



KREOZOTU IMPREGNUOTŲ MEDINIŲ GELEŽINKELIO PABĖGIŲ UTILIZAVIMO TECHNOLOGIJŲ ANALIZĖ IR VERTINIMAS

Rokas VILNIŠKIS¹, Rasa VAIŠKŪNAITĖ²

VGTU AIF Aplinkos apsaugos katedra

El. paštas: ¹rokas.vilniskis@vgtu.lt; ²rasa.vaiskunaite@vgtu.lt

Anotacija. Mediniai geležinkelio pabėgiai yra impregnuojami naudojant chemines medžiagas, taip siekiant padidinti jų ilgaamžiškumą, apsaugoti nuo neigiamo aplinkos poveikio, biologinės korozijos ir suteikti kitas naudingas eksploatacines savybes. Impregnavimui yra naudojama cheminė medžiaga – kreozotas, kuris gaunamas iš akmens anglies ir susideda iš PAA (policiklinių aromatinių angliavandenilių), fenolinių junginių ir heterociklinių aromatinių junginių, kurie yra stiprūs kancerogenai. Impregnuoti mediniai geležinkelio pabėgiai yra kenksmingi aplinkai ir žmogui, todėl jų atliekos turi būti tvarkomos (utilizuojamos) vadovaujantis galiojančiais teisės aktais ir mažiausiai neigiamą poveikį aplinkai darančiu būdu. Plačiausiai paplitęs atliekų, tarp jų ir medinių geležinkelio pabėgių, utilizavimo būdas yra terminis apdorojimas.

Reikšminiai žodžiai: medinių geležinkelio pabėgių atliekos, kreozotas, atliekų deginimas, pirolizė, dujų fiksavimas, nuklenksminimas, bioremediacija.

Įvadas

Geležinkelio pabėgiai yra vieni iš svarbiausių atraminių geležinkelio linijos elementų (Bróžda, Selejdak 2015). Mediniai geležinkelio pabėgiai prieš naudojimą paprastai yra impregnuojami. Impregnavimas – tai medienos įmirkyimas apsaugos priemonėmis norint suteikti medienai ilgaamžiškumo apsaugant nuo drėgmės (sumažėja medienos išbrinkimo ir deformacijos tikimybė) bei biologinio (pelėsių, grybelių, parazitų) faktorių poveikio. Impregnavimui dažniausiai naudojamas kreozotas. Kreozotas yra tamsus skystis, gaunamas distilijuojant akmens anglies dervą, kuri yra koksavimo proceso šalutinis produktas (Kohler, Künniger 2003). Tai kompleksinis mišinys, kurį sudaro daugiau kaip 200 sudedamųjų dalių (Moret *et al.* 2007). Kreozotą 80–90 % sudaro policikliniai aromatiniai angliavandeniliai (PAA), 5–12 % fenolių junginiai; 10–20 % heterocikliniai aromatiniai junginiai. Procentinė junginių dalis kreozote priklauso nuo akmens anglies rūšies (Kukulka-Zajack *et al.* 2014; Ghaly *et al.* 2012; Lehto *et al.* 2000).

Panaudotų medinių geležinkelio pabėgių atliekų tvarkymas kelia nemažai aplinkosauginių problemų. Ypač daug problemų kelia medinių pabėgių, kurie impregnuoti cheminėmis medžiagomis, tvarkymas (Bróžda, Selejdak 2015; Kukulka-Zajack *et al.* 2014). Todėl jie turi būti tvarkomi (utilizuojami) vadovaujantis galiojančiais teisės aktais ir mažiausiai neigiamą poveikį aplinkai darančiu būdu.

Europoje apie 60 % (250 000 t/metus) kreozotu apdorotų medinių pabėgių atliekų yra sudeginama atliekų deginimo įrenginiuose (Černi *et al.* 2015). Švedijoje rekonstruojant geležinkelio kelius, mediniai pabėgiai yra išimami ir atrenkami tie, kurie gali būti dar kartą panaudoti. Šioje studijoje nevertinamas kreozoto kiekis pabėgyje. Netinkami pabėgiai atsižvelgiant į kreozoto koncentraciją paruošiami utilizavimui. Didesni reikalavimai taikomi tuomet, kada nustatoma, kad pabėgiai yra pavojingosios atliekos (Thierfelder, Sanstrom 2008). JAV dalis panaudotų pabėgių yra dar kartą panaudojami geležinkelio keliuose (0,9 %), dalis (18,0 %) panaudojama komercinių ir gyvenamųjų namų aplinkoje, 81,3 % utilizuojama, panaudojant kaip kurą sertifikuotuose katiluose ar dujinimo įrenginiuose, o likusioji dalis (0,3 %) šalinama sąvartynuose. Nuo 2016 m. JAV panaudoti mediniai pabėgiai perduodami deginimui arba šalinami sąvartyne. Panaudoti mediniai pabėgiai turi didelę šiluminę vertę (29 MJ/kg) lyginant su kitomis biomasės žaliavomis. Todėl jų apdorojimui tinkamiausias terminis apdorojimas, toks kaip pirolizė, dujų fiksavimas ar deginimas (Kim *et al.* 2016).

Atliekų, tarp jų ir medinių geležinkelio pabėgių, terminio apdorojimo tikslai: atliekų tūrio sumažinimas, pavojingųjų atliekų nuklenksminimas, energijos atgavimas, išskatinio kuro taupymas ir pan. (Jaskelevičius 2009). Atliekų terminiam apdorojimui naudojamos šios technologijos:

- pirolizė – terminis organinių ir neorganinių medžiagų skaidymas be deguonies;
- dujifikavimas – dalinė oksidacija;
- deginimas – pilnas oksidacinis degimas;
- nuklenksminimas.

