 karto mineralų išekvojimui ir 1,04 karto iškastinių išteklių išekvojimui. Gėlo

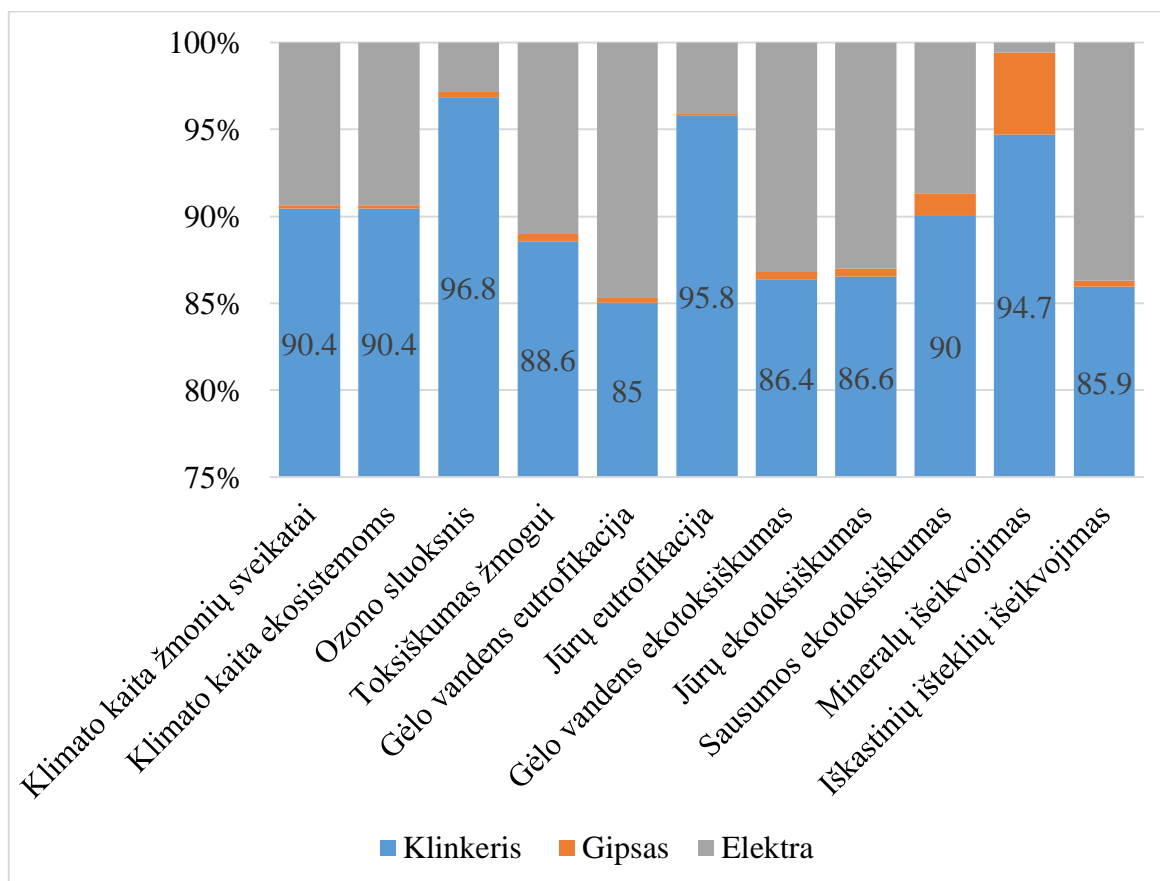
vandens ekotoksiškumui klinkerio poveikis yra 83,3%, tai yra beveik 5 kartais daugiau nei likusių medžiagų poveikis. Jūrų ekotoksiškumui jo poveikis sudaro 83,7%, tai yra 5,13 karto daugiau nei likusios medžiagos. Sausumos ekotoksiškumui sudaro 88,4%, tai yra 7,62 karto daugiau nei likusios medžiagos. Iškastinių išteklių išekvojimui klinkerio poveikis sudaro 81,9%, o tai yra 4,52 karto daugiau nei likusių medžiagų poveikis kartu sudėjus. (11 pav.)



12 pav. Cemento gamybos poveikio aplinkai vertinimas, naudojant anglies dioksido surinkimo sistemą su monoetanolamino tirpikliu (charakterizuotas poveikis)

2 alternatyva. Gaminant cementą, naudojant anglies dioksido surinkimo sistemą su MEA tirpikliu, pastebimas taip pat tik neigiamas poveikis aplinkai, kaip ir nenaudojant jokios CO₂ surinkimo sistemos ir taip pat didžiausias poveikis susidaro iš klinkerio gamybos. Labiausiai jo neigiamas poveikis pastebimas ozono sluoksniui, tai sudaro 96,8% ir tai yra 30,25 karto didesnis poveikis, nei gipso ir elektros energijos kartu sudėjus. Vos mažesnis klinkerio poveikis pastebimas jūrų eutrofikacijai, tai yra 96,2% ir 25,32 karto didesnis poveikis nei likusių medžiagų. Mineralų išekvojimui klinkerio gamybos poveikis sudaro 94,7%, o tai yra 17,87 karto daugiau nei likusios medžiagos. Tačiau šioje kategorijoje gipsas sudaro didžiausią poveikį, lyginant jį su kitomis kategorijomis, o tai yra 4,73% ir 3,58 karto didesnis jo poveikis nei sausumos ekotoksiškumui, 9,61 karto didesnis už poveikį jūrų ekotoksiškumui, 10,49 karto didesnis nei gėlo vandens ekotoksiškumui 10,75 karto didesnis už toksiškumą žmogui, 15,36 karto didesnis poveikis ozono sluoksniui, 23,65 karto didesnis klimato kaitai tiek žmonių sveikatai, tiek ekosistemoms, 19 kartu didesnis nei gėlo vandens eutrofikacijai ir 13,83 karto didesnis poveikis nei iškastinių išteklių išekvojimui. Klinkerio gamybos poveikis klimato kaitai žmonių sveikatai ir ekosistemoms sudaro po 90,3% kiekvienai iš šių kategorijų ir tai yra 9,3 karto daugiau nei likusių medžiagų poveikis. Poveikis žmogaus toksiškumui šios medžiagos yra 88,2%, o tai yra 7,47 karto daugiau nei likusių medžiagų.

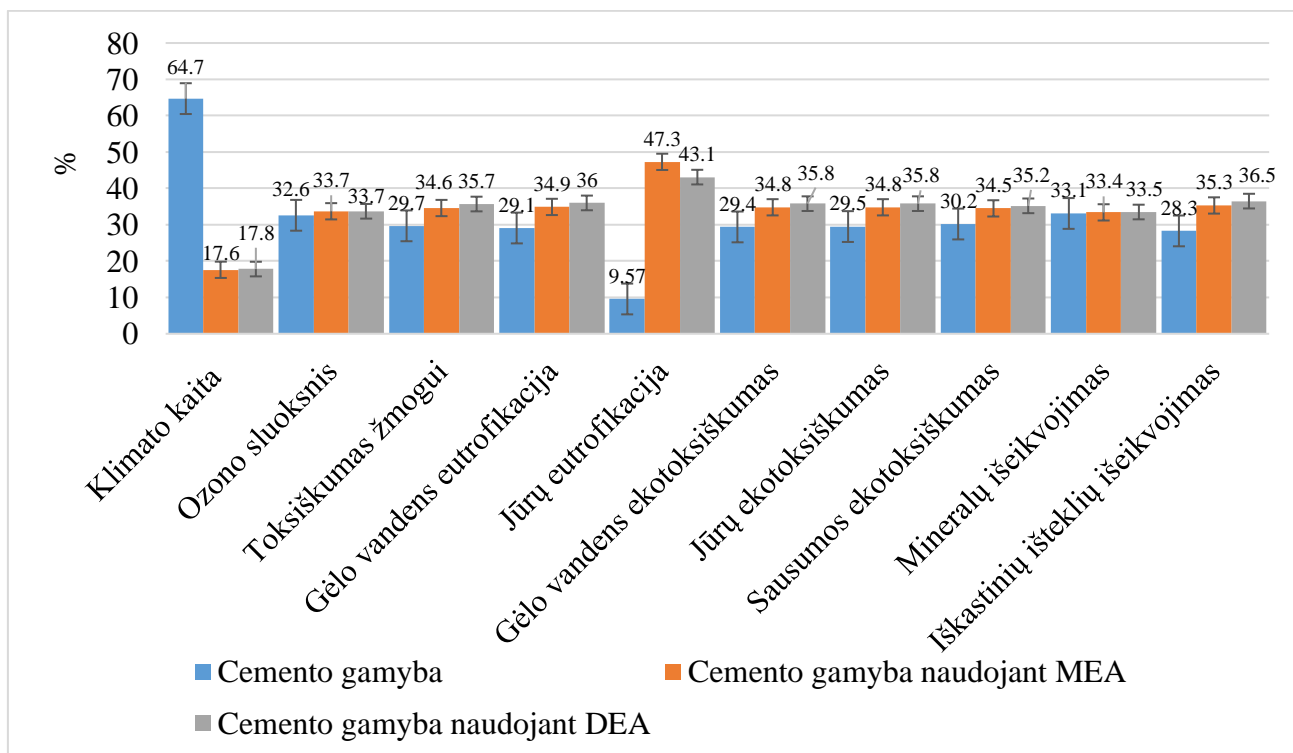
eutrofikacijai klinkeris sudaro 84,5% poveikio, tai yra 5,45 karto daugiau nei kitų medžiagų. Šioje kategorijoje klinkeris pasižymi, kaip mažiausiai darantis poveikį, lyginant jį su kitomis kategorijomis. Tačiau šioje kategorijoje elektros energijos poveikis, lyginant ją su kitomis kategorijomis, sudaro didžiausią poveikį. Ji sudaro 15,2% ir tai yra 1,6 karto daugiau nei klimato kaita žmonių sistemoms ir ekosistemoms, 5,3 karto daugiau nei ozono sluoksniui, 1,35 karto daugiau už poveikį žmogaus toksiškumui, 4,03 karto daugiau nei jūrų eutrofikacijai, 1,1 karto daugiau nei gėlo vandens ekotoksiškumui ir jūrų ekotoksiškumui, tiek pat kartų daugiau ir iškastinių išteklių išekvojimui. Elektros energija taip pat turi 1,7 karto didesnę poveiki sausumos ekotoksiškumui ir 25,9 karto daugiau mineralų išekvojimui nei gėlo vandens eutrofikacijai. Klinkerio gamyba gėlo vandens ekotoksiškumui sudaro 85,9% poveikį ir tai yra 6,1 karto daugiau nei likusios medžiagos. Jūrų ekotoksiškumui daro 86,2% poveikį, o tai yra 6,25 kartų daugiau už likusias medžiagas. Sausumos ekotoksiškumui sudaro 89,9% poveikį, kas yra 8,9 karto daugiau nei kitos medžiagos. Taip pat klinkerio gamyba daro poveikį iškastinių išteklių išekvojimui, tai sudaro 85,4%, kas yra 5,85 kartų daugiau už likusias medžiagas. (12 pav.)



