



Co-funded by
the European Union

Gamtos valymo komanda: kaip mikrobai minta tarša



BIOS4YOU
AR 2.0

BIO-INSPIRED STEM TOPICS FOR ENGAGING YOUNG GENERATIONS
THANKS TO THE USE OF AUGMENTED REALITY

Project Number: KA220-BW-23-30-126516

"Funded by the European Union. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Education and Culture Executive Agency (EACEA). Neither the European Union nor EACEA can be held responsible for them."





TURINYS

Įvadas	3
Kas yra mikrobai?	4
Mikrobų svarba	5
Taršos problemos	6
Aplinkos taršos rūšys	6
Mikrobų vaidmuo valant aplinkos taršą	7
Oro taršos valymo metodai	8
Vandens taršos valymo metodai	8
Dirvožemio taršos valymo metodai	8
Triukšmo taršos mažinimo metodai	9
Šviesos taršos mažinimo metodai	9
Šiluminės taršos mažinimo metodai	9
Radioaktyviosios taršos valymo metodai	9
Įvadas į bioremediaciją	11
Kaip mikrobai „valgo“ arba skaido teršalus	12
Mikrobinės bioremediacijos pavyzdžiai	13
Pseudomonas ir naftos skaidymas	13
Ideonella sakaiensis ir gebėjimas valgyti plastiką	13
Geobakterijų rūšys ir metalų valymas	13
Įvairūs bioremediacijos metodai	13
Mikrobų valymas	14
Mikrobų valymo strategijos ir technologijos	15
Bioremediacijos metodai	16
Natūralus slopinimas	17
Atvejų analizės	18
„Deepwater Horizon“ naftos išsiliejimas (2010 m., Meksikos įlanka)	18
Plastiko tarša vandenynuose	18
Sunkiųjų metalų užterštumas kasybos vietose	18
Biotechnologija ir ateitis	18
Mikrobų stiprinimas aplinkos valymui	18
Etiniai ir ekologiniai aspektai	19
Žaliųjų technologijų ateities potencialas	19
Papildytoji realybė veiksme: mikrobų valymo tyrinėjimas	20
AR diegimas mikrobų bioremediacijos mokyme	20
AR pagrindu veikiančių mokymosi veiklų kūrimas	20
Mokslinis pagrindimas, edukacinė integracija ir įrankiai	21
Švietimo naudojimo atvejai:	21
Mokymo programos integravimas	22
Išvados	23

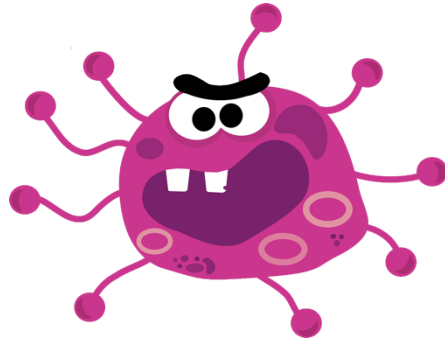




Literatūra

25





Bendra mokymosi kelio tema	Mikrobinė bioremediacija ir aplinkosaugos inovacijos
Konkretus mokymosi vieneto pavadinimas	Gamtos valymo komanda: Kaip mikrobai minta tarša
Tikslinis naudotojų amžius	14–18 metų
Besimokančiojo reikalavimai	Pagrindinis biologijos, chemijos ir aplinkos mokslų supratimas
Mokymosi vieneto aprašymas	Šiame skyriuje pristatoma bioremediacijos koncepcija, parodant, kaip mikrobai naudojami užterštai aplinkai valyti. Mokiniai nagrinės mikrobų įvairovę, taršos tipus ir valymo metodus, naudodamiesi interaktyviu turiniu ir papildytosios realybės (AR) simuliacijomis.
Susijusi tema	Biologija, chemija, aplinkos mokslai, technologijos
Raktiniai žodžiai	Mikrobai, Bioremediacija, Tarša, Tvarumas, AR, Inovacijos, Aplinkos mokslas
Pagrindiniai įgūdžiai, gebėjimai, žinios, kurias galima įgyti	Mikrobų vaidmens taršos valyme supratimas, realių bioremediacijos atvejų vertinimas, papildytosios realybės (AR) įrankių taikymas mikrobų veiksmams vizualizuoti ir aplinkos problemų sprendimų kūrimas.