Be terminio apdorojimo, medinių geležinkelio pabėgių atliekos taip pat gali būti utilizuojamos biologiniu būdu.

Darbo tikslas – apžvelgti galimas medinių geležinkelio pabėgių atliekų tvarkymo technologijas, įvertinti jų privalumus ir trūkumus.

Utilizavimo technologijų analizė

Atliekų deginimas (oksidacija) – tai egzoterminė reakcija tarp kuro ir deguonies (O_2). Atliekoms deginti kaip kuras naudojamos įvairios atliekos, o deguonies šaltinis yra oras.

Pagrindiniai medinių geležinkelių pabėgių atliekų deginimo tikslai yra sumažinti jų tūrį, nuklenksminti ir, jeigu yra tokia galimybė, panaudoti deginimo metu gautą energiją (ISWA Working group... 2002).

Utilizuojant medinius geležinkelio pabėgius, degimo zonoje turi būti pasiekta aukšta temperatūra tam, kad būtų neutralizuotos organinės ir daugelis neorganinių molekulių. Taip pat yra svarbu išvengti reakcijų, vykstančių tarp degimo metu išsiskiriančių lakiųjų medžiagų ir azoto (N_2).

Pagrindinės reakcijos deginimo metu vyksta tarp anglies (C) ir deguonies (O_2). Šio proceso metu susidaro anglies dioksidas (CO_2), vandenilis (H), deguonis (O_2) ir vandens garai (H_2O). Nepilno degimo proceso metu išsiskiria anglies monoksidas (CO) ir kitos anglies turinčios dalelės (suo džiai). Vandenilis (H) taip pat reaguoja su organiškai surištu chloru. Reakcijos metu susidaro vandenilio chloridas (HCl) (Waste Incineration and Public Health 2000).

Deginimo metu vyksta ir daugelis kitų reakcijų, kurių metu susidaro sieros oksidai (SO_x), azoto oksidai (NO_x), metalų oksidai ir aerosolių pavidalu lakūs sunkieji metalai (Hg, Cd, Pb ir kt) (European Commission Reference... 2006).

Paprastai degimo temperatūra rotacinėje krosnyje siekia 500–1450 °C. Deginimo pradžioje temperatūra būna apie 1000 °C, tačiau siekiant išvengti chlorintų aromatinių junginių susidarymo (pvz., PCB), temperatūra palaipsniui keliama iki 1200 °C (European Commission Reference... 2006).

Rotacinę krosnį sudaro cilindro formos apie savo ašį besisukanti krosnis su nuolydžiu horizontaliosios ašies kryptimi. Besisukant krosniai atliekos juda dėl gravitacijos. Atliekų deginimo laikas priklauso nuo krosnies sukimosi greičio ir pasvirimo kampo horizontalia ašimi.

Siekiant utilizuoti atliekas jos deginamos krosnyje apie 30–90 min (European Commission Reference... 2006). Deginimas ant judančio ardyno (1 pav.) plačiai taikomas nepavojingų kietų mišrių komunalinių atliekų tvarkymui. Europoje tokie įrenginiai sudaro apie 90 % deginimo įrenginių (European Commission Reference... 2006). Tokio tipo įrenginys veikia ir Lietuvoje, Klaipėdos mieste. Deginimo įrenginį su judančiu ardynu sudaro:

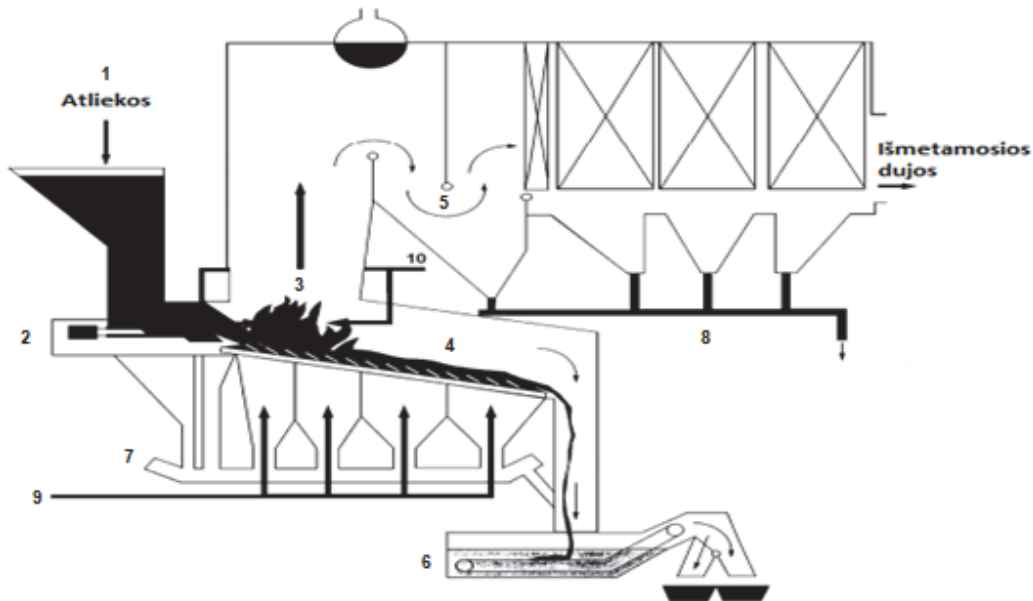
- kuro (atliekų) tiekimo sistema;
- judantis ardynas;
- dugno pelenų (šlako) tvarkymo sistema;
- oro padavimo į degimo kamera sistema;
- degimo kamera;
- papildomi degikliai.