13 pav. Cemento gamybos poveikio aplinkai vertinimas, naudojant anglies dioksido surinkimo sistemą su dietanolamino tirpikliu (charakterizuotas poveikis)

3 alternatyva. Gaminant cementą, naudojant anglies dioksido surinkimo sistemą su DEA tirpikliu, pastebimas taip pat tik neigiamas poveikis aplinkai, kaip ir nenaudojant jokios CO₂ surinkimo sistemos ir kaip naudojant CO₂ surinkimo sistemą su MEA tirpikliu. Taip pat, kaip ir praeituose cemento gamybos būduose, labiausiai neigiamas poveikis susidaro iš klinkerio gamybos. Didžiausias jo poveikis pastebimas ozono sluoksniui, tai sudaro 96,8% ir tai yra 30,25 karto didesnis poveikis, nei gipso ir elektros energijos kartu sudėjus. Mažesnis klinkerio poveikis matomas jūrų eutrofikacijai, tai yra 95,8% ir 22,8 karto didesnis poveikis nei kitų medžiagų. Mineralų išekvojimui klinkerio

gamybos poveikis sudaro 94,7%, o tai yra 17,87 karto daugiau nei likusios medžiagos. Tačiau šioje kategorijoje gipsas sudaro didžiausią poveikį, lyginant jį su kitomis kategorijomis, o tai yra 4,72% ir 3,63 karto didesnis jo poveikis nei sausumos ekotoksiškumui, 9,87 karto didesnis už poveikį jūrų ekotoksiškumui, 10,83 karto didesnis nei gėlo vandens ekotoksiškumui 11 kartų didesnis už toksiškumą žmogui, 15,37 karto didesnis poveikis ozono sluoksniui, 23,96 karto didesnis klimato kaitai tiek žmonių sveikatai, tiek ekosistemoms, 19,59 kartų didesnis nei gėlo vandens eutrofikacijai ir 14,35 karto didesnis poveikis nei iškastinių išteklių išekvojimui. Klinkerio gamybos poveikis klimato kaitai žmonių sveikatai ir ekosistemoms sudaro po 90,4% kiekvienai iš šių kategorijų ir tai yra 9,42 karto daugiau nei likusių medžiagų poveikis. Poveikis žmogaus toksiškumui šios medžiagos yra 88,6%, o tai yra 7,77 karto daugiau nei likusių medžiagų šioje kategorijoje. Gėlo vandens eutrofikacijai klinkeris sudaro 85% poveikio, tai yra 5,67 karto daugiau nei kitų medžiagų. Šioje kategorijoje klinkeris pasižymi, kaip mažiausiai darantis poveikį, lyginant jį su kitomis kategorijomis. Tačiau šioje kategorijoje elektros energijos poveikis, lyginant ją su kitomis kategorijomis, sudaro didžiausią poveikį. Ji sudaro 14,7% ir tai yra 1,57 karto daugiau nei klimato kaita žmonių sistemoms ir ekosistemoms, 5,16 karto daugiau nei ozono sluoksniui, 1,34 karto daugiau už poveikį žmogaus toksiškumui, 3,59 karto daugiau nei jūrų eutrofikacijai, 1,1 karto daugiau nei gėlo vandens ekotoksiškumui ir jūrų ekotoksiškumui, tiek pat kartų daugiau ir iškastinių išteklių išekvojimui. Elektros energija taip pat turi 1,7 karto didesnę poveiki sausumos ekotoksiškumui ir 25,13 karto daugiau mineralų išekvojimui nei gėlo vandens eutrofikacijai. Klinkerio gamyba gėlo vandens ekotoksiškumui sudaro 86,4% poveikį ir tai yra 6,35 karto daugiau nei likusios medžiagos. Jūrų ekotoksiškumui daro 86,6% poveikį, o tai yra 6,46 kartų daugiau už likusias medžiagas. Sausumos ekotoksiškumui sudaro 90% poveikį, kas yra 9 kartais daugiau nei kitos medžiagos. Taip pat klinkerio gamyba daro poveikį iškastinių išteklių išekvojimui, tai sudaro 85,9%, kas yra 6,1 karto daugiau už likusias medžiagas. (13 pav.)



14 pav. Cemento gamybos poveikio aplinkai vertinimas ir palyginimas visų procesų (charakterizuotas poveikis)

14 paveiksle pateiktas poveikis 11 kategorijų pagal cemento gamybos būdą. Klimato kaita žmonių sveikatai didžiausias poveikis pastebimas iš cemento gamybos, kai anglies dioksidas nesurenkamas. Tai yra 3,68 kartais didesnis poveikis, nei naudojant CO₂ surinkimo sistemą su MEA tirpikliu ir 3,63 karto didesnis poveikis nei naudojant sistemą su DEA tirpikliu. Naudojant MEA tirpiklį, poveikis klimato kaitai žmonių sveikatai yra 0,2% mažesnis nei naudojant DEA tirpiklį. Klimato kaitos poveikis ekosistemoms didžiausias pastebimas taip pat iš cemento gamybos, kai nenaudojama jokia CO₂ surinkimo sistema. Tai yra 3,69 kartais didesnis poveikis, nei naudojant CO₂ surinkimo sistemą su MEA tirpikliu ir 3,63 karto didesnis poveikis nei naudojant sistemą su DEA tirpikliu. Naudojant MEA tirpiklį, poveikis klimato kaitai ekosistemoms yra 0,3% mažesnis nei naudojant DEA tirpiklį. Poveikis ozono sluoksniui tiek naudojant CO₂ surinkimo sistemą su MEA tirpikliu, tiek ir su DEA, yra vienodas ir tai yra 1,1% didesnis poveikis, nei nenaudojant jokios sistemos. Toksiškumas žmogui pastebimas didžiausias, kai yra naudojamas DEA tirpiklis, tačiau tai yra 1,1% daugiau nei naudojant MEA tirpiklį ir 6% daugiau nei nenaudojant jokios surinkimo sistemos. Gėlo vandens eutrofikacijai poveikis taip pat didžiausias, kai yra naudojamas DEA tirpiklis, bet skiriasi tik 1,1% nuo naudojanat MEA tirpiklį ir 6,9% nenaudojant jokio tirpiklio. Poveikis jūrų eutrofikacijai pastebimas didžiausias iš cemento gamybos, kai yra naudojamas MEA tirpiklis, 4,2% mažesnis poveikis, kai yra naudojamas DEA ir 4,94 kartų mažesnis poveikis iš cemento gamybos, kai nenaudojama jokia anglies dioksido surinkimo sistema. Gėlo vandens ekotoksiškumui ir jūrų ekotoksiškumui poveikis yra beveik vienodas. Naudojant DEA jis yra didžiausias. 1% didesnis, nei naudojant MEA ir 6,4% gėlo vandens ekotoksiškumui bei 6, 5% jūrų ekotoksiškumui didesnis, nei nenaudojant CO₂ surinkimo sistemų. Poveikis sausumos ekotoksiškumui didžiausias taip pat, kai naudojamas DEA tirpiklis, tačiau nuo naudojant MEA tirpiklį skiriasi tik 0,7%, o nuo nenaudojant tirpiklių, skiriasi 5%. Mineralų išieikvojimui poveikis iš visų alternatyvų yra panašus, daugiausia išieikvojama, kai naudojamas DEA tirpiklis, 0,1% mažiau išieikvojama, naudojant MEA ir 0,4% mažiau išieikvojama, nenaudojant sistemų su tirpikliais. Poveikis iškastinių išteklių išieikvojimui didžiausias taip pat, kai naudojama alternatyva su DEA, 1,2% mažesnis poveikis, kai naudojama alternatyva su MEA ir 8,2% mažesnis poveikis kai naudojama pirma alternatyva.

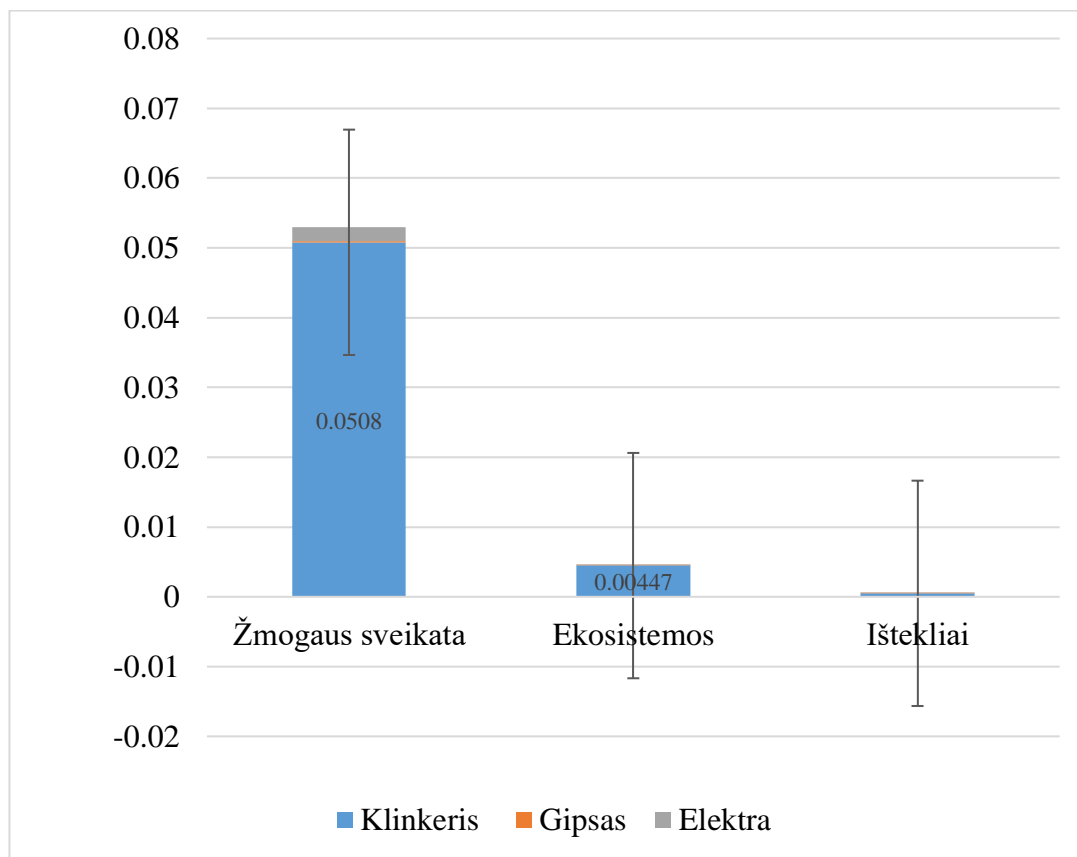
Kitų autorių atliktuose tyrimuose pastebimas panašus poveikis lyginant anglies dioksido surinkimo sistemas su skirtingomis alternatyvomis. Pavyzdžiui, Diego Garcia – Gusano ir kt atliko būvio ciklo vertinimą cemento gamyboje su anglies dioksido surinkimo sistemomis ir nustatė, kad naudojant surinkimo sistemas, jos padeda sumažinti pasaulinio atšilimo potencialą, o kitos kategorijos tik auga. Tyrime autoriai padarė išvadą, kad naudojant surinkimo sistemas padaroma daugiau neigiamo poveikio aplinkai bei žmonių sveikatai, nei nesurenkat CO₂ [21].