Naudoti ištekliai ir didaktiniai įrankiai	Moksliniai straipsniai, papildytosios realybės platformos („Assemblr EDU“, „Merge Cube“), interaktyvios simuliacijos, atvejų analizės dokumentai, mikrobiologinių duomenų bazės
Vertinimo kriterijai ir vertinimas	Vertinimas taikant interaktyvias papildytosios realybės (AR) simuliacijas, mikrobus funkcijų supratimą, atvejo analizę ir besimokančiųjų sukurtus vaizdinius paaiškinimus ar projektus





Įvadas

Bioremediacija yra perspektyvus sprendimas kovoje su aplinkos tarša. Iš esmės tai išnaudoja natūralius mikroorganizmų gebėjimus valyti užterštas vietas, siūlydama novatorišką ir dažnai ekonomišką požiūrį į kai kurias šiandien svarbiausias ekologines problemas. Panaudodama bakterijas, grybelius ar augalus, bioremediacija keičia tai, kaip mes tvarkome teršalus – nuo naftos išsiliejimų iki toksiškų sunkiųjų metalų, nes mūsų supratimas apie šias natūralias sistemas toliau auga.

Koncepcija gana paprasta: mikroorganizmai, mažytės, bet galingos gyvybės formos, turi unikalius medžiagų apykaitos kelius, kurie leidžia jiems skaidyti arba paversti kenksmingas medžiagas mažiau toksiškais junginiais. Užterštoje aplinkoje šiuos organizmus galima skatinti arba papildyti, kad paspartėtų teršalų skaidymas ir taip būtų atkurta ekologinė pusiausvyra.

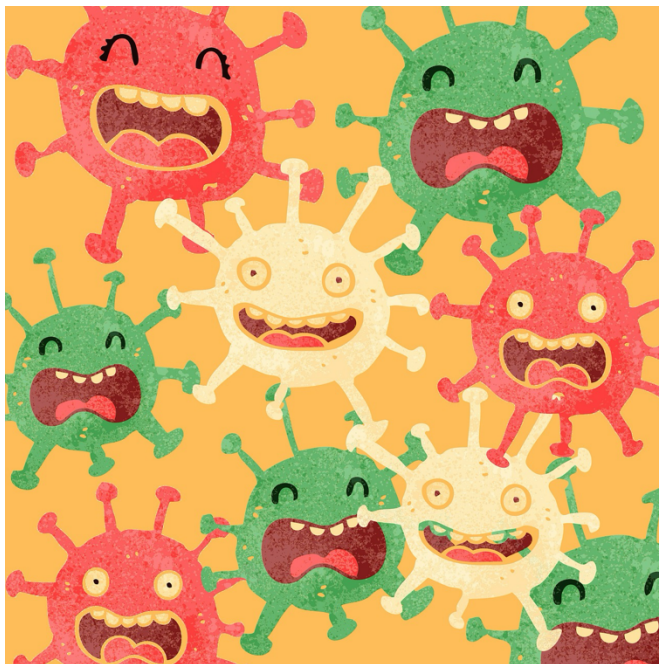
Gerai žinomas pavyzdys – naftos išsiliejimų valymas. 1989 m. įvykusi „Exxon Valdez“ katastrofa išryškino katastrofišką tokių incidentų poveikį ir kartu sukėlė susidomėjimą bioremediacija. Mokslininkai atrado, kad tam tikros bakterijos, pvz., *Alcanivorax borkumensis*, natūraliai minta angliavandeniliais, esančiais žalioje naftoje. Įvedus šiuos mikrobus į išsiliejimo vietas arba paskatinus jų augimą papildomomis maistinėmis medžiagomis, galima gerokai pagerinti valymo pastangas, sumažinant tiek tiesioginę, tiek ilgalaikę žalą aplinkai.

Be naftos, bioremediacija taip pat yra praktiška sprendžiant sunkiųjų metalų taršos problemą. Pramoninė veikla dažnai palieka pavojingus elementus, tokius kaip švinas, gyvsidabris ir kadmis, kurie kelia grėsmę tiek ekosistemoms, tiek žmonių sveikatai. Tam tikros bakterijos ir grybeliai, vadinami biosorbentais, gali šiuos metalus prijungti prie savo ląstelių struktūrų, todėl jie tampa mažiau toksiški ir lengviau išskiriami iš aplinkos (Hartman, 2024).



Kas yra mikrobai?

Mikrobai arba mikroorganizmai yra mikroskopinės gyvybės formos, kurios paprastai nematomos plika akimi. Jie yra neįtikėtinai įvairūs ir gyvena praktiškai kiekvienoje Žemės aplinkoje – nuo giljavandenių versmių iki žmogaus kūno. Mikrobai atlieka esminį vaidmenį ekosistemose, žmonių sveikatai ir įvairiuose pramoniniuose procesuose.



