

Konteinerių terminalo technologinės linijos ekologinio efektyvumo vertinimas

Vilma Locaitienė*^{1,2}, doc. dr. Ričardas Malkus²

¹Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Saulėtekio al. 11, Vilnius

El. paštas vilma.locaitiene@vilniustech.lt;

²Lietuvos aukštoji jūreivystės mokykla. I. Kanto 7, Klaipėda

El. paštas r.malkus@lajm.lt

(Gauta 2024 m. kovo mėn.; atiduota spaudai 2024 m. kovo mėn.; prieiga internete nuo 2024 m. gegužės 10 d.)

Anotacija

Šiame straipsnyje nagrinėjamas jūrų uosto konteinerių terminalo technologinės linijos ekologinis efektyvumas, atsižvelgiant į Europos žaliosios krypties strategijos reikalavimus ir CO₂ emisijų mažinimo tikslus. Tyrimo kontekste pabrėžiamas ekologinis aspektas, vertinant ne tik integruotus efektyvumo rodiklius, bet ir atsižvelgiant į darnios plėtros veiksmus, grindžiamus energijos efektyvumu bei CO₂ ir kitų teršalų emisijų mažinimu. Europos žaliosios krypties strategija verčia jūrų uostus vertinti ne tik integruotus efektyvumo rodiklius, bet ir įgyvendinti CO₂ emisijų mažinimo priemones. Šiame kontekste pabrėžiama Klaipėdos uosto iniciatyva, kuri įgyvendina žaliojo uosto vystymo planą pagal Europos žaliosios krypties direktyvas. Daugumoje esamų taršos emisijų vertinimo modelių, kaip įvertinti konkrečios technologinės linijos ekologinį efektyvumą. Tyrimo metu atliktas konteinerių terminalo vertinimas, kuriame įvertintos CO₂ emisijos vykdant krovos į laivą operacijas naudojant konkretų krovos technologinį procesą. Pagrindinis tyrimo indėlis – patikrinti išmetamo CO₂ kiekio konteinerių terminaluose vertinimo modelį, kuriame naudojamas judėjimo pagal transporto rūšį metodas. Tyrimas suteikia įžvalgų, kurios gali būti pritaikytos kituose jūrų uostuose siekiant optimalaus technologinės linijos efektyvumo bei aplinkosaugos standartų atitikimo.

Reikšminiai žodžiai: konteinerių terminalas, technologinė linija, ekologinis efektyvumas, CO₂ emisijos.

Abstract

This article examines the ecological efficiency of a maritime container terminal's technological pattern, taking into account the requirements of the European Green Deal and goals for reducing CO₂ emissions. In the context of the study, emphasis is placed on the ecological aspect, evaluating not only integrated efficiency indicators but also considering factors of sustainable development based on energy efficiency and the reduction of CO₂ and other pollutant emissions. The European Green Deal obliges maritime ports to assess not only integrated efficiency indicators but also to implement measures to reduce CO₂ emissions. In this context, the initiative of Klaipėda port, which is implementing a green port development plan in accordance with the directives of the European Green Deal, is highlighted. While many existing emission assessment models analyze overall annual emissions, there is a lack of well-defined models for evaluating the ecological efficiency of a specific technological pattern. During the research, an assessment of a container terminal was conducted, evaluating CO₂ emissions during loading operations onto a ship using a specific cargo handling technological process. The main contribution of the study is to validate a model for assessing emitted CO₂ levels in container terminals, utilizing a mode of movement based on transport type. The research provides insights that can be applied to other maritime ports, aiming for optimal technological line efficiency and compliance with environmental standards.

Key words: Container terminal, technological pattern, ecological efficiency, CO₂ emissions

Įvadas

Jūrų uosto terminalų veikla įprastai vertinama taikant integruotus *terminalo efektyvumo* ir *terminalo efektyvumo laivui* rodiklius (Alderton, 2008; Moon, 2018), iš kurių pagrindinis - laivo techninės apžiūros trukmė ooste (Burns, 2015, Štepec et al., 2020). Ji gali būti mažinama (1) didinant technologinį terminalo produktyvumą ir (2) mažinant organizacinio ir / ar papildomoms operacijoms atlikti reikalingo laiko sąnaudas (Burns, 2015). Įgyvendinant Europos žaliosios krypties strategiją jūrų transporte ir jūrų uostuose, minėti rodikliai papildyti darnios plėtros veiksniais, kurie grindžiami energijos efektyvumu ir išmetamo CO₂ bei kitų teršalų kiekio mažinimo reikalavimais. Europos parlamentas nustatė priemones, kuriomis siekiama atsieti ekonomiką nuo CO₂ emisijų – jas sumažinti 55 % iki 2030 metų. Naujas reguliavimas pradeda veikti nuo 2026 metų, įvedant ir laipsniškai didinant CO₂ mokesčius (Europos audito rūmai, 2022). Europos jūrų uostų organizacijos išleistame gide (2021) oro taršos mažinimas išlieka pirmu prioritetu (ESPO, 2021), todėl ne tik uostų administracijos, bet ir jūrų terminalų operatoriai imasi



priemonių, kaip įgyvendinti žaliąjį kursą. Tam tikslui rengiami ir įgyvendinami veiksnių planai dėl išmetamųjų teršalų kiekio mažinimo ir energijos vartojimo efektyvumo didinimo. Pavyzdžiui, Klaipėdos uoste patvirtintas žaliojo uosto vystymo planas pagal numatytas Europos žaliosios krypties direktyvas (Klaipėdos uosto direkcija, 2022). Tapti nulinių emisijų terminalais siekia ir Klaipėdos uoste dirbantys terminalai, tačiau jiems svarbu turėti tinkamus emisijų ir kitų faktorių pokyčių vertinimo įrankius.