Siekiant tinkamai sudeginti išsiskyrusias degimo dujas, po paskutiniojo oro įpurškimo prie degimo kameros vidinės sienelės kontroliuojamai ir tolygiai mažiausiai dviem sekundėms temperatūra turi būti padidinta iki 850 °C. Deginant pavojingąsias atliekas, kuriose yra daugiau kaip 1 % halogenintų organinių medžiagų, išreikštų chloru, mažiausiai dviem sekundėms temperatūra turi būti padidinta iki 1100 °C (Atliekų deginimo aplinkosauginiai... 2002).

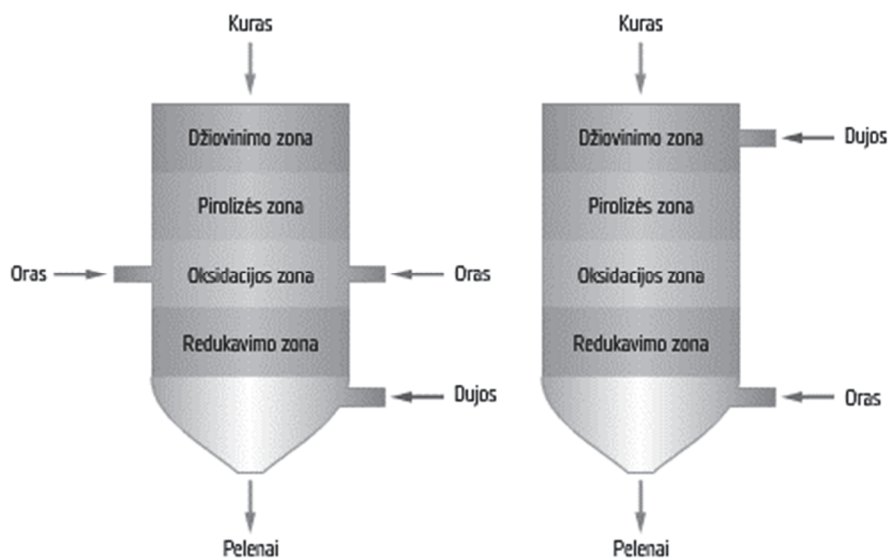
Alternatyvios technologijos atliekų deginimui dėl naftos krizės pradėtos naudoti nuo 1970 m., t. y. atliekų dujifikavimas ir pirolizė. Šios technologijos gali būti pritaikytos konkrečiam atliekų srautui tvarkyti ir gali būti mažesnio tipo nei atliekų deginimo įrenginiai (Mohan *et al.* 2006; European Commission Reference... 2006).

Dujifikavimas – tai terminis atliekų apdorojimo procesas, kurio metu, biomasei sąveikaujant su oru, vandens garais ar anglies dioksidu ir esant aukštai temperatūrai, susidaro degiosios dujos (H_2 , CO ir CH_4), derva bei šlakas (2 pav.) (Mun *et al.* 2012). Dujifikavimas iš esmės yra dalinis degimas, esant oksidatoriaus – deguonies (oro) – trūkumui. Iš susidariusių dujų išvalius priemaišas (anglies daleles, pelenus ir dervas), jas galima panaudoti kaip kurą dujų turbinose, vidaus degimo varikliuose ar pramoniniuose įrenginiuose (Martinaitis, Lukoševičius 2014).

Medinių geležinkelių pabėgių atliekos gali būti žaliava šilumos gamybai. Dujifikuojant yra galimybė gauti aukštesnės kokybės kurą (pvz., dujas), kurį galima naudoti pramonėje (pvz., elektros gamybai). Deginimo procesų laboratorijos darbuotojai yra atliekų detalius tyrimus, kaip palaikant aukštą temperatūrą iš kieto organinio kuro atpalaiduoti lakiąsias dujas ir po to jas vėl panaudoti. Vėliau likusi grynoji anglis yra dujinama antruoju etapu ir gaunamos kaloringos ir našios dujos (Gruskienė, Šlančiauskas 2012; Striūgas *et al.* 2016).



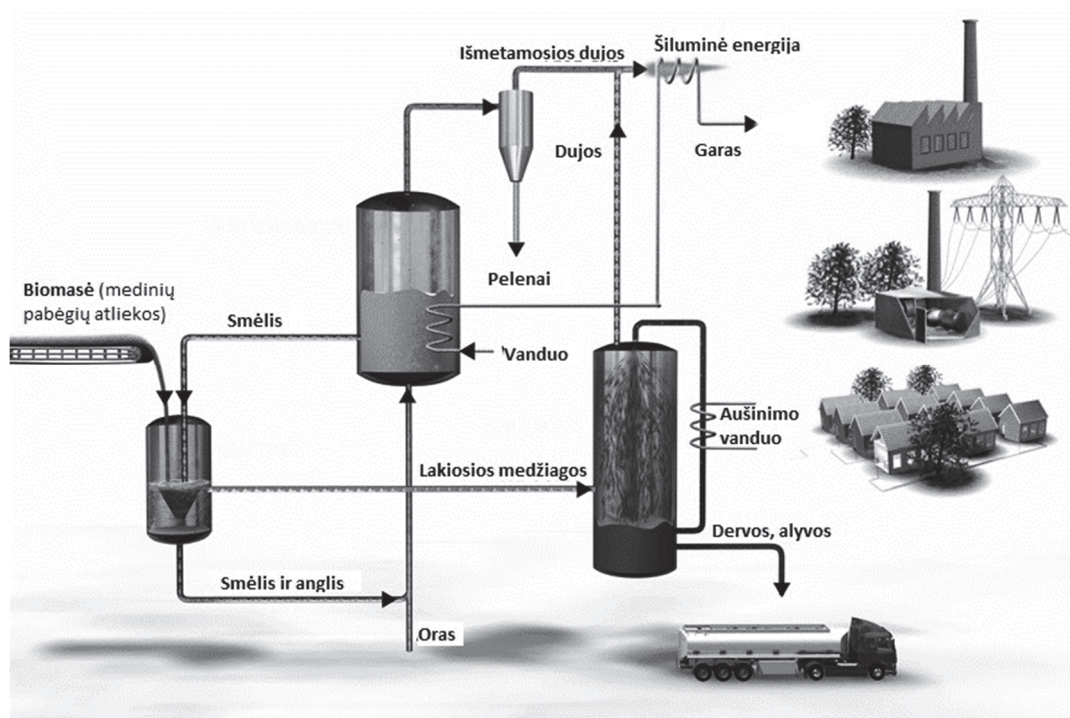
1 pav. Deginimas ant judančio ardyno: 1 – atliekų padavimas; 2 – atliekų padavimo reguliavimas; 3 – degimo zona; 4 – pagrindinė degimo zona; 5 – didžiųjų dalelių nusodinimas; 6 – degimo pelenų šalinimas; 7 – ardynas; 8 – katilo pelenų šalinimas; 9 ir 10 – oro padavimas (European Commission Reference... 2006)