Pagrindiniai mikrobų tipai:

1. Bakterijos: vienaląsčiai organizmai be branduolio (prokariotai). Jie pasižymi įvairia forma ir medžiagų apykaitos gebėjimais. Bakterijos yra visur paplitusios, randamos dirvožemyje, vandenyje ir yra žmogaus mikrobiomo dalis. Nors kai kurios bakterijos yra patogeninės, daugelis jų yra naudingos, padedančios tokiuose procesuose kaip virškinimas ir maistinių medžiagų apykaita.
2. Archėjos: Archėjos, taip pat vienaląsčiai prokariotai, skiriasi nuo bakterijų savo genetinė sandara ir membranų sudėtimi. Jos žinomos dėl to, kad klesti ekstremalioje aplinkoje, pavyzdžiui, karštosiose versmėse ir druskinguose ežeruose, tačiau jų taip pat aptinkama ir dažnesnėse buveinėse, įskaitant žmogaus žarnyną. Archėjos atlieka svarbų vaidmenį tokiuose procesuose kaip metano gamyba ir azoto ciklas (https://lt.wikipedia.org/wiki/Archaea?utm_source=chatgpt.com).
3. Grybai: Šiai grupei priklauso mielės, pelėsiai ir grybai. Grybai yra eukariotiniai organizmai (su branduoliu), kurie gali būti vienaląsčiai arba daugialąsčiai. Jie yra svarbūs ekosistemų skaidytojai, skaidantys organines medžiagas, ir yra taikomi maisto gamyboje bei medicinoje.





4. Protistai: Įvairi, daugiausia vienaląsčių eukariotinių organizmų grupė. Protistams priklauso pirmuonys ir tam tikros rūšies dumbliai. Jie gyvena įvairiose aplinkose – nuo gėlavandenių iki jūrų sistemų – ir atlieka svarbų vaidmenį maistinių medžiagų cikle bei yra mitybos tinklo dalis.
5. Virusai: neląsteliniai dariniai, sudaryti iš genetinės medžiagos (DNR arba RNR), apgaubtos baltymų apvalkalu. Virusams daugintis reikalinga ląstelė-šeimininkė, ir jie žinomi dėl to, kad sukelia ligas žmonėms, gyvūnams ir augalams. Nors pagal visus apibrėžimus jie nelaikomi „gyvais“, jie yra plačiai tiriami mikrobiologijoje (https://www.britannica.com/science/microbiology/Types-of-microorganisms?utm_source=chatgpt.com).

Mikrobų svarba

Mikroorganizmai yra esminiai gyvybei Žemėje, atliekantys svarbų vaidmenį aplinkos procesuose, žmonių sveikatai ir biotechnologijoms.

1. Aplinkosauginė reikšmė

- Maistinių medžiagų ciklas: mikrobai yra būtini biogeocheminiuose cikluose, įskaitant azoto, anglies ir sieros ciklus, nes jie palengvina šių elementų transformaciją ir judėjimą ekosistemose (preprints.org).
- Bioremediacija: tam tikri mikrobai gali skaidyti aplinkos teršalus, tokius kaip angliavandeniliai ir sunkieji metalai, todėl jie yra neįkainojami valant užterštas vietas.

2. Žmonių sveikata

- Mikrobiomo funkcija: Žmogaus mikrobiomas, kurį sudaro trilijonai mikrobų, yra neatsiejama virškinimo, imuninės sistemos vystymosi ir apsaugos nuo patogenų dalis. Šios mikrobų bendruomenės sutrikimai yra susiję su įvairiomis ligomis (pmc.ncbi.nlm.nih.gov).
- Ligų prevencija ir terapija: Pažanga suprantant mikrobiomą lėmė naujų terapinių metodų, įskaitant mikrobiomo moduliavimą ligoms gydyti arba jų prevencijai (nature.com).

3. Biotechnologijų taikymas

- Pramoniniai procesai: Biotechnologijose mikrobai panaudojami antibiotikams, fermentams, biokurui ir fermentuotiems maisto produktams gaminti. Jų metaboliniai gebėjimai panaudojami įvairiose pramonės šakose.
- Genetinė inžinerija: genetiškai modifikuoti mikrobai kuriami specifinėms užduotims, pavyzdžiui, terapinių junginių gamybai ar aplinkos teršalų skaidymui, todėl jie universalūs biotechnologijose.





Taršos problemos

Aplinkos taršos rūšys



1 pav. Aplinkos tarša, šaltinis: https://gosharnener.com/blogs/710991/Environmental-Pollution?lang=de_de

- Oro tarša

Oro tarša – tai kenksmingų medžiagų, įskaitant dujas, kietąsias daleles ir biologines molekules, buvimas Žemės atmosferoje, kurios gali kelti pavojų žmonių sveikatai ir aplinkai. Įprasti teršalai, tokie kaip anglies monoksidas, azoto oksidai, sieros dioksidas, ozonas ir kietosios dalelės, dažnai kyla deginant išskastinį kurą transporte, pramonėje ir elektros energijos gamyboje. Pasekmės – nuo kvėpavimo takų ligų ir širdies bei kraujagyslių problemų iki aplinkos blogėjimo, pavyzdžiui, rūgštaus lietaus ir visuotinio atšilimo.