Daugumoje uostų ir terminalų taršos emisijų vertinimo modelių yra analizuojamos bendros metinės emisijos pagal kiekvieną energijos šaltinio tipą (Geerlings et al, 2014; Wilmsmeier & Spengler, 2016). Transporto priemonių taršai apskaičiuoti taikomi specialieji faktoriai, įvertinantys eismo sąlygas, transporto priemonės veiklos pobūdį, važiavimo režimą ir trukmę (Petering, 2009, Yu et al, 2017). Yra keletas tyrimų, kuriuose analizuojamas terminalo veiklos zonų išdėstymo (Peng et al, 2016), skirtingos krovos įrangos (Zhou et al. 2016), krano darbo reguliavimo lygio (Wiese et al., 2013) poveikis energijos suvartojimui ir CO₂ emisijoms. Taikoma metodika aktuali bendrai uosto ir atskirų terminalų veiklos poveikio klimatui analizei ir nesudaro galimybės vertinti atskirų krovos technikos ir technologijų įtakos, o kartu ir siūlymų ją keisti ar tobulinti.

Atkreiptinas dėmesys, kad priimant terminalo operatyvinius sprendinius, t. y. kaip efektyviai atlikti techninę apžiūrą prie krantinės stovinčio laivo, yra vadovaujamosi konkrečios technologinės linijos našumą lemiančiais rodikliais, nurodytais patvirtintuose technologinio proceso normatyviniuose dokumentuose. Siekiant nulinės CO₂ ar mažesnių šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisijų, terminalo sprendiniuose turi būti lygiaverčiai įvertinta ne tik linijos našumas, pajamingumas, bet ir ekologinis efektyvumas (toliau - EE). Pastebėta, kad praktiškai nėra detalių vertinimo modelių, leidžiančių įvertinti konkrečios technologinės linijos EE. Šio tyrimo tikslas – pagrįsti jūrų uosto terminalo technologinės linijos efektyvumo vertinimo modelio papildymą EE rodikliais. Šiuo tikslu buvo atliktas tyrimas konteinerių terminale, kuris randasi Klaipėdos uoste. Tyrime CO₂ emisijos buvo įvertintos vykdant konteinerių krovos į laivą operacijas taikant krovos technologiją „STS kranas - terminalinis vilkikas - RTG aikštelės kranas“. Taikant duomenų rinkimo metodą surinkti penkerių metų duomenys apie krovos metu naudojamą krovos įrangą, jos kiekius, sunaudotą kuro kiekį, nuvažiuotą atstumą vykdant krovos darbus. Kiekvienos krovos įrangos sunaudotos energijos kiekis ir CO₂ emisijos buvo nustatytos ir įvertintos taikant statistinę duomenų analizę. Išmetamo CO₂ kiekis apskaičiuotas remiantis įrangos judėjimo terminale stebėjimų rezultatais bei energijos suvartojimo metodais. Šio tyrimo indelis – patikrinti išmetamo CO₂ kiekio konteinerių terminaluose įvertinimo modelį, kuriame judėjimo pagal transporto rūšį metodus patikrintas su išmetamu kiekiu, pagrįstu vienos krovos linijos energijos suvartojimu.

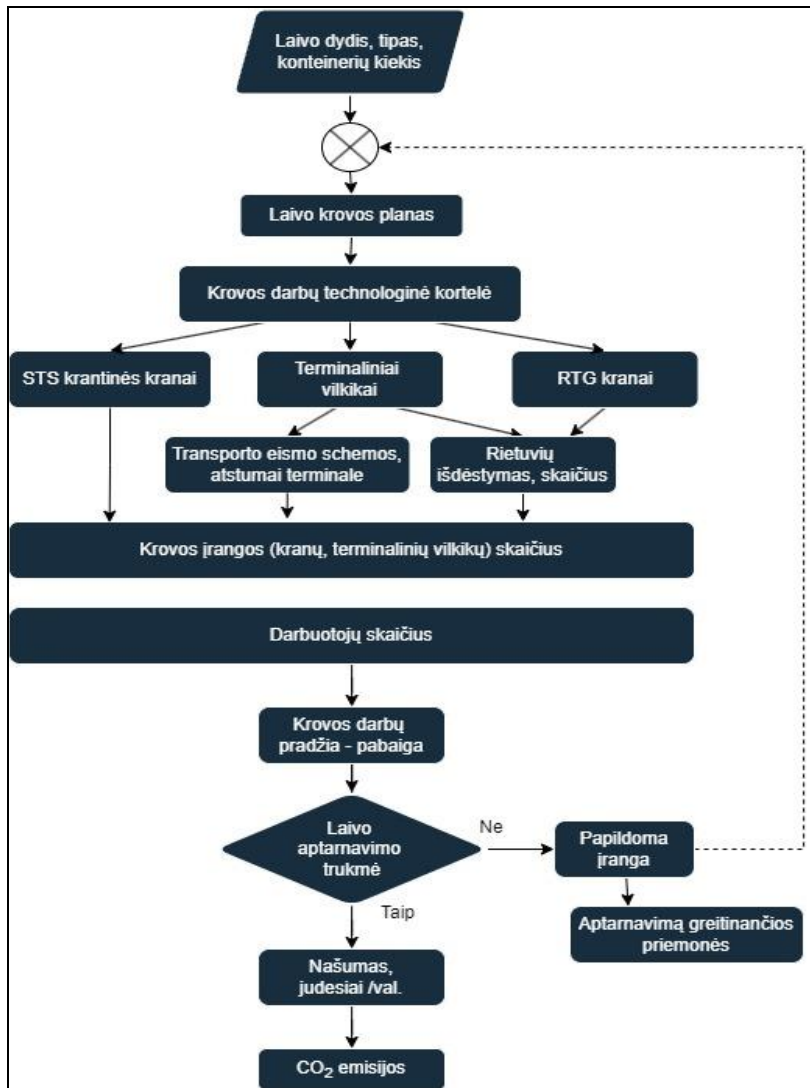
Tyrimo metodai

Pagrindinis šio tyrimo metodas – tai proceso stebėjimo bei atskirų operacijų techninis bei technologinis vertinimas, naudojant operacijų duomenis bei taikant statistinius analizės instrumentus.