Anna Korre ir kt, remiantis būvio ciklo metodika, atliko CO₂ sugavimo tyrimą iškastinio kuro energijos gamyboje ir lygino poveikį aplinkai, kai yra sugaunamas CO₂ ir kai jis tiesiog paleidžiamas į aplinką. Taigi nustatė, kad surenkat CO₂, šiltnamio efektą sukeliančių dujų išmetimas į aplinką gali sumažėti 80%, tačiau sunaudojama daugiau energijos ir išteklių, kas sukelia dar didesnę poveikį gamtai ir žmonėms. Autoriai padarė išvadą, kad neigiamas klimato pokyčių poveikis gamtinėms ir žmonių sistemoms bus sunkus, negrįžtamas ir neaišku kaip tai gali atsiliepti po daugelio metų, todėl siūlo nenaudoti anglies dioksido sistemų arba ieškoti alternatyvų [76].

3.3. Poveikio vertinimas normalizuojant rezultatus

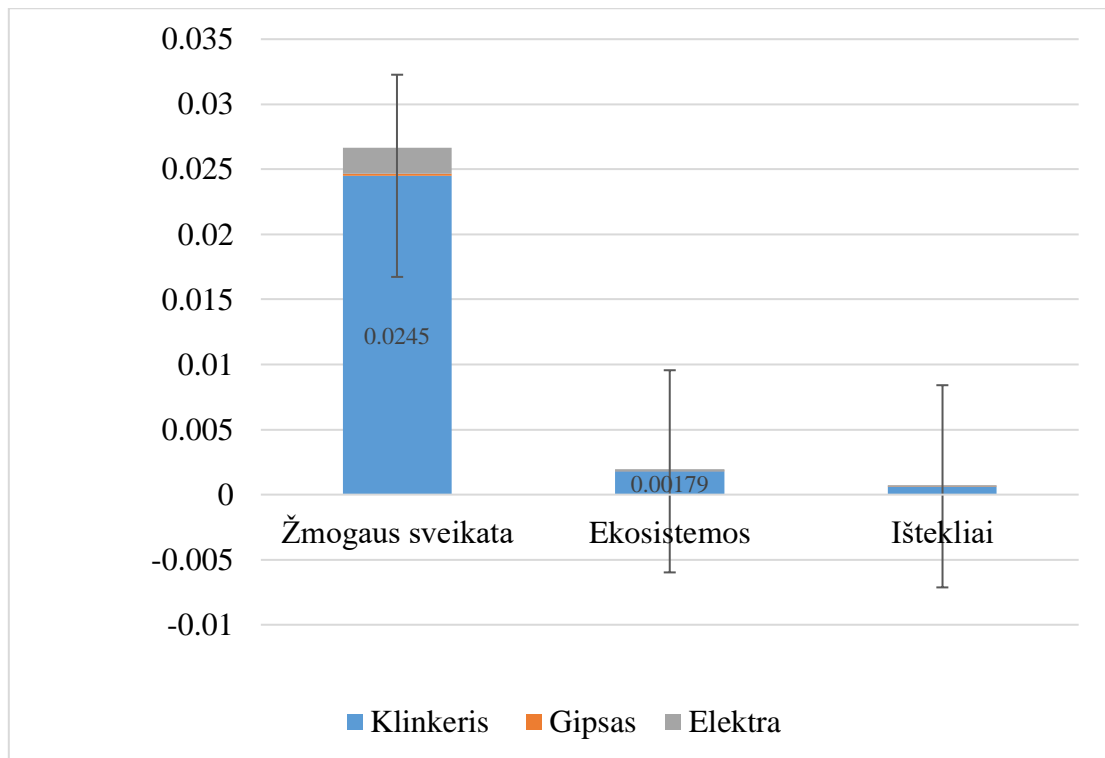
Atlikus būvio ciklo vertinimą SimaPro programinėje įrangoje ir naudojant ReCiPe metodą, gauti šie normalizavimo grafikai. Jie rodo santykinę trijų kategorijų (žmogaus sveikatos, ekosistemų ir

išteklių) reikšmę ir kiek tam tikro regiono gyventojas išmeta emisijų per metus. Kaip ir charakterizuojant rezultatus, taip ir normalizuojant, reikšmingiausia poveikį sudarė klinkerio gamyba, gipsas bei elektros energijos sąnaudos. Kadangi iš kitų analizuotų medžiagų ir procesų didelis reikšmingumas aplinkai nepastebėtas, grafikuose jie nėra pateikti. Didžiausias poveikis pastebimas žmogaus sveikatai, o mažiausias ištekliams.



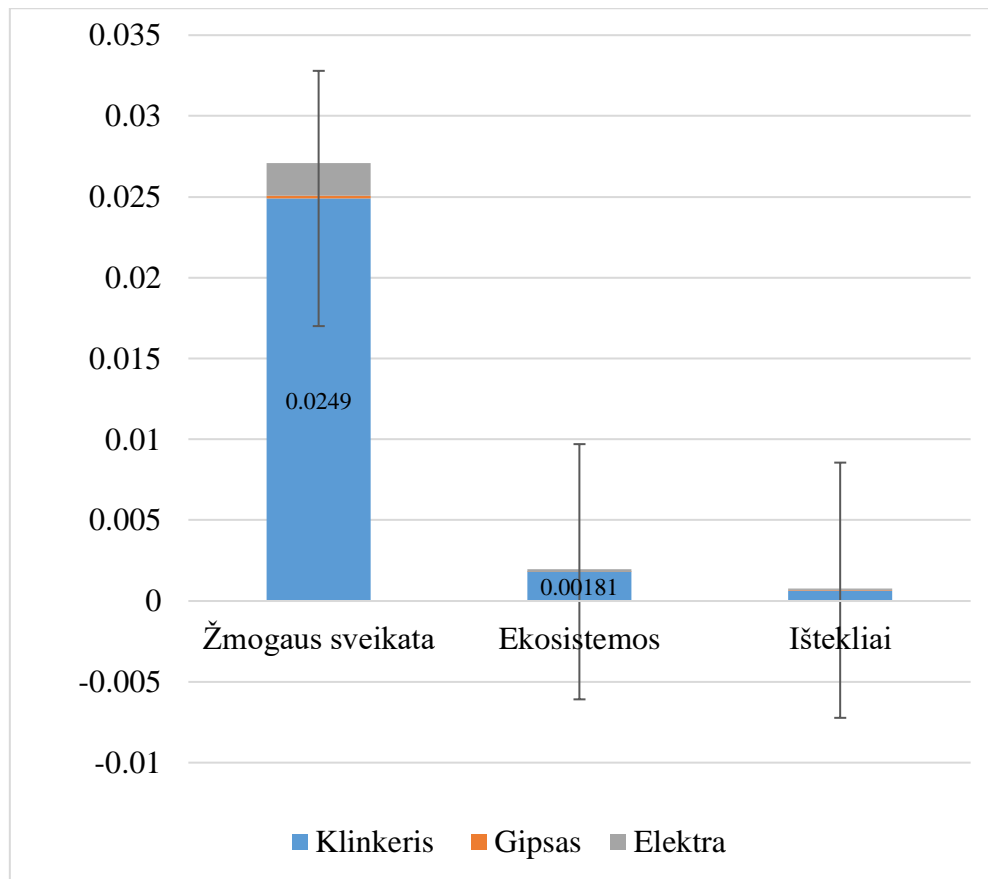
15 pav. Cemento gamybos poveikio aplinkai vertinimas, nenaudojant anglies dioksido surinkimo sistemos (normalizuotas poveikis)

Cemento gamybos, nenaudojant anglies dioksido surinkimo sistemos, poveikis labiausiai pastebimas žmogaus sveikatai: 11,45 kartais daugiau nei ekosistemoms ir 87,75 kartais daugiau nei ištekliams. Šios alternatyvos poveikis žmogaus sveikatai didžiausias yra iš klinkerio gamybos. Klinkeris sudaro 302,38 kartais didesnę poveikį nei gipsas ir 25,4 kartais didesnę nei elektros energija. Ekosistemoms taip pat didžiausias poveikis yra iš klinkerio. Jis sudaro 1010 kartų didesnę poveikį nei gipsas ir 29,41 kartą didesnę poveikį nei elektra. Ištekliams, kaip ir žmogaus sveikatai ir ekosistemoms, didžiausias poveikis pastebimas iš klinkerio. Klinkeris sudaro 137 kartais didesnę poveikį nei gipsas ir 4,83 kartais didesnę poveikį nei elektros energija. (15 pav.)