- Vandens tarša

Vandens tarša – tai vandens telkinių, įskaitant upes, ežerus, vandenynus ir gruntinius vandenis, užteršimas, dėl kurio jie tampa nesaugūs žmonėms ir kenksmingi vandens gyvūnijai. Paprastai tai sukelia teršalų, tokių kaip pramoninės atliekos, nuotekos, pesticidai, plastikas ir sunkieji metalai, išleidimas į vandens šaltinius. Ši tarša sukelia įvairių problemų, įskaitant vandeniu plintančias ligas, ekosistemų naikinimą ir geriamojo vandens prieinamumo sumažėjimą.

- Dirvožemio tarša

Dirvožemio tarša – tai žemės kokybės blogėjimas dėl toksiškų cheminių medžiagų, sunkiųjų metalų ir atliekų, kurios sutrikdo dirvožemio sveikatą ir produktyvumą. Taršos šaltiniai: pramoninė veikla, žemės ūkio chemikalai, netinkamas atliekų šalinimas ir kasybos operacijos.





Užterštas dirvožemis gali paveikti maisto saugą, augalų augimą ir gruntinio vandens kokybę, taip pat kelti tiesioginį pavojų žmonių ir gyvūnų sveikatai.

- Triukšmo tarša

Triukšmo tarša – tai per didelis arba trikdantis triukšmo lygis aplinkoje, trukdantis įprastai veiklai ir gerovei. Ją daugiausia sukelia eismas, statybos, pramoniniai procesai ir miestų plėtra. Lėtinis didelio triukšmo lygio poveikis yra susijęs su įvairiomis sveikatos problemomis, įskaitant klausos praradimą, miego sutrikimus, padidėjusį streso lygį ir sutrikusią kognityvinę veiklą, ypač vaikams.

- Šviesos tarša

Šviesos tarša – tai pernelyg didelė arba netinkamai nukreipta dirbtinė šviesa, kuri praskaidrina naktinį dangų ir sutrikdo natūralią tamsą. Ją daugiausia sukelia gatvių apšvietimas, reklaminiai ženklai, pastatai ir viešosios erdvės miestuose. Šviesos tarša ne tik užstoja žvaigždžių matomumą, bet ir sutrikdo laukinės gamtos elgesį bei žmonių cirkadinį ritmą, sukeldama ekologinę disbalansą ir su miegu susijusias sveikatos problemas.

- Šiluminė tarša

Terminė tarša atsiranda, kai pramonės įmonės išleidžia įkaitintą vandenį ar orą į natūralią aplinką, ypač vandens sistemas, taip pakeisdamos temperatūros balansą. Įprastai prie to prisideda elektrinės, gamybos įrenginiai ir naftos perdirbimo gamyklos. Dėl padidėjusios temperatūros sumažėja deguonies kiekis vandenyje, kenkiama jautriems vandens organizmams ir gali nykti biologinė įvairovė bei žydėti dumbliai, sutrikdyti vandens ekosistemas.

- Radioaktyvioji tarša

Radioaktyvioji tarša – tai aplinkos užteršimas radioaktyviosiomis medžiagomis dėl atsitiktinio išmetimo, netinkamo atliekų šalinimo arba dėl stichinių nelaimių. Įprasti šaltiniai yra atominės elektrinės, medicinos ir tyrimų įstaigos bei ankstesni branduolinių ginklų bandymai. Šio tipo tarša kelia ilgalaikę riziką žmonių sveikatai ir ekosistemoms, sukeldama vėžį, genetines mutacijas ir nuolatinę aplinkos taršą.

Mikrobų vaidmuo valant aplinkos taršą

Mikroorganizmai atlieka gyvybiškai svarbų ir natūralų vaidmenį mažinant aplinkos taršą per procesą, vadinamą bioremediacija, kai bakterijos, grybeliai, dumbliai arba archėjos skaido, transformuoja arba imobilizuoja kenksmingus teršalus. Šie mikrobai yra labai prisitaikantys ir gali klestėti įvairiose aplinkose, įskaitant užterštą orą, vandenį ir dirvožemį. Vandens sistemose tokios bakterijos kaip *Pseudomonas* ir dumblių tipo *Chlorella vulgaris* gali skaidyti naftos





junginius, pašalinti sunkiuosius metalus ir absorbuoti maistinių medžiagų perteklių, padėdamas atkurti vandens kokybę (UNEP, 2021). Dirvožemio atkūrimo procese tam tikri mikrobai skaido sudėtingus angliavandenilius, pesticidus ir net sunkiuosius metalus, o tokie grybai kaip *Phanerochaete chrysosporium* skaido patvarius organinius teršalus (FAO, 2021). Oro valymo sistemos, įskaitant biofiltrus ir biologinius šveitiklius, naudoja mikrobų bendruomenes lakiesiems organiniams junginiams ir amoniakui pašalinti iš pramoninių išmetamųjų dujų (EPA, 2023). Be to, mikrobų biotechnologijų pažanga leido sukurti mikrobų padermes, kurios efektyviau veikia konkrečius teršalus. Mikrobų valymo ekologinė nauda ne tik sumažina cheminių ar mechaninių intervencijų poreikį, bet ir skatina tvarų aplinkos tvarkymą. Todėl mikrobai vis labiau pripažįstami kaip svarbūs sąjungininkai kovojant su tarša ir siekiant ilgalaikio ekologinio atkūrimo.