Krovos terminalų operatyvinės veiklos planavimas ir organizavimas remiasi normatyvinių dokumentų (technologinio reglamento, technologinės krovos darbų kortelės ir krovos darbų instrukcijų) duomenimis. Jie sudaromi atsižvelgiant į krovos operacijų pobūdį, technologinių operacijų skaičių, terminale disponuojamos krovos technikos ir įrangos parką, jų techninius ir eksploatacinius rodiklius, terminalo krantinės bei sandėliavimo plotų ar pastatų išdėstymą (1 pav.).

Krovos operacijų pobūdį apibūdina laivo tipas, terminale iškraunamų ir pakraunamų konteinerių kiekiai (1 pav.). Šis informacija pateikiama laivo krovos plane, kurį sudaro konteinerių linijos planuotojai ir siunčia patvirtinimui bei vykdymui laivo kapitoniui ir krovos kompanijai. Remiantis šia informacija krovos kompanijoje priimamas operatyvinis sprendinys, kuria ir keliomis technologinėmis linijomis atlikti operacijas per nustatytą laiko tarpą.

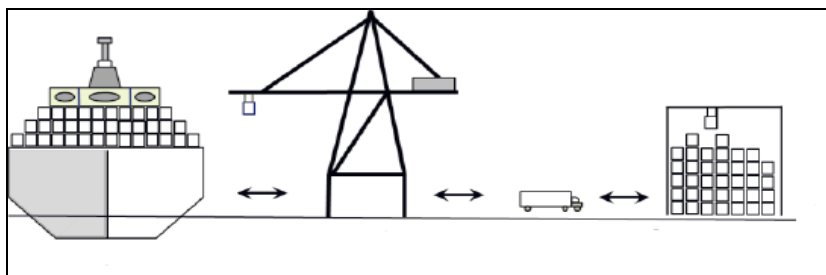




1 pav. Siūlomas konteinerių krovos terminalo technologinės linijos našumo vertinimo loginis modelis (sudarytas autorių)

Fig. 1. The proposed logic model for evaluating the efficiency of the technological pattern of the container loading terminal (composed by the authors)

Technologinėms operacijoms atlikti sudaryta technologinė linija, kurioje naudojami STS tipo konteineriniai kranai, konteinerių aikštelėse dirbanti technika – RTG kranai ir horizontalią transportavimo funkciją atliekanti technika – terminaliniai traktoriai, vilkikai (2 pav.).



2 pav. Konteinerių terminalo technologinės linijos schema

Fig. 2. Layout of one technological pattern of the container terminal

Šaltinis: Huzaiifi, M. H., Budiyanto, M. A. & Sirait, S. J. (2020). Study on the carbon emission evaluation in a container port based on energy consumption data. *Evergreen* 7, 97–103

Technologinės linijos našumas priklauso krovos technikos kiekio, jos eksploatacinio našumo, kurį lemia įrangos ciklo trukmė, vienu metu kraunamo krovinio kiekis bei darbo sąlygos. Jis skaičiuojamas (1) formule (Alderton, 2008; Burns, 2015):

$$\text{Linijos našumas} = \sum_{n=1}^m \frac{3600}{(t_{p,n} + \varphi \sum_{n=1}^j t_n)} \cdot q \cdot k_2, \quad (1)$$

čia:

$t_{p,n}$, t_n – krovos technikos, dirbančios linijoje, operacijų trukmės; $t_{p,n}$ – n krovos technikos papildomų operacijų trukmės, s; t_n – n krovos technikos krovos ciklo j operacijų trukmės, s;
 φ – operacijų persidengimo koeficientas; skaičiavimuose priimamas 0,85;
 q – vienu ciklu perkraunamo krovinio svoris t, arba TEU (kaip šiuo atveju);
 k_2 – darbo laiko panaudojimo koeficientas, parodantis eksploatacinės krovos technikos ir terminalo darbo sąlygas, pvz. technologines pertraukas laukiant krovinio, krovinio paruošimo transportavimui, kėlimo trukmės ir pan.

Taikant duomenų rinkimo metodą buvo stebėti konteinerių terminalo įrangos eksploataciniai rodikliai atliekant tipines operacijas. Šie duomenys buvo klasifikuoti ir statistškai įvertinti:

1. Įrangos specifikacijos ir jos naudingumo duomenys (terminalo įrangos skaičius linijoje, variklio tipas ir techniniai duomenys, įrangos našumas). Įrangos naudingumas apibūdintas jos panaudojimo koeficientu, kuris susijęs su įrangos moto-valandų ir darbo dienos faktinės trukmės santykiu.
2. Kuro ir energijos sąnaudos. Šiuos duomenis sudaro sunaudotų dyzelinių degalų litrais ir elektros energijos (kWh) kiekiai. Duomenys buvo renkami remiantis stebėjimo rezultatais ir įrašais apie kiekvieną krovos techninį įrenginį.

Technologinėje linijoje esantys STS tipo kranai (2 pav.) naudoja tik elektros energiją, tuo tarpu RTG aikštelės kranai (2 pav.) ir terminaliniai traktoriai naudoja energiją gaunamą iš degalų.

CO₂ kiekio apskaičiavimo metodai. Konteinerių terminaluose, kuriuose kraunami vieno tipo kroviniai ta pačia technologija, vertinimas yra paprastesnis ir emisijos tenkančios vienam krovinio vienetui gali būti apskaičiuotos pagal (2) formulę (European Association for Forwarding..., 2012):

$$C = \sum_{n=1}^{\infty} (F_n E_n) / Q, \quad (2)$$

čia C – emisijos tenkančios perkrauto vienam krovos vienetui, TEU;

F_n – terminale naudojamos atskiros rūšies energijos kiekis, l, kWh, m³;

E_n – terminale naudojamos atskiros rūšies energijos faktorius, atitinkamai kg, kWh;

n – terminale naudojamos energijos rūšių skaičius;

Q – perkrauto krovinio kiekis, TEU.