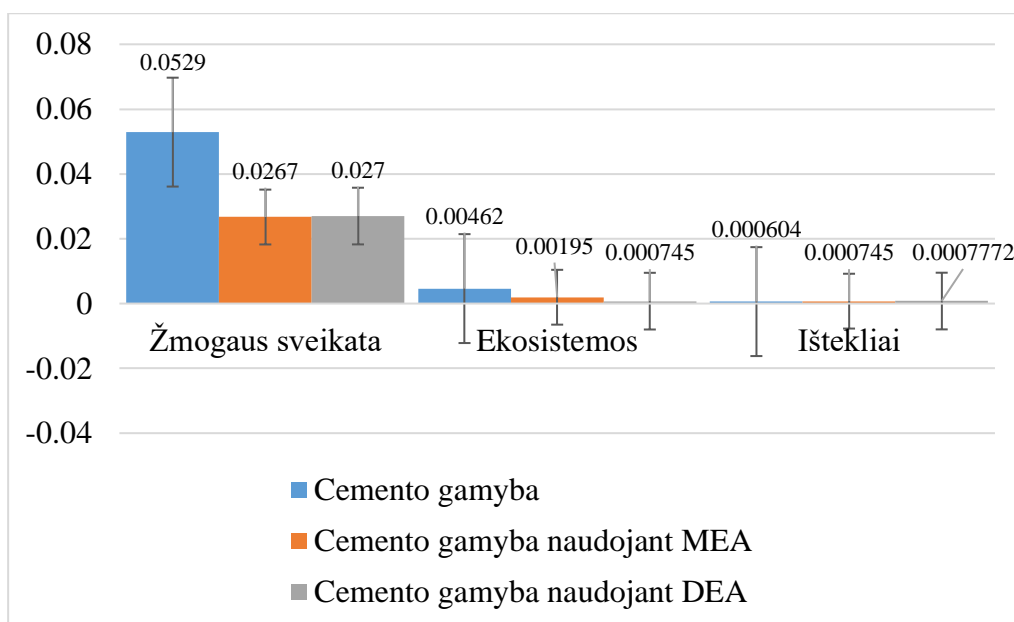
16 pav. Cemento gamybos poveikio aplinkai vertinimas, naudojant anglies dioksido surinkimo sistemą su monoetanolamino tirpikliu (normalizuotas poveikis)

Cemento gamybos, naudojant anglies dioksido surinkimo sistemą su MEA tirpikliu, poveikis taip pat labiausiai pastebimas žmogaus sveikatai: 13,69 kartais daugiau nei ekosistemoms ir 38,34 kartais daugiau nei ištekliams. Šios alternatyvos poveikis žmogaus sveikatai didžiausias yra iš klinkerio gamybos. Klinkeris sudaro 145,83 kartais didesnę poveikį nei gipsas ir 12,25 kartais didesnę nei elektros energija. Ekosistemoms taip pat didžiausias poveikis yra iš klinkerio. Jis sudaro 404 kartais didesnę poveikį nei gipsas ir 11,78 kartais didesnę poveikį nei elektra. Ištekliams, kaip ir žmogaus sveikatai ir ekosistemoms, didžiausias poveikis pastebimas iš klinkerio. Klinkeris sudaro 176 kartais didesnę poveikį nei gipsas ir 6,2 kartais didesnę poveikį nei elektros energija. (16 pav.)



17 pav. Cemento gamybos poveikio aplinkai vertinimas, naudojant anglies dioksido surinkimo sistemą su dietanolamino tirpikliu (normalizuotas poveikis)

Cemento gamybos, naudojant anglies dioksido surinkimo sistemą su DEA tirpikliu, taip pat, kaip ir praeitose alternatyvose, poveikis labiausiai pastebimas žmogaus sveikatai: 13,76 kartais daugiau nei ekosistemoms ir 37,39 kartais daugiau nei ištekliams. Šios alternatyvos poveikis žmogaus sveikatai didžiausias yra iš klinkerio gamybos. Klinkeris sudaro 148,21 karto didesnę poveikį nei gipsas ir 12,45 kartais didesnę nei elektros energija. Ekosistemoms taip pat didžiausias poveikis yra iš klinkerio. Jis sudaro 409 kartų didesnę poveikį nei gipsas ir 11,91 didesnę poveikį nei elektra. Ištekliams, kaip ir žmogaus sveikatai ir ekosistemoms, didžiausias poveikis pastebimas iš klinkerio. Klinkeris sudaro 183 kartais didesnę poveikį nei gipsas ir 6,47 kartų didesnę poveikį nei elektros energija. (17 pav.)

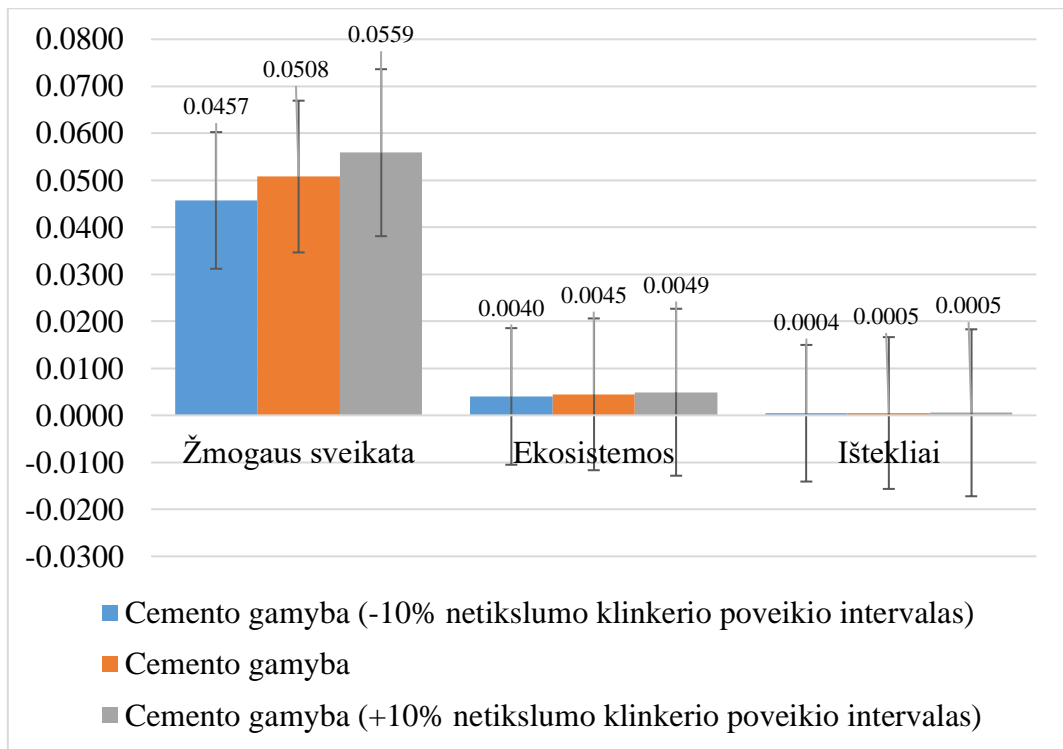


18 pav. Cemento gamybos poveikio aplinkai vertinimas ir palyginimas visų procesų (normalizuotas poveikis)

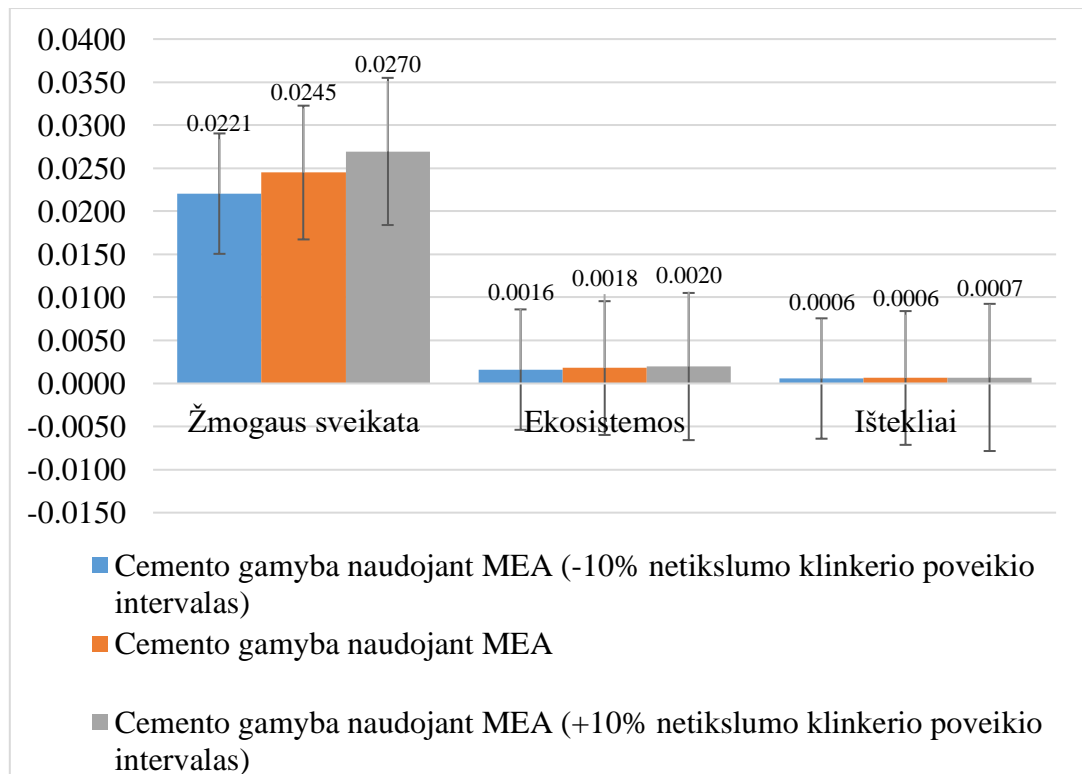
18 paveiksle pateikta normalizuotų rezultatų palyginimas žmogaus sveikatos, ekosistemų ir išteklių kategorijoms, pagal cemento gamybos būdus. Didžiausias neigiamas poveikis žmogaus sveikatos ir ekosistemų kategorijoms, pastebimas iš cemento gamybos, nenaudojant jokios CO₂ surinkimo sistemos. Žmogaus sveikatai pirmą alternatyvą daro 1,98 karto didesnę poveikį nei antra alternatyva ir 1,96 karto didesnę nei trečia alternatyva. Ekosistemoms pirmą alternatyvą daro 2,37 kartais didesnę poveikį nei antra alternatyva ir 6,2 karto didesnę nei trečia. Ištekliams visos trys alternatyvos daro panašų poveikį. Cemento gamyba, naudojant DEA daro tik 1,3 karto didesnę poveikį nei nenaudojant tirpiklių ir tik 1,04 karto didesnę poveikį nei naudojant MEA tirpiklį. Pirmą alternatyvą žmogaus sistemai daro 11,45 kartais didesnę poveikį nei ekosistemoms ir 87,58 kartais didesnę nei ištekliams. Antra alternatyva daro žmogaus sveikatai 13,69 kartų didesnę poveikį nei ekosistemoms ir 35,84 didesnę nei ištekliams. Trečios alternatyvos poveikis yra 36,24 kartais didesnis žmonių sveikatai nei ekosistemoms ir 34,74 kartais didesnę nei ištekliams.