Oro taršos valymo metodai

Oro tarša mažinama naudojant mechaninį filtravimą, cheminį neutralizavimą ir vis dažniau biologinius metodus. Tokios technologijos kaip elektrostatiniai nusodintuvai ir skruberiai pašalina kietąsias daleles ir dujas iš pramoninių išmetamųjų teršalų, o kataliziniai konverteriai mažina transporto priemonių teršalus. Biofiltracijos sistemos, kurios naudoja mikrobų bendruomenes ore esantiems toksinams, tokiems kaip LOJ ir sieros junginiai, metabolizuoti, siūlo tvarią alternatyvą cheminiam valymui. Šios biologinės sistemos yra ypač veiksmingos valant kvapiąsias emisijas iš nuotekų ir kompostavimo įrenginių (Deshusses, 1997).

Vandens taršos valymo metodai

Vandens taršos valymas apima daugiapakopius valymo procesus, apimančius fizinį atskyrimą, cheminį dezinfekavimą ir biologinį skaidymą. Sedimentacija ir membraninis filtravimas pašalina kietąsias medžiagas, o ozonavimas ir koaguliacija naikina patogenus ir sunkiuosius metalus. Biologiniai apdorojimo būdai, tokie kaip aktyvuoto dumblo ir bioplėvelės reaktoriai, remiasi mikrobų aktyvumu organinėms medžiagoms ir maistinėms medžiagoms virškinti. Taip pat buvo tiriamos mikrobinės kuro elementai, skirti vienu metu valyti nuotekas ir gaminti elektros energiją, demonstruojant novatoriškas dvejopos paskirties pritaikymo galimybes (Logan ir kt., 2006).

Dirvožemio taršos valymo metodai

Dirvožemio taršos atkūrimui naudojamos tokios strategijos kaip kasimas, cheminė imobilizacija ir biologiniai procesai. Bioremediacijos metodai yra ypač veiksmingi, nes juose naudojami vietiniai arba introdukuoti mikrobai naftos angliavandeniliams, tirpikliams ir pesticidams skaidyti. Fitoremediacija, kurią sustiprina su rizosfera susiję mikrobai, siūlo ekologišką sprendimą, skatindama teršalų įsisavinimą arba skaidymą per augalų ir mikrobų sąveiką. Naujausi tyrimai pabrėžia mikrobų konsorcių sėkmę skaidant policiklinius aromatinius angliavandenilius (PAH) sudėtingai užterštuose dirvožemiuose (Meckenstock ir kt., 2015).





Triukšmo taršos mažinimo metodai

Triukšmo taršos, skirtingai nei cheminių teršalų, negalima pašalinti, tačiau ją reikia mažinti planuojant ir inžinerinėmis priemonėmis. Strategijos apima akustinius barjerus, garsą sugeriančias statybines medžiagas ir miesto žaliąsias zonas, kurios mažina aplinkos triukšmo lygį. Augalija ir dirvožemis, kuriuose gausu sveikų mikrobus bendrijų, atlieka pasyvų, bet palaikantį vaidmenį mažinant triukšmą, minkštinami paviršius ir sugerdami garso energiją. Miesto miškų projektavimo tyrimas parodė, kad tankios augmenijos integravimas į miesto aplinką gali sumažinti triukšmą iki 10 dB (Fang ir Ling, 2003).

Šviesos taršos mažinimo metodai

Šviesos taršos mažinimas apima sumanų apšvietimo projektavimą ir bendruomenės planavimą, siekiant sumažinti nereikalingą dirbtinį apšvietimą. Tokios technikos kaip visiškai uždaros šviesos šviestuvai, judesio jutikliai ir šiltų spalvų šviesos diodai padeda apriboti dangaus švytėjimą ir akinimą. Nors mikrobus veikla tiesiogiai nesumažina šviesos taršos, dirbtinės šviesos sumažinimas yra naudingas naktinėms ekosistemoms, kurios priklauso nuo mikrobus turtingo dirvožemio ir natūralios šviesos ciklų. Tyrimai rodo, kad dirbtinis apšvietimas sutrikdo naktinio apdulkinimo tinklus ir mikrobus aktyvumą dirvožemio plutose (Knop ir kt., 2017).