Konteinerių terminaluose išmetamo CO₂ kiekio apskaičiavimas gali būti atliekamas dviem būdais (1) pagal energijos suvartojimą ir (2) pagal įrangos judėjimo terminale būdą ir režimą.

Taikant (1) būdą, įvertinami įrangos energijos suvartojimo duomenys taikant (2) formulę ir jie padauginami iš kiekvieno tipo išmetamųjų teršalų faktoriaus (1 lentelė).

1 lentelė. Konteinerių krovos įrangai taikomi išmetamųjų teršalų faktoriai
Table 1. Factors for the calculation of energy consumption and greenhouse gas emissions

Rodiklis	Standartinis energijos suvartojimas				ŠESD emisijos (CO ₂ ekvivalentas)			
	Tank-to wheels		Well-to-wheels		Tank-to wheels		Well-to-wheels	
	MJ/kg	ML/l	MJ/kg	MJ/l	kg CO ₂ e/kg	kg CO ₂ e/l	kg CO ₂ e/kg	kg CO ₂ e/l
Dyzelinas	43,1	35,9	51,3	42,7	3,21	2,67	3,90	3,24
Biodyzelinas	36,8	32,8	76,9	68,5	0,00	0,00	2,16	1,92
SND	46,0	25,3	51,5	28,3	3,10	1,70	3,46	1,90
SGD	45,1	n/a	50,5	n/a	2,68	n/a	3,07	n/a

Šaltinis: European Association for Forwarding, Transport, Logistics and Customs Services (2012). *Calculating GHG emissions for freight forwarding and logistics services in accordance with EN 16258*. CLECAT



Tyrimė taikomi standarte EN 16258 nurodyti koeficientai. Minėtame standarte pažymėta, kad nukrypimai nuo šių koeficientų leidžiami tik, jei tiekėjai pateikia lygiavertes vertes, kurios buvo parengtos pagal ES direktyvą 2009/30/EB (European Association for Forwarding..., 2012).

Vertinant netiesioginį išmetamo CO₂ kiekį, kai elektros energija perkama iš tinklo, sunaudotos elektros energijos kiekis per analizuojamą laikotarpį dauginamas iš elektros energijos taršos faktoriaus, kuris lygus 0,42 kg CO₂e/kWh (Klimato kaitos programos, 2023). Šis CO₂ kiekio nustatymo metodas buvo taikomas STS kranų taršos poveikiui.

Terminaliniai vilkikai atlieka konteinerių transportavimo operaciją. Jų sunaudotos specifinės energijos E kiekis priklauso nuo transportavimo režimo ir konteinerio svorio (2 lentelė).

2 lentelė. Terminalinio vilkiko specifinis energijos suvartojimas E tkm ar TEU km

Table 2. Specific energy consumption E per tkm or TEU-km for terminal trucks

Rodikliai	Važiavimas į kalną			Važiavimas lygiu paviršiumi		
	Lengvi kroviniai	Vidutiniai	Sunkūs	Lengvi kroviniai	Vidutiniai	Sunkūs
Konteinerius gabenantis transportas	7,90 t / 1 TEU	12,45 t / 1 TEU	16 t / 1 TEU/2 TEU	7,90 t / 1 TEU	12,45 t / 1 TEU	16 t / 1 TEU/ 2 TEU
Vilkikai 12 – 24 t	0,24	0,26	-	0,22	0,24	-
Vilkikai 24 – 40 t	0,17	0,19	0,34	0,14	0,16	0,29

Šaltinis: European Association for Forwarding, Transport, Logistics and Customs Services (2012). *Calculating GHG emissions for freight forwarding and logistics services in accordance with EN 16258.* CLECAT

Terminalinio vilkiko CO₂ emisijoms įvertinti pirmiausia nustatoma, kokie konteineriai transportuojami (parodo terminalo konteinerių faktorius), po to - vilkiko tipas ir dydis, tiriamuoju laikotarpiu nuvažiuotas atstumas. Konteinerių terminalai turi lygių ir tvirtą grindinį, todėl skaičiavimuose taikoma antroji 3 lentelės dalis. Apskaičiuotos energijos sąnaudos padauginamos taršos koeficiento, atsižvelgiant į naudojamą kurą (1 lentelė).