2 pav. Kryžminio ir lygiagreto srauto dujųofikavimo reaktoriaus schema (Martinaitis, Lukoševičius 2014)

Gaminant dujas generatoriuose susidaro keturios zonos: džiovinimo zona, pirolizės zona, oksidacijos zona ir redukavimo zona. Oksidacijos zonoje susidaro anglies dioksidas, vandens garai ir pelenai – nedegūs neorganiniai kure esantys junginiai. Toliau redukavimo zonoje anglies dioksidas bei vanduo jungiasi su nesudegusio kuro anglimi. Medžiagos redukavimo zonoje reaguoja esant 800–1100 °C temperatūrai, o vykstančių reakcijų produktai yra degiosios dujos, vandens garai ir nevisiškai sureagavę produktai – koksas degimo metu (Jaskelevičius 2009).

Virš oksidacijos zonos yra sausos distiliacijos (pirolizės) zona. Šioje zonoje vyksta kietojo kuro skaidymas, kai susidaro medžio anglis arba koksas, išsiskiria dervos, drėgmė, anglies dioksidas ir degiosios dujos (CH_4 , CO , H_2). Pirolizė prasideda temperatūrai generatoriuje pasiekus apie 150–200 °C. Kadangi medienos kuras būna drėgnas, todėl jo temperatūra nepakyla aukščiau kaip 100 °C, kol kuras visiškai neišdžiūna. Todėl į dujų generatorių tiekiamas kuras pirmiausiai turi patekti į džiovinimo zoną. Džiovinimui yra panaudojama šiluma, gauta degimo zonoje reakcijų metu (Jaskelevičius 2009).



3 pav. Pirolizės jėgainės veikimo principinė schema (Fast pyrolysis 2017)

Pirolizė – cheminių medžiagų terminė destrukcija, vykstanti inertinėje arba savaimė susidarancioje aplinkoje (3 pav.). Organiniai junginiai yra termiškai nestabilūs, todėl jie gali būti suskaidomi į dujinę, kietąją ir skystąją frakcijas vykstant cheminio skaidymo ir kondensavimo procesams, kai nėra deguonies. Pirolizės procesas yra endoterminis procesas. Susidarančių produktų rūšį ir fazę (dujinę arba skystąją) daugiausiai lemia vykdomo proceso temperatūra ir atliekų rūšis. Dažniausiai susidaro dujos, lakiosios medžiagos ir dervos (Sinha *et al.* 2000).

Pirolizės metu gaunami produktai priklauso nuo pirminės medžiagos organinių charakteristikų (Sinha *et al.* 2000). Jas galima suskirstyti į 3 grupes:

- dujų srautas, daugiausiai susidedantis iš vandenilio (H_2), anglies dioksido (CO_2), anglies monoksido (CO) ir kitų dujų;
- deguto arba aliejaus srautas, kuris kambario temperatūroje išlieka skystas. Jį sudaro acto rūgštis, acetonas, metilo alkoholis. Skysto produkto sudėtį taip pat lemia pirminės medžiagos rūšis;
- suanglėjusi liekana, susidedanti daugiausia iš grynos anglies (C) ir kitų inertinių medžiagų (Sinha *et al.* 2000).

Egzistuoja du šio proceso metodai: oksidacinė pirolizė, kai sudeginamos pirolizės dujos, ir sausoji pirolizė.

Oksidacinė pirolizė – atliekų terminės destrukcijos procesas esant daliniam jų deginimui arba tiesioginiam kontaktui su kuro degimo produktais. Oksidacinė pirolizė yra vienas iš dujųfikavimo proceso etapų. Iš reaktoriaus

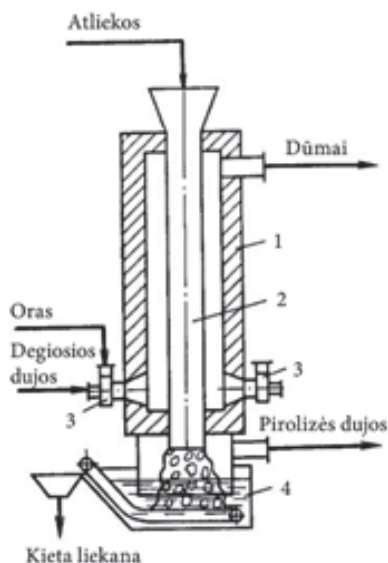
išleidžiami dujiniai atliekų skilimo produktai mišinyje su kuro arba atliekų degimo produktais turi žemą degimo šilumą, tačiau aukštą temperatūrą. Šios dujos deginamos įprastuose deginimo įrenginiuose. Oksidacinės pirolizės proceso metu susidaro kietą anglinę liekaną (koksas), kurią galima panaudoti kaip kietąjį kurą arba kitiems tikslams (Jaskelevičius 2009).