Šiluminės taršos mažinimo metodai

Terminė tarša, ypač dėl pramoninių išleidimų į vandens telkinius, valdoma inžinerinėmis aušinimo sistemomis, tokiomis kaip aušinimo tvenkiniai ir bokštai. Besiformuojančios natūralios sistemos, tokios kaip dirbtinės pelkės, naudoja termiškai atsparius mikrobus ne tik temperatūrai reguliuoti, bet ir teršalams šildomose nuotekose skaidyti. Vymazal (2011 m.) atliktame tyrime pabrėžiamas dirbtinių pelkių naudojimas maistinių medžiagų šalinimui ir temperatūros mažinimui nuotekų valyme.

Radioaktyviosios taršos valymo metodai

Radioaktyviosios taršos šalinimas apima izoliavimą, vitrifikaciją ir, vis dažniau, biologinį stabilizavimą. Kai kurie mikrobai, pvz. *Deinococcus radiodurans* ir urano redukavimas *Geo* bakterija rūšys, pasižymi atsparumu spinduliuotei ir gali pakeisti radionuklidų tirpumą ar judrumą. Šių organizmų vaidmuo ilgalaikėje bioremediacijoje branduolinių atliekų aikštelėse yra tiriamas. Naujausi Fredrickson ir kt. (2004 m.) atlikti tyrimai parodė daug žadantį urano mikrobus redukciją anaerobinėmis sąlygomis, ribojant jo judrumą požeminiame vandenyje.



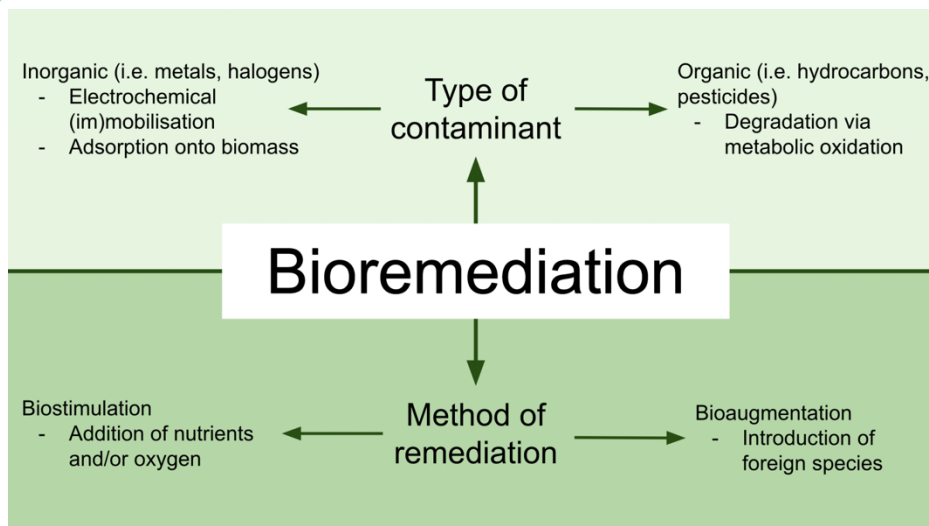


1 lentelė. Aplinkos taršos tipai ir susiję valymo metodai

Taršos tipas	Mikrobų valymo metodas	Mikrobų pavyzdžiai
Oras	Biofiltracija, biologiniai skruberiai	Pseudomonas, Bacillus, Aspergillus
Vanduo	Aktyvuotas dumblas, bioaugmentacija, dumbliai	Nitrosomonas, P. putida, Chlorella
Dirvožemis	Bioremediacija, mikoremediacija	Phanerochaete, Bacillus, Rhizobium
Triukšmas	Nėra tiesioginio vaidmens	—
Šviesa	Nėra tiesioginio vaidmens	—
Terminis	Netiesioginiai (termofiliniai mikrobai)	Thermus aquaticus, B. stearothermophilus
Radioaktyvus	Eksperimentiniai (radioaktyviems spinduliams atsparūs mikrobai)	Deinococcus radiodurans, radiotrofiniai grybai