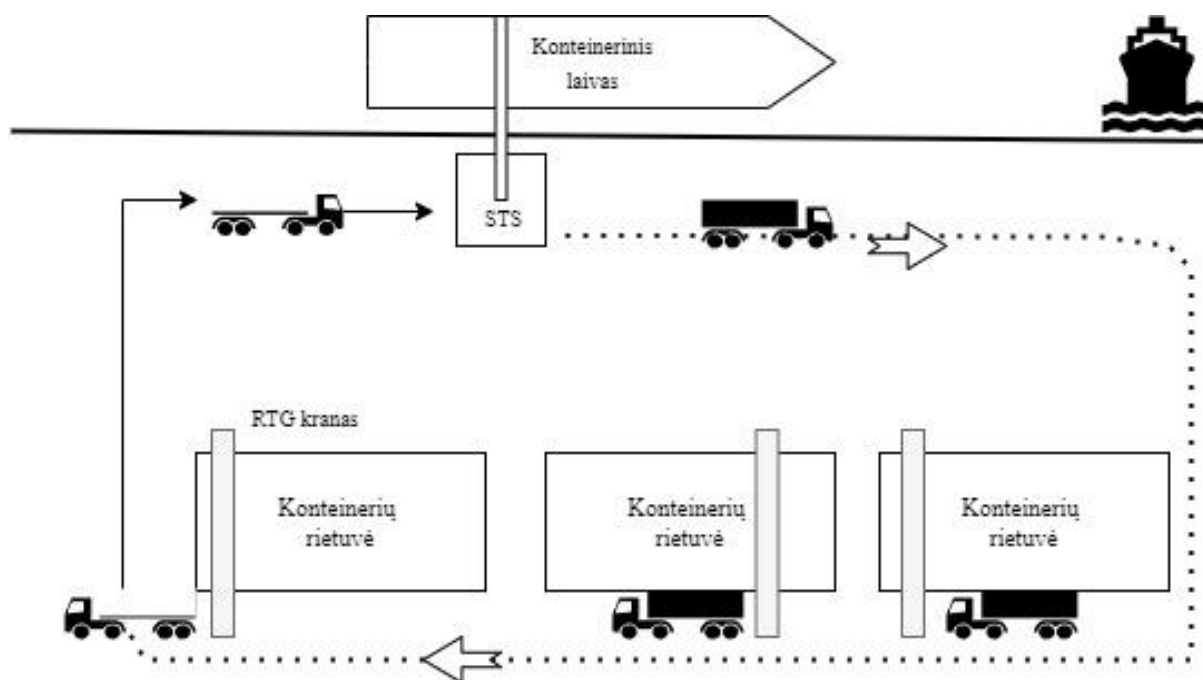
Papildymas siūloma metodika leistų įvertinti terminalo technologinių linijų EE bei identifikuoti technologines operacijas, kurios turi didžiausią poveikį bendram technologinės linijos ekologiniam efektyvumui. Tokiu būdu terminalo operatorius galėtų priimti pagrįstus sprendimus dėl technologinių operacijų parinkimo technologinei linijai sudaryti perkraunant konkretų krovinį. Taip pat būtų galima identifikuoti ekologiškai neefektyvią įrangą, kuria pirmoje eilėje reikėtų modernizuoti ar pakeisti. Pavyzdžiui, gali būti situacijos, kad tam tikra ekologiškai neefektyvi įranga technologinėje grandinėje naudojama neintensyviai, ir jos indelis į bendrą emisiją yra sąlyginai nedidelis, todėl investicijos jos modernizavimui turės minimalų poveikį. Būtina įvertinti, kad siekiant nulinių emisijų uostų terminalų veikloje net ir nedidelis intensyviai naudojamo įrangos pagerinimas gali turėti ženklių poveikį bendram rezultatui.

Tyrimo rezultatai

Tyrimas atliktas Klaipėdos uosto konteinerių terminale. Analizuojama tipinė situacija, kai konteinerinio laivo krovai taikoma krovos schema „STS kranas – terminaliniai vilkikai – RTG aikštelės kranai“ (3 pav.).

Krovos technologinio proceso aprašymas, naudojama krovos technika ir jos našumas yra nurodomi technologinio proceso kortelėje. Joje pažymėta, kad konteinerių iškrovimui iš laivo ir pakrovimui vienoje linijoje naudojamas vienas STS kranas, prie kurio našumo ir darbo sąlygų yra derinama visi kita technika.

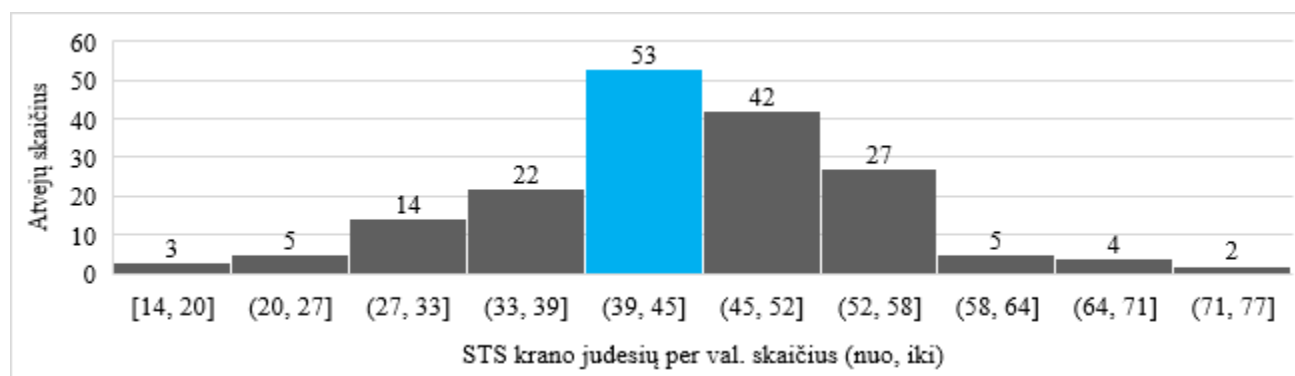




3 pav. Konteinerių krovos linijos schema „STS kranas – terminaliniai vilkikai – RTG kranai“

Fig.3. Layout of the container loading/discharging technological pattern „STS crane – terminal tractor – RTG yard crane“

STS kranų našumas įvertintas atliekant įrašų apie našumą ir sunaudotą elektros energiją analizę. Tyrime analizuojamos 177 STS kranų operacijos, įvertinant jų eksploatacinį našumą.

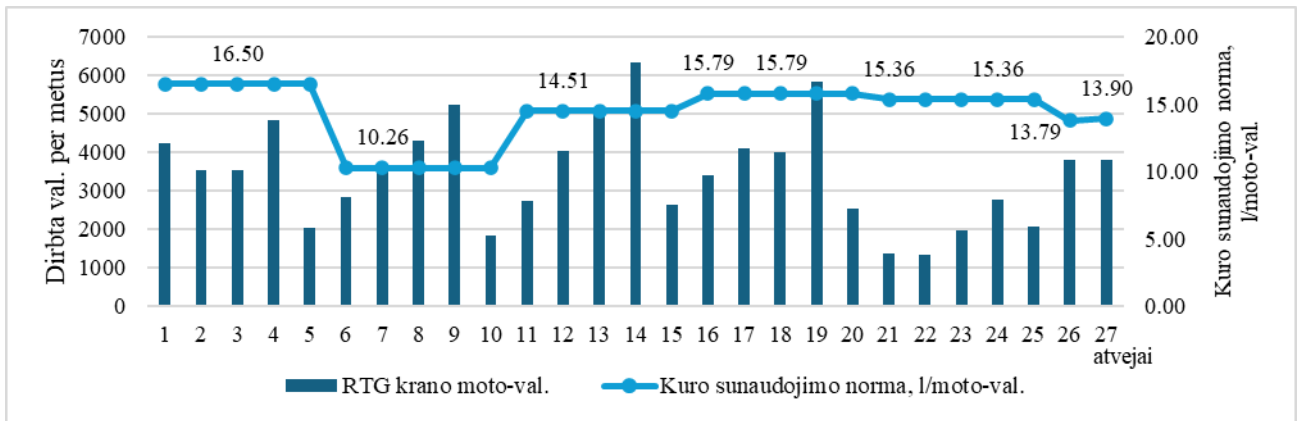


4 pav. STS kranų našumas stebėjimo rezultatai (judesiai/val.)