Oksidacinės pirolizės būdu gali būti perdirbamos įvairios gamybinės atliekos, tarp jų ir mediniai geležinkelio pabėgiai. Įprasta oksidacinės pirolizės temperatūra – 600–900 °C.

Deginant pirolizės dujas į atmosferą išmetami dūmai yra mažiau užteršti lakiaisiais pelenais ir suodžiais nei tiesiogiai deginant atliekas. Todėl dujas galima naudoti vandens garo gamybai ir kitiems tikslams be papildomo valymo. Atliekose esantys sunkieji metalai pirolizės metu pereina į kietą liekaną – koksą, o toksinis šešiavalentis chromas transformuojasi į netoksišią trivalentį.

Atliekų oksidacinė pirolizė atliekama sukamuose būgniniuose reaktoriuose, šachtiniuose reaktoriuose su besisukančiu padu, daugiapadžiuose reaktoriuose ir reaktoriuose su verdančiu sluoksniu.

Sausoji pirolizė – tai atliekų terminio skaidymosi procesas aplinkoje be deguonies. Apdoravimo tikslas – pašalinti atliekų kenksmingumą ir panaudoti jas kaip kurą ir cheminę žaliavą. Tokiu būdu sukuriama beatliekė ar mažatliekė technologija, bei racionaliai naudojami gamtos išteklių. Šio proceso metu susidaro aukštos degimo šilumos pirolizės dujos, skystieji produktai ir kietą anglinę liekaną (4 pav.).



4 pav. Kietų atliekų sausosios pirolizės reaktoriaus schema: 1 – korpusas, 2 – metalinė retorta, 3 – dujų degikliai, 4 – gėsinimo ir atliekos šalinimo mazgas (Jaskelevičius 2009)

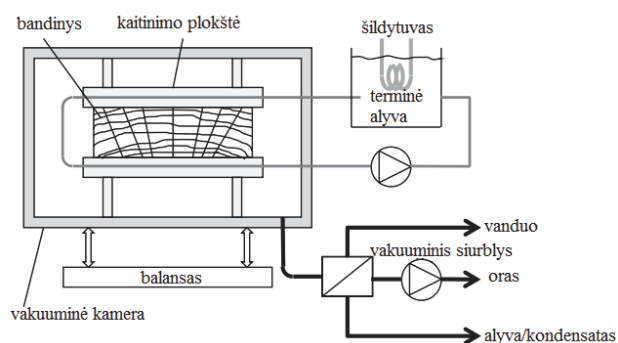
Sausosios pirolizės produktų kiekis ir kokybė priklauso nuo atliekų sudėties ir proceso temperatūros. Priklausomai nuo temperatūros skiriama žemos (450–550 °C), vidutinės (iki 800 °C) ir aukštos (daugiau kaip 900 °C) temperatūros pirolizė (Valinčius, Valatkevičius 2006). Žemos temperatūros pirolizės metu vyksta maksimali skystųjų produktų ir kietos liekanos išėiga ir minimalus aukštos degimo šilumos pirolizės dujų kiekio išsiskyrimas. Vidutinės temperatūros pirolizės metu dujų išėiga didėja mažėjant jų degimo šilumai. Skystųjų produktų ir kokso liekana mažėja. Aukštos temperatūros pirolizės metu vyksta minimalus skystųjų produktų ir kietos liekanos susidarymas ir maksimali mažos degimo šilumos pirolizės dujų išėiga.

Žemos temperatūros atliekų pirolizė vykdoma siekiant gauti pirmines dervas – labai vertingą skystojo kuro rūšį ir kitus cheminius produktus.

Pagrindinis aukštos temperatūros sausosios pirolizės tikslas yra gauti aukštos kokybės degiąsias dujas. Šiame procese pirminiai dervų garai ir pirolizės dujos, judėdamos per atliekų sluoksnį ir besiliesdamos su įkaitusiomis reaktoriaus sienelėmis bei susidariusio šlako paviršiumi, patiria antrinius pakitimus. Pirminė lengvoji derva termiškai skaidosi į degiąsias dujas, sunkiąją dervą ir dervos koksą. Termiškai skaidosi ir pirminės pirolizės dujos. Vykstant šiems procesams sumažėja dervos išėiga ir joje esančių vertingų lengvųjų frakcijų. Dėl pirminės dervos skaidymosi didėja pirolizės dujų kiekis. Dėl pirminių pirolizės dujų angliavandenilių komponentų skilimo mažėja jų degimo šiluma. Dažniausiai pirolizės dujų degimo šiluma būna $Q_2^s = 12 - 15 \text{ MJ/m}^3$ (Jaskelevičius 2009).

Nukenksminimas – pavojingųjų medžiagų pašalinimas iš kreozotu impregnuotų medinių pabėgių išlaikant jų struktūrą. Nukenksminimas vyksta vakuuminėje kameroje, kurioje tarp dviejų kaitinimo plokščių įterpiamas pabėgis. Kaitinimo elementų viduje įmontuota uždara kaitinimo alyvos sistema, kuri leidžia palaikyti iki 240 °C temperatūrą. Kaitinimas vyksta vakuuminėje kameroje (5 pav.), kur vakuuminis siurblys iš kameros pašalina orą, susidariusį kondensatą, vandenį bei PAA (Mayer *et al.* 2010).