3.4. Jautrumo analizė

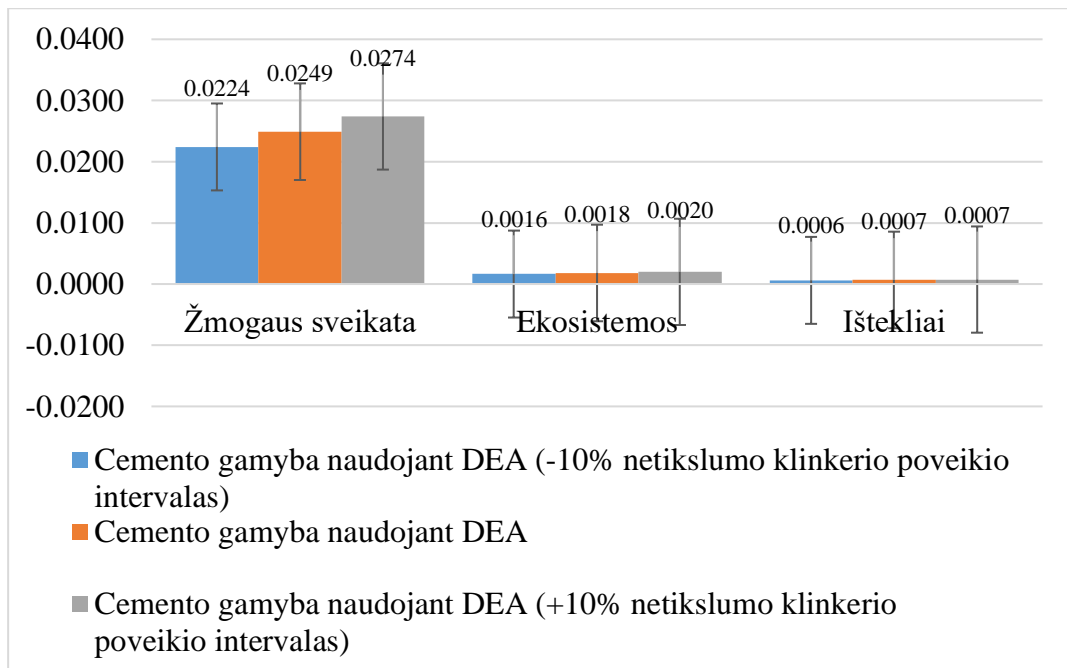
Pagal būvio ciklo metodiką, reikia atlikti jautrumo analizę, kad sumažinti duomenų netikslumą ir patikrinti modeliavimo tvirtumą. Kadangi klinkerio gaminimas cemento gamyboje daro didžiausią poveikį aplinkai, todėl buvo pasirinktas šis rodiklis su 10% netikslumo intervalu. Buvo pasirinkta lyginti normalizuotus rezultatus, kad pamatyti ar 10% netikslumo intervalas turi įtakos žmogaus sveikatai, ekosistemoms bei ištekliams.



19 pav. Cemento gamybos poveikio aplinkai normalizavimas, taikant jautrumo analizę



20 pav. Cemento gamybos, naudojant anglies dioksido surinkimo sistemą su monoetanolamino tirpikliu, poveikio aplinkai normalizavimas, taikant jautrumo analizę



21 pav. Cemento gamybos, naudojant anglies dioksido surinkimo sistemą su dietanolamino tirpikliu, poveikio aplinkai normalizavimas, taikant jautrumo analizę

Atlikus jautrumo analizę, iš 19, 20 ir 21 paveikslo matoma, kad didžiausias neigiamas poveikis išlieka žmogaus sveikatai, o mažiausias ištekliams. Lyginant visas alternatyvas, pastebima, kad tiek pamažinus, tiek padidinus 10% klinkerio gamybos poveikį aplinkai, didelio poveikio skirtumo nėra. Matomas tolygus poveikio padidėjimas visose kategorijose. Cemento gamyboje be CO₂ surinkimo sistemos, padidinus klinkerio gamybos poveikį 10%, žmogaus sveikatai poveikis padidėtų 1,1 karto, ekosistemoms – 1,09 karto, o ištekliams jokie skirtumo nesukeltų. Naudojant cemento gamybą su CO₂ surinkimu, panaudojant MEA tirpiklį ir padidinus klinkerio poveikį 10%, žmogaus sveikatai poveikis padidėtų taip pat 1,1 karto, ekosistemoms - 1,11 karto, o ištekliams – 1,17 karto. Naudojant cemento gamybą su CO₂ surinkimu, panaudojant DEA tirpiklį ir taip pat padidinus klinkerio poveikį 10%, žmogaus sveikatai poveikis padidėtų 1,1 karto, ekosistemoms - 1,11 karto, o ištekliams jokie skirtumo nesukeltų. Cemento gamyboje be CO₂ surinkimo sistemos, sumažinus klinkerio gamybos poveikį 10%, žmogaus sveikatai poveikis sumažėtų 1,11 karto, ekosistemoms – 1,13 karto, o ištekliams – 1,13 karto. Naudojant cemento gamybą su CO₂ surinkimu, panaudojant MEA tirpiklį ir sumažinus klinkerio poveikį 10%, žmogaus sveikatai poveikis sumažėtų taip pat 1,11 karto, ekosistemoms - 1,13 karto, o ištekliams jokie skirtumo nesukeltų. Naudojant cemento gamybą su CO₂ surinkimu, panaudojant DEA tirpiklį ir taip pat sumažinus klinkerio poveikį 10%, žmogaus sveikatai poveikis sumažėtų 1,11 karto, ekosistemoms - 1,13 karto, o ištekliams – 1,17 karto.

Išvados

1. Atlikus mokslinės literatūros analizę, buvo nustatyta, kad cemento gamybos pramonė sudaro net 5 procentus visų išmetamų teršalų kiekio, kas smarkiai prisideda prie pasaulinio atšilimo. Norint sumažinti išmetamo anglies dioksido kiekį, yra siūloma įdiegti anglies dioksido surinkimo sistemas.
2. Būvio ciklo vertinimas cemento gamybai atliktas naudojant tris alternatyvas: nesurenkant anglies dioksido, surenkant anglies dioksidą su monoetanolamino tirpikliu (naudojant „Po degimo“ metodą) ir surenkant anglies dioksidą su dietanolamino tirpikliu (naudojant taip pat „Po degimo“ metodą).
3. Charakterizuoti rezultatai parodė, kad nesurenkant anglies dioksido, didžiausias neigiamas poveikis iš cemento gamybos pastebimas klimato kaitai – 3,68 karto didesnis nei naudojant antrą alternatyvą ir 3,63 karto nei naudojant trečią. Tačiau kitoms kategorijoms pirma alternatyva daro mažiausią poveikį. Panaudojant surinkimą su monoetanolaminu, pastebima, kad iš visų kategorijų didžiausias neigiamas poveikis pastebimas jūrų eutrofikacijai – 1,1 karto didesnis, nei naudojant dietanolamino tirpiklį ir 4,5 karto nei nenaudojant jokios surinkimo sistemos. Likusiom kategorijom didžiausią poveikį daro alternatyvai, kai anglies dioksidas surenkamas, naudojant dietanolamino tirpiklį.
4. Rezultatų normalizavimas parodė, kad visos trys alternatyvos daro didžiausią poveikį žmogaus sveikatai, o mažiausią ištekliams. Visoms trimis kategorijoms didžiausias neigiamas poveikis pastebimas iš cemento gamybos, kai nesurenkamas anglies dioksidas. Žmogaus sveikatai ši alternatyva daro 1,98 karto didesnę poveikį nei antra ir 1,96 karto didesnę nei trečia alternatyva. Ekosistemoms pirma alternatyva daro 2,37 kartais didesnę poveikį nei antra alternatyva ir 6,2 karto didesnę nei trečia. Ištekliams cemento gamyba, naudojant dietanolaminą daro 1,3 karto didesnę poveikį nei nenaudojant tirpiklių ir 1,04 karto didesnę poveikį nei naudojant monoetanolaminą.
5. Jautrumo analizė parodė, kad tiek sumažinus, tiek padidinus 10 procentų klinkerio gamybos poveikį aplinkai, didelio skirtumo žmogaus sveikatai, ekosistemoms ir ištekliams tai nesukels. Visose alternatyvose, sumažinus klinkerio gamybos poveikį 10 procentų, žmogaus sveikatai poveikis sumažėtų 1,11 karto, ekosistemoms – 1,13 karto. Ištekliams pirmoje alternatyvoje sumažėtų– 1,13 karto, antroje – jokio poveikio skirtumo nesukeltų, o trečioje sumažėtų – 1,17 karto.
6. Atlikus būvio ciklo vertinimą cemento gamybai, naudojant anglies dioksido surinkimo sistemas, nustatyta, kad mažiausias poveikis aplinkai būtų daromas globalinio atšilimo kategorijai, tačiau kitų vertintų kategorijų atveju poveikis didėtų. Lyginant monoetanolamino ir dietanolamino tirpiklius, veiksmingiau būtų naudoti monoetanolaminą, kadangi jo kiekio ir šilumos sąnaudų reikėtų mažiau bei daugumai vertintų kategorijų jis daro mažesnę neigiamą poveikį.

Literatūros sąrašas

1. CHARLES, D. Keeling, et al. Atmospheric carbon dioxide variations at Mauna Loa Observatory. *Taylor & Francis* [interaktyvus]. Hawaii, December 2016, vol. **15** [žiūrėta 2019-09-15]. ISSN 0040-2826. Prieiga per doi: 10.3402/tellusa.v28i6.11322
2. Anglies dioksidas. *Aiviks* [interaktyvus]. 2019 [žiūrėta 2019-10-10]. Prieiga per: <https://aplinka.lt/co2-anglies-dioksidas>
3. CHIH-HUNG, Huang et al. CO₂ Utilization. *Department of Chemical Engineering, National Tsing Hua University* [interaktyvus]. China, 2014, vol **480**(499) [žiūrėta 2019-11-10]. Prieiga per doi: 10.4209/aaqr.2013.10.0326
4. HENDRIKS, Chris A., et al. Emission reduction of greenhouse gases from the cement industry. In: *Proceedings of the fourth international conference on greenhouse gas control technologies* [interaktyvus]. Austria, 1998, (939-944) [žiūrėta 2020-04-27]. Prieiga per: <http://www.ieagreen.org.uk/prghgt42.htm>
5. PEHNT, Martin et al. Life cycle assessment of carbon dioxide capture and storage from lignite power plants. *International Journal of Greenhouse Gas Control* [interaktyvus]. Germany, 2009, vol. **1**(49-66) [žiūrėta 2020-04-25]. Prieiga per doi: 10.1016/j.ijggc.2008.07.001
6. HENDRIKS, Chris A., et al. Emission reduction of greenhouse gases from the cement industry. In: *Proceedings of the fourth international conference on greenhouse gas control technologies* [interaktyvus]. Austria, 1998, (939-944) [žiūrėta 2020-04-27]. Prieiga per: <http://www.ieagreen.org.uk/prghgt42.htm>
7. MAČIEKUS, Venatas. Cemento pramonė. *Visuotinė lietuvių enciklopedija* [interaktyvus]. 2020 [žiūrėta 2020-05-07]. Prieiga per: <https://www.vle.lt/Straipsnis/cemento-pramone-59694>
8. UAB AKMENĖS CEMENTAS. [interaktyvus]. [žiūrėta 2020-05-07]. Prieiga per: <https://cementas.lt/>
9. EA. Cement Technology Roadmap 2009: Carbon emissions reductions up to 2050. *WBCSD* [interaktyvus]. USA, January 2009 [žiūrėta 2020-04-29]. Prieiga per: <http://wbcsdpublications.org/project/cement-technology-roadmap-2009-carbon-emissions-reductions-up-to-2050>
10. FEIZ, Roozbeh, et al. Improving the CO₂ performance of cement, part I: utilizing life-cycle assessment and key performance indicators to assess development within the cement industry. *Journal of Cleaner Production* [interaktyvus]. Sweden, 2015, vol. **98**(272-281) [žiūrėta 2020-05-07]. Prieiga per doi: 10.1016/j.jclepro.2014.01.083
11. MELC. Portlandcementis. *Visuotinė lietuvių enciklopedija* [interaktyvus]. 2020 [žiūrėta 2020-05-17]. Prieiga per: <https://www.vle.lt/Straipsnis/portlandcementis-6429#articleImages-2>
12. KOOLS, Ramses. CO₂ sequestration and utilization in cement-based materials. *University of Amsterdam*. Amsterdam, July 2018 [žiūrėta 2020-04-29]. ISSN 10371826
13. Integrated carbon capture solution unveiled for cement and concrete. *Construction climate challenge* [interaktyvus]. USA, March 2018 [žiūrėta 2020-04-25]. Prieiga per: <https://constructionclimatechallenge.com/2018/03/07/integrated-carbon-capture-solution-unveiled-cement-concrete/>
14. ERNST, Worrell et al. Carbon dioxide emissions from the global cement industry. *Energy Analysis Department, Lawrence Berkeley National Laboratory* [interaktyvus]. Mexico, 2001, vol **26**(303-290) [žiūrėta 2019-11-15]. ISSN 303-290. Prieiga per doi: 10.1146/annurev.energy.26.1.303
15. RICHARD, Heede. Tracing anthropogenic carbon dioxide and methane emissions to fossil fuel and cement producers. *Climatic Change* [interaktyvus]. USA, November 2013, vol **122**(229-241) [žiūrėta 2019-09-28]. ISSN 229-241. Prieiga per doi: 10.1007/s10584-013-0986-y