Fig. 4. Results of STS crane productivity (move per hour)

Nustatyta, kad daugiau kaip 30 % atvejų (53 atvejai) buvo fiksuota nustatyta eksploatacinė norma (40 judesių/h), o 45 % atvejų – didesnė (4 pav.). Deklaruojamas STS kranų panaudojimo koeficientas 0,55. STS kranų našumas yra visos technologinės linijos našumą formuojantis veiksnys, prie kurio derinami kiti linijos elementai, t. y. vilkikai ir RTG kranai. Toliau tyrime buvo remtasi 40 judesių/val. rodikliu, kuris apibūdina tiek 20', tiek 40' konteinerių krovą. Elektros energijos suvartojimo statistinių duomenų analizė parodė vidutinę 6,3 kWh vienam judesiui suvartojimo reikšmę, kuri yra apie 6 % mažesnė nei nurodyta moksliniuose šaltiniuose (Geerlings et al).

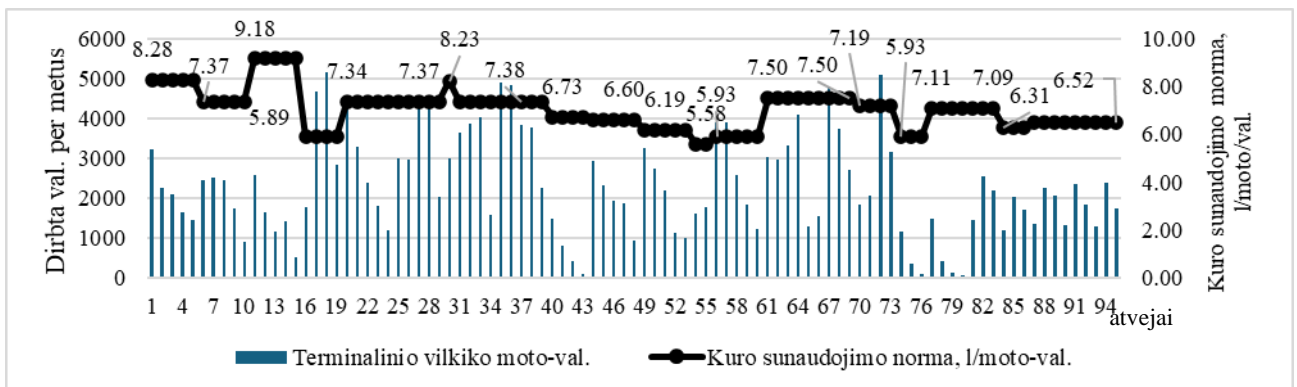
Krovos operacijų metu terminalo aikštelėse naudojami RTG tipo kranai. Analizuota 27 operacijų trukmė moto valandomis ir jų metu sunaudoto dyzelino kiekiai (5 pav.).



5 pav. RTG kranų darbo moto valandos ir sunaudoto dyzelino normų skaičiavimo rezultatai
Fig. 5. Results of the working hours and consumed diesel norms for RTG yard cranes

Nustatyta, kad kuro sunaudojimo normos moda yra 16,5 l/moto-val., vidutinė reikšmė – 14,43 l/moto-val. Per valandą RTG kranu atliekami vidutiniškai 14 judesių, nes stebėjimo metu fiksuota vidutinė 260 s darbo ciklo trukmė, kurią sudarė kranų pozicijos keitimas rietuvėje (50 s), kranų vežimėlio pozicijos keitimas (2 kartus po 10 s), griebtuvo nuleidimas, konteinerio fiksavimas ir konteinerio kėlimas (16+5+16=37 s), kranų judėjimas į iškrovimo vietą (50 s), konteinerio nuleidimas ant terminalinio vilkiko ir užfiksavimas (100 s). RTG kranų kuro sunaudojimo norma judesiui lygi 14,43 l/moto val. / 14 judesių arba 1,03 l/judesiui.

Transportinei funkcijai atlikti terminale naudojami TERBERG gamintojo terminaliniai vilkikai. Tyrime buvo analizuojami 23 vilkikų sunaudoto kuro kiekiai ir dirbtos moto-valandos (6 pav.).



6 pav. Terminalinio vilkiko darbo moto valandos ir sunaudoto dyzelino normų skaičiavimo rezultatai
Fig. 6. Results of the working hours and consumed diesel norms for terminal tractors

Nustatyta, kad vidutinis terminalinio vilkiko žiedinio maršruto ilgis 500 m, važiavimo trukmė apie 400 s (3 pav.). Pastebėta, kad terminaliniai vilkikai patiria technologinių pertraukų laukiant prie STS kranų, RTG kranų, dėl to padidėja vieno darbo ciklo trukmė iki 450 s. Terminalinis vilkikas per vieną valandą atlieka 8 reisu, o per parą fiksuojamas vidutinis 8,84 val. užimtumas. Dažniausiai fiksuota 7,5 l/moto-val. norma, standartinis nuokrypis σ – 0,83, vidutinė reikšmė – 7,04 l/moto-val. (6 pav.). Vilkikas terminalo teritorijoje per valandą nuvažiuoja 4 km, iš jų puse - be konteinerio. Todėl būtina taikyti (2) formulę ir 2 lentelėje pateiktą metodiką:

- vilkikas važiuoja su konteineriu: $7,04 \times 0,29 \text{ l/TEU-km} = 2,32 \text{ l / TEU-km}$
- vilkikas važiuoja be konteinerio: $7,04 \times 0,14 \text{ l/TEU-km} = 1,12 \text{ l/TEU-km}$

Standarte LST EN ISO 14083:2023, kuris pakeitė EN 16258, nurodyti tie patys specifiniai energijos naudojimo rodikliai, kuriuos reikia taikyti, kai transporto priemonės važiuoja skirtingais režimais.