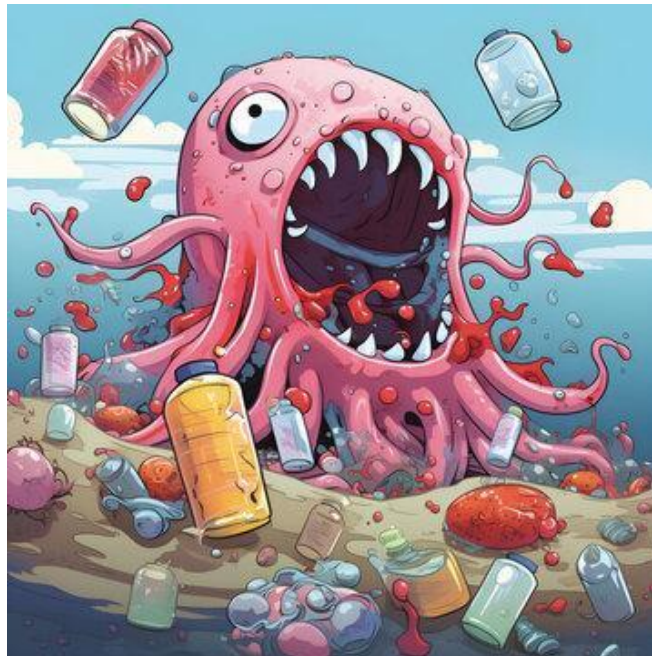
Įvadas į bioremediaciją



Bioremediacija yra tvarus ir biologiškai pagrįstas metodas, kurio metu gyvi mikroorganizmai, pirmiausia bakterijos, grybeliai, dumbliai ir archėjos, naudojami aplinkos teršalams skaidyti, detoksikuoti arba transformuoti į mažiau kenksmingas formas. Nors tradiciškai bioremediacija siejama su dirvožemio tarša, ji pasirodė esanti veiksminga įvairiose aplinkosaugos situacijose, įskaitant užterštą vandenį, užterštą orą ir net radioaktyviųjų atliekų aikšteles. Pavyzdžiui, vandens sistemose naftą skaidančios bakterijos ir maistines medžiagas eikvojančios dumbliai naudojami naftos išsiliejimams ir eutrofiniams ežerams valyti. Oro valymo srityje biofiltrai naudoja mikrobines bioplėveles, kad surinktų ir biologiškai skaidytų lakiuosius organinius junginius (LOJ) ir sieros dujas iš pramoninių išmetamųjų teršalų. Be to, radioaktyvus bioremediacija yra nauja sritis, kurioje dalyvauja ekstremofiliniai mikrobai, tokie kaip *Geobakterija* ir *Deinococcus radiodurans* tiriamas jų gebėjimas imobilizuoti arba transformuoti radioaktyvius elementus. Didėjantis mikrobų konsorciūmų ir genetiškai modifikuotų padermių taikymas dar labiau išplėtė bioremediacijos potencialą sudėtingiems ir sunkiai įveikiams teršalams. Pasak Singh ir Strong (2022), omikos technologijų ir bioinformatikos įrankių integravimas žymiai padidino mikrobų intervencijų specifiškumą, greitį ir mastelio keitimą aplinkos valyme. Didėjant pasauliniams taršos iššūkiams, bioremediacija siūlo nebrangią, mažai energijos reikalaujančią ir ekologiškai atkuriančią alternatyvą įprastiems cheminiams ir mechaniniams valymo metodams.



Kaip mikrobai „valgo“ arba skaido teršalus



Mikroorganizmai geba skaidyti teršalus per medžiagų apykaitos procesus, kurių metu teršalai tarnauja kaip energijos, anglies ar maistinių medžiagų šaltiniai. Šis biologinis skaidymas vyksta, kai mikrobai išskiria fermentus, kurie chemiškai pakeičia toksiškas medžiagas, paversdami jas paprastesniais, mažiau kenksmingais junginiais. Pavyzdžiui, angliavandenilius skaidančios bakterijos, tokios kaip *Pseudomonas*, *Alkanivoraksas* ir *Mycobacterium*. Gali metabolizuoti naftos komponentus oksiduodamos juos į anglies dioksidą ir vandenį aerobinio kvėpavimo metu. Anaerobinėmis sąlygomis tam tikros bakterijos taip pat gali naudoti teršalus kaip alternatyvius elektronų akceptorius, leisdamos joms skaidyti tokius junginius kaip nitratai, chlorinti tirpikliai arba sunkieji metalai.

Grybai, tokie kaip *Phanerochaete chrysosporium* gali skaidyti patvarius organinius teršalus, tokius kaip pesticidai ir dažikliai, gamindami ligninolizinius fermentus, kurie skaido sudėtingas molekules į mažesnius fragmentus. Kai kurie mikrobai netgi transformuoja sunkiuosius metalus į netirpias formas redokso reakcijų būdu, imobilizuodami juos dirvožemyje ar nuosėdose. Aplinkos veiksniai, įskaitant pH, temperatūrą, deguonies prieinamumą ir kosubstratų buvimą, daro įtaką šiems procesams. Remiantis naujausiais Ghosal ir kt. (2016 m.) duomenimis, mikrobų bendrijos dažnai efektyviau veikia kaip konsorciumai, kur skirtingos rūšys veikia sinergiškai, kad efektyviau skaidytų sudėtingus teršalų mišinius nei pavienės padermės. Šie biologiniai mechanizmai yra labai svarbūs tiek natūralioms, tiek inžinerinėms bioremediacijos sistemoms, todėl mikrobai yra nepakeičiami veiksniai tvarkant aplinkos taršą.