16. BIGIO, A. Cities and climate change. *Discussion paper for the World Development Report*. USA, November 2008 [interaktyvus], [žiūrėta 2019-09-29].
17. REHAN, R et al. Carbon dioxide emissions and climate change: policy implications for the cement industry. *Environmental science & policy* [interaktyvus]. London, 2005, vol. **105**(114) [žiūrėta 2019-12-14]. ISSN 1462-9011. Prieiga per doi: 10.1016/j.envsci.2004.12.006
18. KING, A. David. Climate Change Science: Adapt, Mitigate, or Ignore?. *Policy forum environment* [interaktyvus]. USA, 2004, vol. **303** [žiūrėta 2020-01-10]. ISSN 0036-8075. Prieiga per doi: 10.1126/science.1094329
19. EUROPEAN COMMISSION. United Nations Framework Convention on Climate Change. EU. [interaktyvus]. [žiūrėta 2020-01-10]. Prieiga per: [kiotohttps://ec.europa.eu/knowledge4policy/organisation/unfccc-united-nationsframework-convention-climate-change_en](https://ec.europa.eu/knowledge4policy/organisation/unfccc-united-nationsframework-convention-climate-change_en)
20. LIETUVOS RESPUBLIKOS APLINKOS MINISTERIJOS APLINKOS PROJEKTŲ VALDYMO AGENTŪRA. Junginių Tautų bendrojo klimato kaitos konvencija ir Kioto protokolas [interaktyvus]. [žiūrėta 2020-01-10]. Prieiga per: <https://www.apva.lt/sajungos-siltnamio-efekta-sukeliamiu-duju-registras/jungtiniutautu-bendrojo-klimato-kaitos-konvencija-ir-kioto-protokolas/>
21. GARCÍA-GUSANO, Diego, et al. Life Cycle Assessment of applying CO₂ post-combustion capture to the Spanish cement production. *Journal of Cleaner Production* [interaktyvus]. Spain, December 2013, vol. **104**(328-338) [žiūrėta 2020-04-28]. Prieiga per doi: 10.1016/j.jclepro.2013.11.056
22. U.S. Geological Survey (USGS). Cement Statistics and Information. [interaktyvus]. August, 2017. [žiūrėta 2020-04-29]. Prieiga per: <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/cement/mcs-2017-cemen.pdf>
23. IEA. Cement Technology Roadmap 2009: Carbon emissions reductions up to 2050. *WBCSD* [interaktyvus]. USA, January 2009 [žiūrėta 2020-04-29]. Prieiga per: <http://wbcspdpublications.org/project/cement-technology-roadmap-2009-carbon-emissions-reductions-up-to-2050>
24. KUNG, Huang et al. Transition-metal-catalyzed C–C bond formation through the fixation of carbon dioxide. *Chem Soc Rev* [interaktyvus]. China, September 2010, vol. **40** [žiūrėta 2020-01-10]. ISSN 2435-2452. Prieiga per doi: 10.1039/c0cs00129e
25. JUNGTTINIŲ TAUTŲ VYSTYMO PROGRAMA. *Sustainable development goals*, 2008.
26. McKIBBIN, J. Warwick et al. Climate policy and uncertainty: the roles of adaptation versus mitigation. *Economics and environment network* [interaktyvus]. Australia, March 2003 [žiūrėta 2020-01-11]. Prieiga per: <http://een.anu.edu.au/>
27. HUQ, Saleemul. Climate change and development links. *The gatekeeper series 123, International Institute for Environment and Development* [interaktyvus]. London, 2006 [žiūrėta 2020-01-15]. ISSN 1357-9258. Prieiga per: <http://www.iied.org/>
28. SATTERHWAITE, David et al. Adapting to climate change in urban areas: The possibilities and constraints in low-and middle-income nations. *International Institute for Environment and Development* [interaktyvus]. London, July 2007 [žiūrėta 2020-01-16]. ISBN 978-1-84369-669-8. Prieiga per: www.iied.org/pubs/display.php?o=10549IIED
29. LEI, Li et al. Environmentally responsible fabrication of efficient perovskite solar cells from recycled car batteries. *Energy & Environmental science* [interaktyvus]. China, 2015 [žiūrėta 2020-01-16]. Prieiga per doi: 10.1039/d0ee00674b
30. XIAN, Zhang et al. Technology Roadmap study on carbon capture, utilization and storage in China. *Energy policy* [interaktyvus]. China, May 2013, vol. **59**(536-550) [žiūrėta 2020-01-17]. ISSN 0201-4215. Prieiga per doi: 10.1016/j.enpol.2013.04.005
31. STYRING, P. et al. Carbon Capture and Utilisation in the Green Economy. *Centre for Low Carbon Futures* [interaktyvus]. London, 2011 [žiūrėta 2020-01-18]. ISBN: 978-0-9572588-

- 1-5. Prieiga per: <http://co2chem.co.uk/carbon-capture-and-utilisation-in-the-green-economy>.
32. SONGOLZADEH, M. et al. Carbon Dioxide Separation from Flue Gases: A Technological Review Emphasizing Reduction in Greenhouse Gas Emissions. *Hindawi* [interaktyvus]. Iran, February 2014, vol. **34** [žiūrėta 2020-01-18]. ISSN 828131. Prieiga per doi: 10.1155/2014/828131
 33. ABOTALIB, Mohammad et al. Deployment of a Geographical Information System Life Cycle Assessment Integrated Framework for Exploring the Opportunities and Challenges of Enhanced Oil Recovery Using Industrial CO₂ Supply in the United States. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering* [interaktyvus]. USA, 2016, vol. **4**(4743-4751) [žiūrėta 2020-02-18]. ISSN 22904-4743. Prieiga per doi: 10.1021/acssuschemeng.6b00957
 34. MARKEWITZ, Peter et al. Worldwide innovations in the development of carbon capture technologies and the utilization of CO₂. *Energy & Environmental Science* [interaktyvus]. USA, February 2012, vol. **5**(7281) [žiūrėta 2020-02-20]. ISSN 7281-7305. Prieiga per doi: 10.1039/c2ee03403d
 35. KONG, Yong et al. Dynamic capture of low-concentration CO₂ on amine hybrid silsesquioxane aerogel. *Chemical Engineering Journal* [interaktyvus]. USA, August 2015, vol. **283** [žiūrėta 2020-03-25]. ISSN 1385-8947. Prieiga per doi: 10.1016/j.cej.2015.08.034
 36. ARSTAD, Bjornar et al. Amine functionalised metal organic frameworks (MOFs) as adsorbents for carbon dioxide. *Springer Science+Business Media, LLC* [interaktyvus]. Oslo, July 2008, vol. **14** [žiūrėta 2020-03-25]. ISSN 755-762. Prieiga per doi: 10.1007/s10450-008-9137-6
 37. BATES, D. Eleanor et al. CO₂ Capture by a Task-Specific Ionic Liquid. *JACS communications* [interaktyvus]. Alabama, January 2002, vol. **124** [žiūrėta 2020-03-26]. Prieiga per doi: 10.1021/ja017593d
 38. MERKEL, C. Tim et al. Power plant post-combustion carbon dioxide capture: An opportunity for membranes. *Journal of Membrane Science* [interaktyvus]. USA, November 2009, vol. **359** [žiūrėta 2020-03-26]. ISSN 0376-7388. Prieiga per doi: 10.1016/j.memsci.2009.10.041
 39. LIVELY, P. Ryan et al. Hollow fiber adsorbents for CO₂ capture: Kinetic sorption performance. *Chemical Engineering Journal* [interaktyvus]. USA, January 2011, vol. **171** [žiūrėta 2020-03-26]. ISSN 1385-8947. Prieiga per doi: 10.1016/j.cej.2011.01.004
 40. MERKEL, C. Tim et al. Power plant post-combustion carbon dioxide capture: An opportunity for membranes. *Journal of Membrane Science* [interaktyvus]. USA, November 2009, vol. **359** [žiūrėta 2020-03-26]. ISSN 0376-7388. Prieiga per doi: 10.1016/j.memsci.2009.10.041
 41. DRESE, H. Jeffrey et al. Adsorbent Materials for Carbon Dioxide Capture from Large Anthropogenic Point Sources. *European Chemical Societies Publishing* [interaktyvus]. USA, 2009, vol. **2** [žiūrėta 2020-03-27]. Prieiga per doi: 10.1002/cssc.200900036
 42. GANG, Li et al. Competition of CO₂/H₂O in Adsorption Based CO₂ Capture. *Energy Procedia* [interaktyvus]. Australia, 2009, vol. **1** [žiūrėta 2020-03-27]. ISSN 1123-1130. Prieiga per doi: 10.1016/j.egypro.2009.01.148
 43. WALSPURGER, S. et al. Edgar CO₂ purity: type and quantities of impurities related to CO₂ point source and capture technology: a Literature study. *ECN* [interaktyvus]. Netherlands, August 2012, vol. **1** [žiūrėta 2020-03-28]. ECN-E-12-054. Prieiga per: <https://publicaties.ecn.nl/PdfFetch.aspx?nr=ECN-E--12-054>
 44. HOSSAIN, M. Mohammad et al. Chemical-looping combustion (CLC) for inherent CO₂ separations a review. *Chemical Engineering Science* [interaktyvus]. London, May 2008, vol. **63**(4433-4451) [žiūrėta 2020-03-28]. ISSN 0009-2509. Prieiga per doi: 10.1016/j.ces.2008.05.028
 45. LACKNER, S. Klaus et al. The urgency of the development of CO₂ capture from ambient air. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*