Remiantis nustatytais krovos technikos našumo duomenimis, sudaryta linijoje dirbančios krovos technikos eksploatacinių rodiklių lentelė.

3 lentelė. Konteinerių krovos technologinės linijos eksploataciniai rodikliai
Table 3. Operational indicators of container handling technological line

Rodikliai	Įrangos charakteristikos				Darbo ciklo trukmė, s	Našumas	Reikalingas kiekis linijoje
	Variklio galia	Energijos šaltinis	Energijos panaudojimas	Keliamoji galia, t	Darbo ciklo trukmė, s	jud./val reisiai/val*	Įrangos kiekis linijoje
STS kranas	2 x 500 kW	elektra	6,3 kWh	65	90	40	1
RTG kranas „Konecranes RTG“	400 – 450 kW	dyzelinas	1,03 l/judesiui	40,6	260	14	40 / 14 = 2,85 arba 3
Terminalinis vilkikas „Terberg“	160 – 170 kW	dyzelinas	2,32 1,12 l/TEU-km	66	450	8*	40 / 8 = 5

Konteinerių terminale vieną liniją, kurios technologinis našumas 40 judesių/val., sudaro STS kranas, 5 terminaliniai vilkikai, 3 RTG aikštelės kranai (3 lentelė). RTG kranų našumas yra 14 judesių per val., todėl linijoje jų reikia 3 vnt., o vilkikų, kurių našumas 8 reisiai per valandą terminalo sąlygomis – 5 vnt. Rezultatas atitinka įprastą praktiką, nes konteinerių krova vykdoma į tris skirtingas rietuves (importo, eksporto ir tranzito konteineriams).

Nustčius linijoje dirbančios įrangos kieki, dirbtų moto valandų skaičių ir energijos naudojimo normas, galima įvertinti kiekvienos įrangos CO₂ emisijas linijoje.

STS kranu sunaudotos energijos kintamasis 6,3 kWh dauginamas iš 0,42 kg CO₂e/kWh, t. y. taršos koeficiento, kuris nurodytas Klimato kaitos programos lėšų naudojimo tvarkos apraše (2023). Visi trys RTG kranai naudoja dyzeliną ir išskiria tiesiogines emisijas, todėl nustatant jų veiklos CO₂ emisijas taikomas taršos faktorius 2,67 kg CO₂e l (1 lentelė). Terminaliniai vilkikai dalį transportavimo operacijų atlieka pilna rida gabendami 8 konteinerius (vid. svoris 10 t) (CLECAT, 2012) ir dalį – tušti, kai grįžta prie STS kranu naujam ciklui. Atitinkami taikomi du skirtingi rodikliai ir apskaičiuotos CO₂ emisijos.

4 lentelė. Konteinerių krovos technologinės linijos eksploataciniai ir ekologiniai rodikliai
Table 4. Operational and ecological indicators of container handling technological line

Krovos technika	Kiekis	Našumas judesių sk./val.	Sunaudotos energijos kintamasis	Taršos faktoriai kg CO ₂ e / kWh	kg CO ₂ emisijos	Dalis technologinėje linijoje
STS	1	40	6,3 kWh	0,42	105,84	11%
RTG	3	14	1,03 l/judesiui	2,67	115,66	12%
Vilkikas	5	2 km* 8 konteineriai	2,32 l/ TEU-km	2,67	495,55	52%
Vilkikas	5	2 km* 8 tušti reisiai konteinerio	1,12 l/ TEU-km	2,67	239,23	25%
Iš viso našumas		40 judesių /val.		Iš viso CO₂ emisijų	915,70	100%
*terminalinio vilkiko nuvažiuotas atstumas per 1 val.						
** vieno pilno TEU konteinerio svoris 10 t, tuščios ridos atveju - 2,5 t.						

Atlikus konteinerių terminalo vienos krovos linijos analizę nustatyta, kad jos našumas 40 judesių/val. generuoja 915,70 kg CO₂ emisijų arba vertinant, kad terminale kraunama 70 % 40' konteinerių nustatyta 14,06 kg CO₂ vienam TEU.



Diskusija

Gauti rezultatai atitinka vykdytus tyrimus, kurių metu nustatyta, kad vieno konteinerio krova terminale generuoja nuo 8,3 iki 18,7 kg CO₂ emisijų (Budiyanto et al., 2019, 2021; Hasan at al., 2023). Šiuose tyrimuose buvo vertinami metiniai kuro, elektros energijos ir perkrautų konteinerių kiekiai. Tačiau praktika rodo, kad yra įvairių krovos technologijų, įvairaus režimo konteinerių, pavyzdžiui refrižeratorių-konteinerių, kurie generuos emisijas, tačiau nebus galimybės jų įvertinti konkrečioje terminalo veikloje.

Siūlomi papildyti ekologinio efektyvumo rodikliai aiškiai identifikuoja, kokią įtaką emisijoms daro atskiros krovos linijos grandys. Šiuo atveju nustatyta, kad 77 % emisijų susidaro iš terminalinių vilkikų veiklos. Žinant, kad terminaliniai vilkikai gali būti keičiami arba modernizuojami montuojant juose energijos kaupimui ličio jonų ar vandenilio baterijų technologijas, taip pat SGD, metanolio, amoniako panaudojimo variantus. Kadangi tam reikalingos itin didelės finansinės galimybės, efektyvių ir objektyvių technologinių grandžių vertinimo mechanizmų svarba tik didėja. Papildomų ekologinio efektyvumo rodiklių integravimas į technologinių krovos schemų pagrindimą skatins terminalų operatorius taikyti mažesnę taršą generuojančias technologijas.