Iš atliktų mokslininkų tyrimų buvo nustatyta, kad žemos virimo temperatūros (218–245 °C) PAA (naftalenas, 1-metilnaftalenas, 2-metilnaftalenas) gali būti visiškai pašalinti, o didesnės virimo temperatūros (>245 °C) PAA (acenaftalenas, acenaftenas, fluorenas, fenantrenas, antracenas ir kt.) koncentracijos gali būti sumažintos. Naudojant šį būdą galima pašalinti iš pabėgių iki 70 % PAA kiekio. Taip pat nustatyta, kad norint pasiekti didesnę negu 30 % nukenksminimo efektyvumą, reikia, kad temperatūra būtų didesnė nei 200 °C, o slėgis kameroje – ne mažesnis kaip 70 kPa (Mayer *et al.* 2010).



5 pav. Supaprastinta nukenksminimo schema (Mayer *et al.* 2010)

Bioremediacija – kreozotu impregnuotų medinių geležinkelio pabėgių remediacija panaudojant mikroorganizmus ir augalus (Mayer *et al.* 2010; Stankevičius *et al.* 2015). Mediena yra impregnuojama siekiant ją apsaugoti nuo drėgmės ir biologinio (pelėsių, grybelių, parazitų) poveikio. Tačiau kai kurie grybai ir bakterijos yra atsparūs medienos impregnantams (Kim *et al.* 2010; Mayer *et al.* 2010). Iš atliktų tyrimų nustatyta, kad jei kreozotu impregnuoti mediniai geležinkelio pabėgiai yra susmulkinami, tokiu atveju panaudojant tam tikrus grybus gali būti suskaidoma apie 65 % pabėgyje esančio kreozoto. O kombinuojant kreozotu impregnuotų medinių geležinkelio pabėgių apdorojimą bakterijomis ir grybais galima visiškai pašalinti kenksmingąsias medžiagas (Mayer *et al.* 2010).

Utilizavimo technologijų vertinimas

Kiekvienas medinių geležinkelio pabėgių terminio apdorojimo būdas skiriasi atliekų apdorojimui naudojama technologija, kuri priklauso nuo reakcijos temperatūros, slėgio,

proceso aplinkos ir kt. (1 lentelė) bei turi privalumų ir trūkumų (2 lentelė).

Deginimo, dujifikavimo ir pirolizės metu sumažinamas atliekų tūris. Nukenksminimo metu galima išlaikyti

1 lentelė. Terminio atliekų apdorojimo parametrai (European Commission Reference... 2006; Mayer *et al.* 2010)

	Pirolizė	Dujifikavimas	Deginimas	Nukenksminimas
Reakcijos temperatūra °C	250–700	500–1600	800–1450	220–550
Slėgis (bar)	1	1–45	1	0,7–0,8
Proceso aplinka	Be deguonies	Oksidatorius: O ₂ ; H ₂ O	Oras	Vakuumas
Proceso metu susidarę produktai				
Dujinė fazė	H ₂ , CO, H ₂ O, N ₂ , angliavandeniliai	H ₂ , CO, CO ₂ , CH ₄ , H ₂ O, N ₂	CO ₂ , H ₂ O, O ₂ , N	–
Kietoji fazė	Pelenai, koksas	Šlakas, pelenai	Šlakas, pelenai	Medis
Skystoji fazė	Derva, vanduo	Derva	–	Derva, vanduo

2 lentelė. Medinių geležinkelio pabėgių tvarkymo technologijų privalumai ir trūkumai

Technologija	Privalumai	Trūkumai
Deginimas	sumažinimas atliekų tūris; deginimo metu gauta energija gali būti panaudojama šilumos arba elektros gamybai.	brangūs įrengimo ir eksploatavimo kaštai; deginimo metu susidaro ir į atmosferą išmetami pavojingi teršalai (kietosios dalelės, dioksina, sunkieji metalai, NOx ir kt.); reikalingi specialūs sąvartynai išmetamų dujų produktams ir šlakui šalinti.
Dujifikavimas	sumažinimas atliekų tūris; maži teršiančių medžiagų išmetimai; galima generuoti dujas iš atliekų, kurios yra netinkamos ar jų negalima tiesiai deginti deginimo įrenginiuose; gautos degiosios dujos gali būti panaudotos kaip energinis arba technologinis kuras; gauta derva gali būti panaudojama kaip skystas kuras arba cheminė žaliava; nedideli pelenų ir sieros junginių išmetimai į atmosferą.	ribotas įrenginio atliekų perdirbimo našumas
Pirolizė	sumažinamas atliekų tūris; maži teršiančių medžiagų išmetimai; gautos degiosios dujos gali būti panaudotos kaip energinis arba technologinis kuras; gauta derva gali būti panaudojama kaip skystas kuras arba cheminė žaliava;	ribotas įrenginio atliekų perdirbimo našumas
Nukenksminimas	pavojingosios medžiagos iš atliekų gali būti visiškai pašalintos arba jų koncentracija sumažinta iki leistinų normų; galima pabėgius naudoti pakartotinai arba tvarkyti kaip nepavojingąsias atliekas.	PAA nėra visiškai pašalinami, tačiau optimizuojant proceso parametrus, galima padidinti nukenksminimo efektyvumą; didesnė negu 200 °C temperatūra gali sukelti medienos struktūros pokyčius.
Bioremediacija	utilizuojant reikalingi minimalūs energiniai resursai; proceso metu nesusidaro ir į aplinką nėra išmetami teršalai.	ilgas biologinio apdorojimo proceso laikas; reikalinga sąlygiškai didelė teritorija, tvarkymo aikštelės įrengimui; procesas reikalauja nuolatinio tam tikrų sąlygų (temperatūra, pH, drėgmė ir kt.) palaikymo; dėl pabėgių smulkinimo, siekiant padidinti proceso efektyvumą, negalima panaudoti jų pakartotinai.