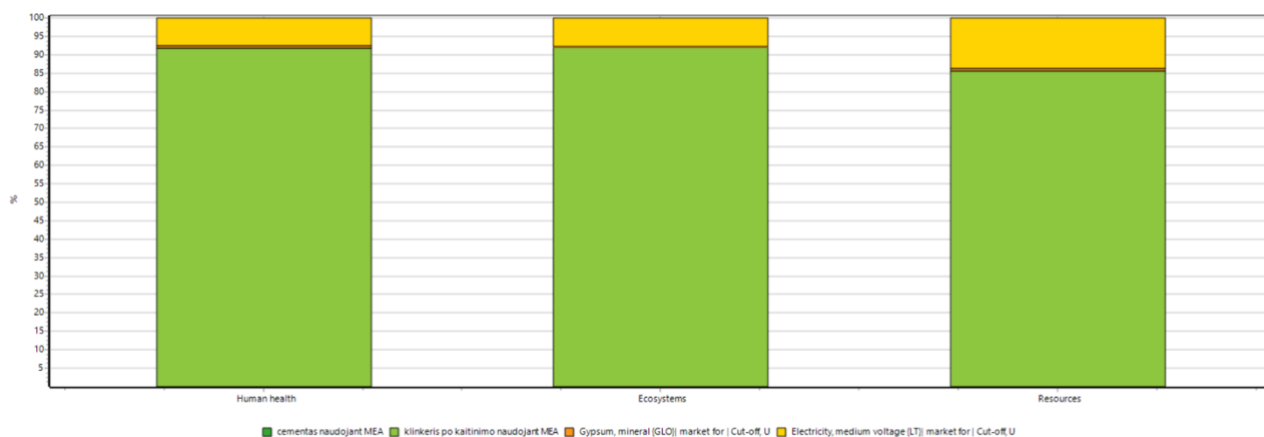
- [interaktyvus]. USA, August 2012, vol **109** [žiūrėta 2020-03-29]. ISSN 13156-13162. Prieiga per doi: 10.1073/pnas.1108765109
46. SANZ-PEREZ, S. Eloy et al. Direct Capture of CO₂ from Ambient Air. *ACS Publications, chemical reviews* [interaktyvus]. USA, August 2016, vol. **116** [žiūrėta 2020-03-29]. ISSN 11840-11876. Prieiga per doi: 10.1021/acs.chemrev.6b00173
 47. HASSE, David et al. CO₂ Capture by Cold Membrane Operation. *Energy Procedia* [interaktyvus]. France, 2014, vol. **63**(186-193) [žiūrėta 2020-03-30]. ISSN 1876-6102. Prieiga per doi: 10.1016/j.egypro.2014.11.019
 48. SONG, Chunfeng et al. Reducing energy consumption of advanced PTSA CO₂ capture process—Experimental and numerical study. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers* [interaktyvus]. Japan, January 2016, vol. **64**(69-78) [žiūrėta 2020-03-30]. ISSN 1876-1070. Prieiga per doi: 10.1016/j.jtice.2015.12.006
 49. METZ, B., et al. Carbon dioxide capture and storage: Summary for policymakers. *IPCC Special Report* [interaktyvus]. Switzerland, July 2005 [žiūrėta 2020-04-30]. ISBN 92-9169-119-4. Prieiga per: <http://www.ipcc.ch/activity/ccssp.pdf>
 50. COOPER, Cal, et al. A technical basis for carbon dioxide storage. *Energy Procedia* [interaktyvus]. USA, 2009, vol. **1**(1727-1733) [žiūrėta 2020-04-30]. Prieiga per doi: 10.1016/j.egypro.2009.01.226
 51. LI, Lei, et al. A review of research progress on CO₂ capture, storage, and utilization in Chinese Academy of Sciences. *Fuel* [interaktyvus]. China, 2013, vol. **108**(112-130) [žiūrėta 2020-05-02]. Prieiga per doi: 10.1016/j.fuel.2011.08.022
 52. VON DER ASSEN, Niklas et al. Life-cycle assessment of carbon dioxide capture and utilization: avoiding the pitfalls. *Energy & Environmental Science* [interaktyvus]. Germany, July 2013, vol. **6**(2721-2734) [žiūrėta 2020-05-04]. Prieiga per doi: 10.1039/c3ee41151f
 53. MELZER, L. Stephen. Carbon Dioxide Enhanced Oil Recovery (CO₂ EOR): Factors Involved in Adding Carbon Capture, Utilization and Storage (CCUS) to Enhanced Oil Recovery. *Carbon capture coalition* [interaktyvus]. Germany, February 2012, vol. **1** [žiūrėta 2020-03-30]. Prieiga per: <https://carboncapturecoalition.org/>
 54. GEOPPERT, Alain et al Air as the renewable carbon source of the future: an overview of CO₂ capture from the atmosphere. *Energy & Environmental Science* [interaktyvus]. USA, May 2012, vol **5**(7833-7853) [žiūrėta 2020-04-02]. Prieiga per doi: 10.1039/c2ee21586a
 55. STYRING, P. et al. Carbon Capture and Utilisation in the Green Economy. *Centre for Low Carbon Futures* [interaktyvus]. London, 2011 [žiūrėta 2020-01-18]. ISBN: 978-0-9572588-1-5. Prieiga per: <http://co2chem.co.uk/carbon-capture-and-utilisation-in-the-green-economy>.
 56. CUELLAR-FRANCA, M. Rosa et al. Carbon capture, storage and utilisation technologies: A critical analysis and comparison of their life cycle environmental impacts. *Journal of CO₂ Utilization* [interaktyvus]. UK, December 2014 [žiūrėta 2020-01-18]. ISSN 2212-9820. Prieiga per doi: 10.1016/j.jcou.2014.12.001
 57. PAN, Shu-Yuan, et al. An innovative approach to integrated carbon mineralization and waste utilization: A review. *Aerosol and Air Quality Research* [interaktyvus]. China, December 2014, vol. **3**(1072-1091) [žiūrėta 2020-01-18]. Prieiga per doi: 10.4209/aaqr.2014.10.0240
 58. MCCUTCHEON, Jeffrey et al. Ammonia-Carbon Dioxide Forward Osmosis Desalination. *Water Conditioning & Purification* [interaktyvus]. USA, October 2006 [žiūrėta 2020-04-18]. Prieiga per: <https://mccutcheon.lab.uconn.edu>
 59. RONGVED, Paul I. *Sea water desalination using CO₂ gas from combustion exhaust*. U.S. Patent No 6,180,012, 2001. [žiūrėta 2020-04-18].
 60. PRICES, Effective Carbon. CO₂ Emissions from Fuel Combustion. *International Energy Agency* [interaktyvus]. Paris, 2014 [žiūrėta 2020-04-18]. ISSN 22199446. Prieiga per doi: 10.1787/22199446

61. PEHNT, Martin et al. Life cycle assessment of carbon dioxide capture and storage from lignite power plants. *International Journal of Greenhouse Gas Control* [interaktyvus]. Germany, 2009, vol. **1**(49-66) [žiūrėta 2020-04-25]. Prieiga per doi: 10.1016/j.ijggc.2008.07.001
62. CROEZEN, Harry et al. Screening LCA for CCU routes connected to CO₂ Smart Grid. *Committed to the Environment* [interaktyvus]. Germanu, July 2008 [žiūrėta 2020-04-25]. ISSN 18.3N76.086. Prieiga per: <http://www.cedelift.eu/>
63. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. LST ISO 14044:2007. *Aplinkos vadyba. Būvio ciklo įvertinimas*, 2007.
64. BENDRASIS PROGRAMAVIMO DOKUMENTAS. Būvio ciklo vertinimas. [interaktyvus]. [žiūrėta 2020-05-11]. Prieiga per: http://vhost.asu.lt/nm/l-projektas/-Aplinkos_tarsa/45.htm
65. SALAS, Daniel Andres, et al. Environmental impacts, life cycle assessment and potential improvement measures for cement production: a literature review. *Journal of Cleaner Production* [interaktyvus]. Ecuador, 2016, vol. **113**(114-122) [žiūrėta 2020-05-04]. Prieiga per doi: 10.1016/j.jclepro.2015.11.078
66. HUNTZINGER, Deborah et al. A life-cycle assessment of Portland cement manufacturing: comparing the traditional process with alternative technologies. *Journal of Cleaner Production* [interaktyvus]. USA, 2009, vol. **17**(668-675) [žiūrėta 2020-04-29]. Prieiga per doi: 10.1016/j.jclepro.2008.04.007
67. HUNTZINGER, Deborah et al. A life-cycle assessment of Portland cement manufacturing: comparing the traditional process with alternative technologies. *Journal of Cleaner Production* [interaktyvus]. USA, 2009, vol. **17**(668-675) [žiūrėta 2020-04-29]. Prieiga per doi: 10.1016/j.jclepro.2008.04.007
68. PADUREAN, Anamaria et al. Multicriterial analysis of post-combustion carbon dioxide capture using alkanolamines *International Journal of Greenhouse Gas Control* [interaktyvus]. Romania, 2011, vol. **5**(676-685) [žiūrėta 2020-05-11]. Prieiga per doi: 10.1016/j.ijggc.2011.02.001
69. LIU, Helei. Analysis of solubility, absorption heat and kinetics of CO₂ absorption into 1-(2-hydroxyethyl) pyrrolidine solvent. *Chemical Engineering Science* [interaktyvus]. China, 2017, vol. **162**(120-130) [žiūrėta 2020-05-10]. Prieiga per doi: 10.1016/j.ces.2016.12.070
70. GRUENEWALD, M. et al. Gas-liquid contactors in liquid absorbent-based PCC. *Absorption-Based Post-combustion Capture of Carbon Dioxide* [Interaktyvus]. Germany, 2018 [žiūrėta 2020-05-15]. Prieiga per: 10.1016/B978-0-08-100514-9.00014-7
71. RIVM. LCIA: the ReCiPe model. *National Institute for Public Health and the Environment* [interaktyvus]. Netherlands, 2011 [žiūrėta 2020-05-06]. Prieiga per: <https://www.rivm.nl/en/life-cycle-assessment-lca/recipe>
72. CROEZEN, Harry et al. Screening LCA for CCU routes connected to CO₂ Smart Grid. *Committed to the Environment* [interaktyvus]. Germanu, July 2008 [žiūrėta 2020-04-25]. ISSN 18.3N76.086. Prieiga per: <http://www.cedelift.eu/>
73. SIMAPRO DATABASE MANUAL. *Methods Library* [interaktyvus]. USA, 2019 [žiūrėta 2020-05-06]. Prieiga per: <https://simapro.com/wp-content/uploads/2019/02/DatabaseManualMethods.pdf>
74. WEI, W. et al. How to Conduct a Proper Sensitivity Analysis in Life Cycle Assessment: Taking into Account Correlations within LCI Data and Interactions within the LCA Calculation Model. *Environmental Science & Technology* [Interaktyvus]. USA, January 2015, vol. **49**(377-385) [žiūrėta 2020-05-12]. Prieiga per: doi: 10.1021/es502128k
75. HUNTZINGER, Deborah et al. A life-cycle assessment of Portland cement manufacturing: comparing the traditional process with alternative technologies. *Journal of Cleaner Production* [interaktyvus]. USA, 2009, vol. **17**(668-675) [žiūrėta 2020-04-29]. Prieiga per doi: 10.1016/j.jclepro.2008.04.007