Išvados

Konteinerių terminale gali būti taikomi abu CO₂ emisijų skaičiavimo būdai – energijos suvartojimo pagal krovos technikos rūšį ir jos judėjimo terminale būdą bei režimą metodai. Sujungtas metodas gali būti taikomas skaičiuojant CO₂ emisijų kiekį konteinerių krovos linijoje bendrai ir pagal kiekvieną linijoje dirbančios krovos technikos grandį.

Pasiūlytas modelis leidžia įvertinti terminalo technologinių linijų ekologinį efektyvumą bei identifiкуoti technologines operacijas, kurios turi didžiausią poveikį bendram technologinės linijos ekologiniam efektyvumui. Naudojantis modeliu terminalo operatorius galėtų priimti pagrįstus sprendimus dėl technologinių operacijų parinkimo technologinei linijai sudaryti perkraunant konkretų krovinį bei operacijų optimizavimo, nes būtų galima identifiкуoti ekologiškai neefektyvią įrangą, turinčią didžiausią poveikį emisijoms, kurią pirmiausia reikėtų modernizuoti ar pakeisti.

Literatūra

1. Alderton, P. (2008). *Port Management and Operations*. Informa Law from Routledge.
2. Budiyanto, M. A., Huzaifi, M. H. & Sirait, S. J. (2019). Estimating of CO₂ emissions in a container port based on modality movement in the terminal area. *International Journal Technologies*. 10, 1618–1625.
3. Burns, M. (2015). *Port Management and Operations*. CRC Press
4. Štepec, D., Martinčič, T., Klein, F., Vladušič, D. and J. P. Costa. (2020). Machine Learning based System for Vessel Turnaround Time Prediction, *2020 21st IEEE International Conference on Mobile Data Management (MDM)*, Versailles, France, pp. 258-263, doi: 10.1109/MDM48529.2020.00060.
5. European Association for Forwarding, Transport, Logistics and Customs Services (2012). *Calculating GHG emissions for freight forwarding and logistics services in accordance with EN 16258*. CLECAT
6. Europos audito rūmai (2022). *Energijos mokesčiai, anglies dioksido apmokestinimas ir energijos subsidijos*. https://www.eca.europa.eu/lists/ecadocuments/rw22_01/rw_energy_taxation_lt.pdf
7. ESPO (2021). *ESPO green guide 2021. A manual for European ports towards a green future*. <https://www.espo.be/media/ESPO%20Green%20Guide%202021%20-%20FINAL.pdf>
8. Geerlings, H., Duin, R., Rossum, T. and Heij, R. (2014): Green EFFORTS - Green and Effective Operations at Terminals and in Ports. A top-down methodology to calculate the CO₂-footprint for terminal operations; the 6-step approach. <https://repub.eur.nl/pub/99281/GREEN-EFFORTS-Deliverable-4.2-Geerlings-et-al.pdf>.
9. Hasan, K.R.; Zhang, W.; Shi, W. A (2023). Sustainable Port-Hinterland Container Transport System: The Simulation-Based Scenarios for CO₂ Emission Reduction. *Sustainability*, 15. <https://doi.org/10.3390/su15129444>
10. Huzaifi, M. H., Budiyanto, M. A. & Sirait, S. J. (2020). Study on the carbon emission evaluation in a container port based on energy consumption data. *Evergreen* 7, 97–103.
11. Yu, H. et al.(2017). CO₂ emission evaluation of yard tractors during loading at container terminals. *Transport Research Part D: Transport and Environment*. 53, 17–36.



12. Klimato kaitos programos aprašas (2023 m. red). <https://e-seimas.lrs.lt/portal/legalAct/lt/TAD/TAIS.369461/asr>
13. Moon, D. (2018). *Terminal Performance Measures*. World Maritime University, Sweden
14. Peng, Y., Wang, W., Song, X. & Zhang, Q. (2016). Optimal allocation of resources for yard crane network management to minimize carbon dioxide emissions. *Journal of Cleaner Production*. 131, 649–658.
15. Petering, M. E. H. (2009). Effect of block width and storage yard layout on marine container terminal performance. *Transport Research Part E. Logistics and Transportation Review*. 45, 591–610 .
16. Wiese, J., Suhl, L. & Kliewer, N. (2013). An analytical model for designing yard layouts of a straddle carrier based container terminal. *Flexibile Services and Manufacturing Journal*, 25, 466–502.
17. Wilmsmeier, G. & Spengler, B. (2016). Energy Consumption and Energy Efficiency Indicators in Container Terminals. *IAME 2016*.
18. Zhou, Y., Wang, W., Song, X. & Guo, Z. (2016). Simulation-based optimization for yard design at mega container terminal under uncertainty. *Mathematical Problems in Engineering*. 3. <https://doi.org/10.1155/2016/7467498>.

Evaluation of the Ecological Efficiency of the Container Terminal's Technological Pattern

(Received in March, 2024; Accepted in March 2024; Available Online from 10th of May, 2024)

Summary

This article discusses the ecological efficiency of a maritime port and goals for reducing CO₂ emissions, in line with the European Green Deal strategy. The research was conducted at the container terminal of Klaipėda port, analysing containers loading and discharging operation. The specific technological process's CO₂ emissions are evaluated using the mode of movement based on transport type method and specific emission. The research results provide insights into optimizing technological pattern efficiency and meeting environmental standards, specific numerical or percentage data on the reduction of CO₂ emissions achieved through the implementation of a specific container handling technological process. The European Green Deal strategy encourages maritime ports to implement measures for CO₂ emission reduction. The article emphasizes the initiative of Klaipėda port in implementing a green port development plan, aligning with the directives of the European Green Deal. It also discusses the goals set by the European Parliament to reduce CO₂ emissions and introduce CO₂ taxes.