pabėgio struktūrą, tačiau naudojant šį metodą PAA nėra visiškai pašalinami, bet, optimizuojant proceso parametrus, galima padidinti nukenksminimo efektyvumą. Tačiau didesnė negu 200 °C temperatūra gali sukelti medienos struktūros pokyčius ir tokio pabėgio nebus galima pakartotinai panaudoti (Mayer *et al.* 2010). Naudojant bioremediaciją tam, kad būtų padidintas nukenksminimo efektyvumas, mediniai geležinkelio pabėgiai turi būti susmulkinami, todėl pakartotinis jų naudojimas negalimas (Mayer *et al.* 2010).

Aplinkosauginiu požiūriu geriausia technologija – bioremediacija, nes į aplinką teršalai nėra išmetami ir technologija reikalauja minimalių energetinių resursų. Tačiau biologinio apdorojimo procesas užtrunka gana ilgai ir procesui palaikyti reikalingos tam tikros sąlygos (temperatūra, pH, drėgmė ir kt.), be to, nėra plačiai ištirta, kokios medžiagos po bioremediacijos proceso lieka.

N. Striūgo ir kitų autorių nuomone (2016), vienas iš efektyviausių atliekų utilizavimo būdų Lietuvoje yra dujinimo įrenginių panaudojimas, nes taikant dujų fiksavimo procesą galima generuoti dujas iš atliekų, o ypač iš tų, kurių negalima deginti esamuose deginimo įrenginiuose. Teigiama, kad papildomas mokestis už atliekų utilizavimą duotų greitesnę investicinę grąžą (Striūgas *et al.* 2016).

Išvados

1. Medinių geležinkelio pabėgių atliekos gali būti utilizuojamos vienu iš pasirinktų būdų: terminiu (t. y. naudojant pirolizę, dujų fiksavimą, deginimą, nukenksminimą ar kt.) ar biologiniu.

2. Deginant medinius geležinkelio pabėgius, palaiškoma, palyginti labai aukšta temperatūra (800–1450 °C), kartu su degiosiomis dujomis (CO₂, H₂O, O₂, N) bei šlaku (ar pelenais) susidaro teršalai (kietosios dalelės, dioksinai, sunkieji metalai, NO_x ir kt.).

3. Dujų fiksavimo metu medinių geležinkelio pabėgių biomasė sąveikauja su oru, vandens garais ar anglies dioksidu ir esant aukštai temperatūrai (500–1600 °C), susidaro dar daugiau degių dujų (H₂, CO, CO₂, CH₄, H₂O, N₂) nei deginimo metu, be to, susidaro šlakas, papildomai derva bei į atmosferą išmetami nedideli pelenų ir sieros junginiai.

4. Nukenksminimo metu vykdomas pavojingųjų medžiagų šalinimas iš kreozotu impregnuotų medinių pabėgių ir išlaikoma jų struktūra. Naudojant šį būdą iš pabėgių galima pašalinti net iki 70 % teršalų (PAA) kiekio. Galutiniai proceso produktai – mediena, derva ir vanduo. Naudojant šį metodą teršalai (PAA) nėra visiškai pašalinami.

5. Priešingai nei degimo proceso metu, vykdamas medinių geležinkelio pabėgių pirolizę, susidaro aukštos kokybės degiosios dujos (H₂, CO, H₂O, N₂, angliavandeniliai), skystoji (derva ir vanduo) bei kietoji (pelenai ir koksas) fazės.

6. Vykdamas bioremediaciją kreozotu, impregnuoti mediniai geležinkelio pabėgiai utilizuojami panaudojant mikroorganizmus ir augalus. Vienas pagrindinių šios technologijos trūkumų yra ilgas biologinio apdorojimo proceso laikas.

Literatūra

- Atliekų deginimo aplinkosauginiai reikalavimai, patvirtinti LR aplinkos ministro 2002 m. gruodžio 31 d. įsakymu Nr. 699 „Dėl atliekų deginimo aplinkosauginių reikalavimų patvirtinimo“ (Žin., 2003, Nr. 31-1290).
- Brózdka, K.; Selejdak, J. 2015. The issue of wooden and concrete railway sleepers utilization, *Production Engineering Archives* 9: 35–37.
- Černi, S.; Kalambura, S.; Jovičić, N.; Grozdek, M.; Kreč, M. 2015. Energy recovery of hazardous wooden railway sleepers – experimental investigation in Croatia, in *15th International Waste Management and Landfill Symposium*, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy, 5–9 October 2015, *Symposium Proceedings*, 1–9.
- European Commission Reference Document on the Best Available Techniques for Waste Incineration. 2006. 638 p.
- Fast pyrolysis [interaktyvus]. 2017 [žiūrėta 2017 m. sausio 10 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.btgworld.com/en/rtd/technologies/fast-pyrolysis>
- Ghaly, E. A.; Zhang, B.; Dave, D. 2012. Stability and maturity of composted creosote treated wood waste with an aerobic mixed culture augmented with the Thermophilic Actinomycete *Thermomonospora curvata*, *International Journal of Environmental Protection* 2: 1–13.
- Gruskienė, V.; Šlančiauskas, A. 2012. Medienos anglies likučio dujų fiksacijos spartinimas didinant CO₂ dujų generavimą, *Energetika* 4: 213–218.
- ISWA Working group on Hazardous Waste. 2002. *Safe Hazardous Waste Management Systems*, 71.
- Jaskelevičius, B. 2009. *Terminis atliekų apdorojimas: mokomoji knyga*. Vilnius: Technika. 148 p. <https://doi.org/10.3846/1078-S>
- Kim, M.-J.; Lee, H.; Choi, Y.-S.; Kim, G.-H.; Huh, N.-Y.; Lee, S.; Lim, Y.; Lee, S.-S.; Kim, J.-J. 2010. Diversity of fungi in creosote-treated cross-tie wastes and their resistance to polycyclic aromatic hydrocarbons, *Antonie van Leeuwenhoek* (2010)97: 377–387. <https://doi.org/10.1007/s10482-010-9416-6>
- Kim, P.; Lloyd, J.; Kim, J.; Labbé, N. 2016. Thermal desorption of creosote remaining in used railroad ties: investigation by TGA (termogravimetrinė analizė) and Py-GC/MS (pirolizės-gas chromatografija/masės spektrometrija), *Energy* 96: 294–302. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.12.061>
- Kohler, M.; Künniger, T. 2003. Emissions of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) from creosoted railroad ties and their relevance for life cycle assessment (LCA), *Holz als Roh- und Werkstoff* 61: 117–124.