76. KORRE, Anna et al. Life cycle modelling of fossil fuel power generation with post-combustion CO₂ capture. *International Journal of Greenhouse Gas Control* [Interaktyvus]. UK, 2010, vol. 4(289-300) [žiūrėta 2020-05-17]. Prieiga per doi: 10.1016/j.ijggc.2009.08.005

Priedai

1 priedas. Cemento gamybos poveikio aplinkai žalos įvertinimas, nenaudojant anglies dioksido surinkimo sistemos

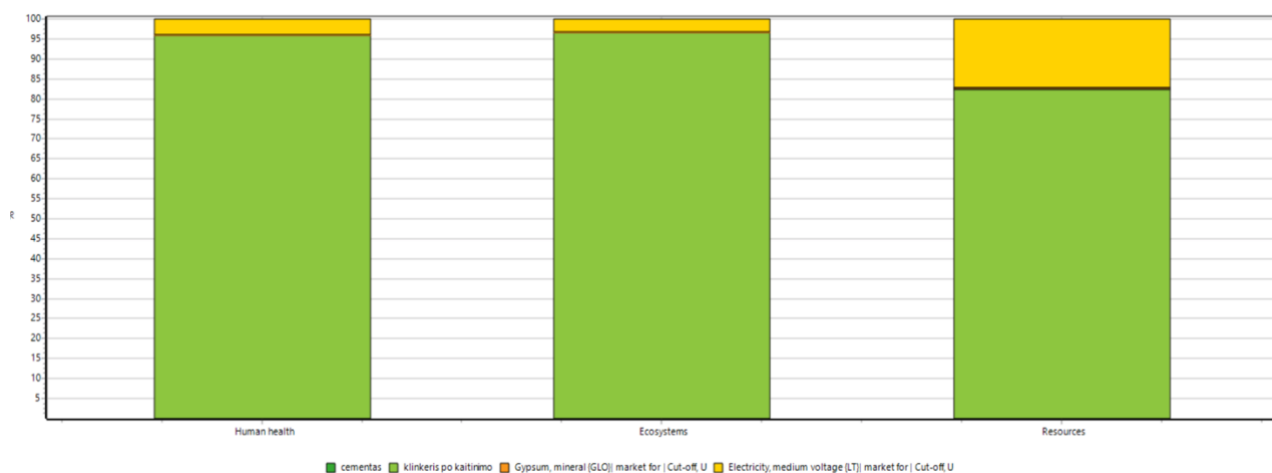


22 pav. Cemento gamybos poveikis aplinkai, nenaudojant anglies dioksido surinkimo sistemos (žalos įvertinimo grafikas)

Se	Damage category	Unit	Show table Total	cementas	klinkeris po kaitinimo	Gypsum, mineral	Electricity, medium
<input checked="" type="checkbox"/>	Human health	DALY	0,00126	x	0,00121	3,98E-6	4,75E-5
<input checked="" type="checkbox"/>	Ecosystems	species.yr	3,31E-6	x	3,2E-6	3,17E-9	1,09E-7
<input checked="" type="checkbox"/>	Resources	USD2013	16,9	x	13,9	0,102	2,88

23 pav. Cemento gamybos poveikis aplinkai, nenaudojant anglies dioksido surinkimo sistemos (žalos įvertinimo duomenys)

2 priedas. Cemento gamybos poveikio aplinkai žalos įvertinimas, naudojant anglies dioksido surinkimo sistemą su monoetanolamino tirpikliu

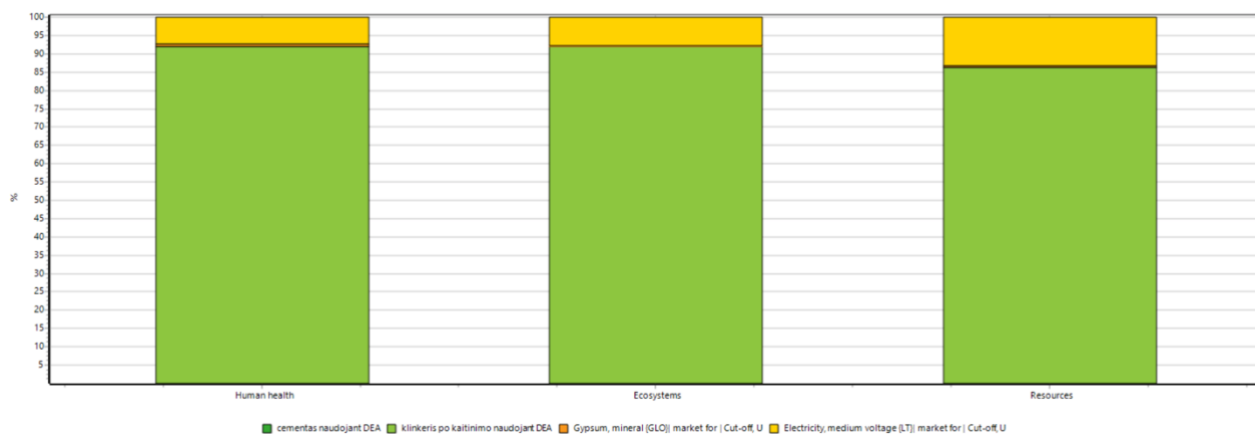


24 pav. Cemento gamybos poveikis aplinkai, naudojant anglies dioksido surinkimo sistemą su monoetanolamino tirpikliu (žalos įvertinimo grafikas)

Se	Damage category	Unit	Total	cementas naudojant	klinkeris po kaitinimo	Gypsum, mineral	Electricity, medium
<input checked="" type="checkbox"/>	Human health	DALY	0,000635	x	0,000583	3,98E-6	4,75E-5
<input checked="" type="checkbox"/>	Ecosystems	species.yr	1,4E-6	x	1,28E-6	3,17E-9	1,09E-7
<input checked="" type="checkbox"/>	Resources	USD2013	20,9	x	17,9	0,102	2,88

25 pav. Cemento gamybos poveikis aplinkai, naudojant anglies dioksido surinkimo sistemą su monoetanolamino tirpikliu (žalos įvertinimo duomenys)

3 priedas. Cemento gamybos poveikio aplinkai žalos įvertinimas, naudojant anglies dioksido surinkimo sistemą su dietanolamino tirpikliu

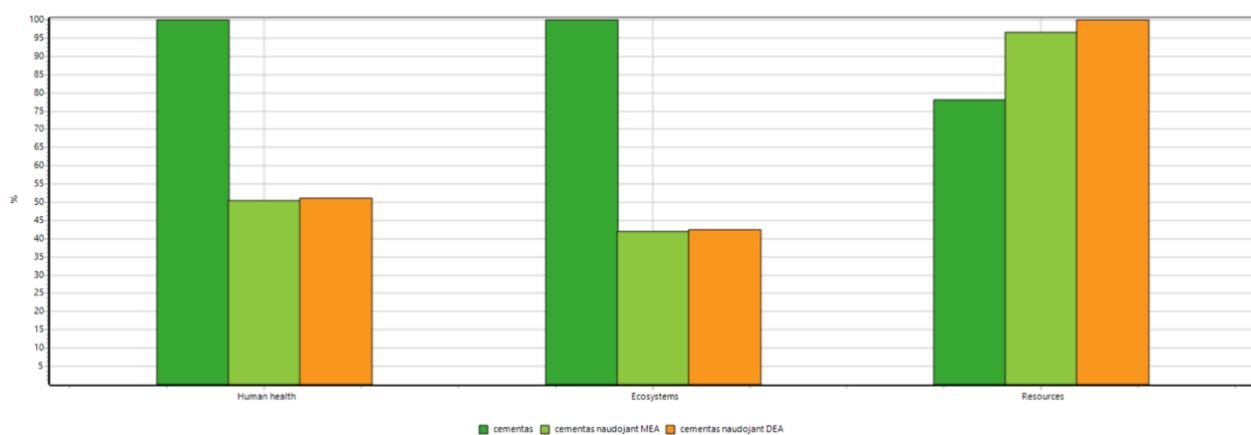


26 pav. Cemento gamybos poveikis aplinkai, naudojant anglies dioksido surinkimo sistemą su dietanolamino tirpikliu (žalos įvertinimo grafikas)

Sė	Damage category	Unit	Show table				
			Total	cementas naudojant	klinkeris po kaitinimo	Gypsum, mineral	Electricity, medium
<input checked="" type="checkbox"/>	Human health	DALY	0,000642	x	0,00059	3,98E-6	4,75E-5
<input checked="" type="checkbox"/>	Ecosystems	species.yr	1,41E-6	x	1,3E-6	3,17E-9	1,09E-7
<input checked="" type="checkbox"/>	Resources	USD2013	21,6	x	18,7	0,102	2,88

27 pav. Cemento gamybos poveikis aplinkai, naudojant anglies dioksido surinkimo sistemą su dietanolamino tirpikliu (žalos įvertinimo duomenys)

4 priedas. Cemento gamybos poveikio aplinkai žalos įvertinimas ir palyginimas visų alternatyvų



28 pav. Cemento gamybos poveikis aplinkai ir palyginimas visų alternatyvų (žalos įvertinimo grafikas)

Se	Damage category	Unit	cementas	cementas naudojant	cementas naudojant
<input checked="" type="checkbox"/>	Human health	DALY	0,00126	0,000635	0,000642
<input checked="" type="checkbox"/>	Ecosystems	species.yr	3,31E-6	1,4E-6	1,41E-6
<input checked="" type="checkbox"/>	Resources	USD2013	16,9	20,9	21,6

29 pav. Cemento gamybos poveikis aplinkai ir palyginimas visų alternatyvų (žalos įvertinimo duomenys)