- Kukulka-Zajack, E.; Krol, A.; Krasinska, A. 2014. Legal aspects of waste railway sleepers management, *Chemik* 68: 979–982.
- Lehto, K. M.; Lemmetyinen, H.; Puhakka, J. 2000. Biodegradation of photoirradiated polycyclic aromatic hydrocarbon constituents of creosote oil, *Environmental Technology* 21(8): 901–907.
<https://doi.org/10.1080/09593332108618051>
- Mayer, I.; Canne-Chédeville, C.; Ropp, J.; Von Arx, U.; Pichelin, F. 2010. Thermal decontamination of railway sleepers for recycling. Removal of creosote oil, in *Proceedings of the 11th World Conference on Timber Engineering*, Riva del Garda, Italy, 20–24 June.
- Martinaitis, V.; Lukoševičius, V. 2014. *Šilumos gamyba deginant kurą*. Vilnius: Technika. 232 p.
<https://doi.org/10.3846/1497-5>
- Mohan, D.; Pittman, C. U.; Steele, P. H. 2006. Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil: a critical review, *Energy Fuels* 20(3): 848–889. <https://doi.org/10.1021/ef0502397>
- Moret, S.; Purcaro, G.; Conte, L. S. 2007. Polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) content of soil and olives collected in areas contaminated with creosote released from old railway ties, *Science of The Total Environment* 386: 1–8.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2007.07.008>
- Mun, T-Y.; Kim, J-W.; Kim, J-S. 2012. Air gasification of railroad wood ties treated with creosote: effects of additives and their combination on the removal of tar in two-stage gasifier, *Fuel* 102: 326–332.
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.05.048>
- Sinha, S.; Jhalani, M.; Ravi, M. R.; Ray, A. 2000. Modelling of pyrolysis in wood: a review, *SESI Journal* 10.1 (2000): 41–62.
- Stankevičius, M.; Maruška, A.; Tiso, N.; Mikašauskaitė, J.; Bartkuvienė, V.; Kornyšova, O.; Mickienė, R.; Bimbraitė-Survilienė, K.; Kaškonienė, V.; Kazlauskas, M.; Levišauskas, D.; Tekorius, T.; Polcaro, C.; Galli, E.; Donati, E.; Zacchini, M.; Ragažinskienė, O.; Snieškienė, V.; Stankevičienė, A. 2015. Gas chromatographic analysis of polycyclic aromatic hydrocarbons in the disposed creosote treated wooden railway sleepers collected from several storage sites in Lithuania, *Chemija* 26 (3): 198–207.
- Striūgas, N.; Šlančiauskas, A.; Zakaruskas, K.; Stravinskas, G.; Paulauskas, R.; Vorotinskienė, L. 2016. Biomosės ir atlieku dujinimo tyrimai Lietuvoje: esama būklė ir ateities perspektyvos, *Energetika* 62(4): 282–300.
<https://doi.org/10.6001/energetika.v62i4.3396>
- Thierfelder, T.; Sanström, E. 2008. The creosote content of used railway crossties as compared with European stipulations for hazardous waste, *Science of The Total Environment* 402: 106–112.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.04.035>
- Valinčius, V.; Valatkevičius, P. 2006. Kenksmingų medžiagų neutralizavimas aukštatemperatūroje aplinkoje, *Mokslas ir gyvenimas* 12: 12–14.
- Waste Incineration and Public Health. 2000. *National Research Council*. 364 p.

ANALYSIS AND EVALUATION OF RECOVERY TECHNOLOGY OF CREOSOTE IMPREGNATED WOODEN SLEEPERS

R. Vilniškis, R. Vaiškūnaitė

Summary

Wooden railway sleepers are impregnated with chemicals to increase the longevity of the sleepers, protect them from negative environmental effects and biological corrosion, and to increase performance. Creosote is used to impregnate wooden railway sleepers; it is produced from coal and consists of PAHs (polycyclic aromatic hydrocarbons), phenolic compounds and heterocyclic aromatic compounds. These chemicals are very potent carcinogens. Thus, wooden railway sleepers impregnated with creosote are harmful to the environment and humans, so their waste must be disposed of under the current legislation so that they have the least negative impact on the environment. This can be done using the thermal treatment, which is one of the most common methods for disposing of waste, including the wooden railway sleepers.

Keywords: waste, wooden railway sleepers, creosote, waste incineration, pyrolysis, gasification, decontamination, bioremediation.