Mikrobinės bioremediacijos pavyzdžiai

Pseudomonas ir naftos skaidymas

Genties rūšys *Pseudomonas*, ypač *Pseudomonas aeruginosa*, yra žinomos dėl savo gebėjimo skaidyti žalioje naftoje esančius angliavandenilius. Šios bakterijos gamina biosurfaktantus, kurie emulsuoja naftą, padidindami jo biologinį prieinamumą mikrobų skaidymui. Naujausi tyrimai parodė, kad bendra kultivacija *P. aeruginosa* su *Bacillus subtilis* padidina žalios naftos skaidymo efektyvumą, pašalinant iki 63,05 % naftos komponentų. pmc.ncbi.nlm.nih.gov/frontiersin.org

Ideonella sakaiensis ir gebėjimas valgyti plastiką

Ideonella sakaiensis yra bakterija, galinti skaidyti polietileno tereftalatą (PET) – įprastą plastiką, naudojamą buteliuose ir pakuotėse. Ji išskiria fermentą, vadinamą PETaze, kuris skaido PET į monomeras – tereftalio rūgštį ir etilenglikolį, kuriuos bakterija vėliau panaudoja augimui. Naujausi tyrimai daugiausia dėmesio skyrė PETaze efektyvumo didinimui taikant genetinę inžineriją, siekiant pagerinti plastiko skaidymo greitį. lt.wikipedia.org

Geobakterijų rūšys ir metalų valymas

Genties nariai *Geobakterija*, pvz., *Geobacter metallireducens*, yra žinomos dėl savo gebėjimo redukuoti ir imobilizuoti sunkiuosius metalus, įskaitant uraną ir chromą, užterštoje aplinkoje. Šios bakterijos medžiagų apykaitos procesų metu perduoda elektronus metalo jonams, tirpius toksiškus metalus paversdamos netirpiomis formomis, kurios nusėda iš tirpalo, taip sumažindamos jų judrumą ir biologinį prieinamumą.

Įvairūs bioremediacijos metodai

Yra daug bioremediacijos panaudojimo būdų, kiekvienas skirtas skirtingiems teršalams ir vietoms:

- Fitoremediacija – augalai padeda išvalyti teršalus iš dirvožemio, vandens ir oro.
- Mikrobų valymas – mikrobai skaido teršalus ir juos paverčia saugesnėmis medžiagomis.
- Mikoremediacija – grybai naudojami įvairių rūšių teršalams valyti.
- Biomanipuliacija – gyvūnai, pavyzdžiui, žuvis, padeda valyti užterštą vandenį.

Šie metodai siūlo daug būdų, kaip spręsti aplinkosaugos problemas. Jie rodo, kaip gamta gali padėti mums apsivalyti

(<https://editverse.com/bioremediation-using-nature-to-clean-up-pollution/>).



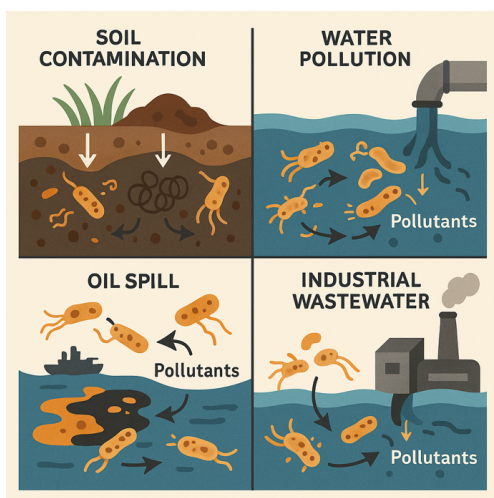


2 lentelė. Bioremediacijos metodai

Bioremediacijos technika	Aprašymas	Pavyzdžiai
Fitoremediacija	Augalai padeda išvalyti dirvožemį, vandenį ir orą nuo teršalų.	Rizofiltracija, fitoekstrakcija, fitostimuliacija, fitostabilizacija
Mikrobų valymas	Mikrobai skaidosi ir teršalus paverčia saugesnėmis medžiagomis.	Biostimuliacija, bioaugmentacija, vidinė bioremediacija
Mikoremediacija	Grybai naudojami teršalams, tokiems kaip sunkieji metalai ir nafta, valyti.	Grybų sukeltas sunkiųjų metalų, angliavandenių ir organinių junginių skaidymas
Bio manipuliacija	Gyvūnai, kaip ir žuvis, padeda išvalyti užterštą vandenį.	Žuvų naudojimas dumblių žydėjimui kontroliuoti ir vandens kokybei gerinti

Mikrobų valymas

Mikrobai yra mikroskopiniai organizmai, klasifikuojami pagal dvi svarbias gyvybės sritis: archėjas ir eubakterijas. Jie apima platų gyvybės formų spektrą, įskaitant pirminius gamintojus, kurie šviesą ar cheminius junginius paverčia energija, taip pat heterotrofus ir skaidytojus, kurie mitybai reikalingi išoriniai šaltiniai. Mikrobai yra visur paplitę, todėl jų randama praktiškai kiekvienoje Žemės aplinkoje.



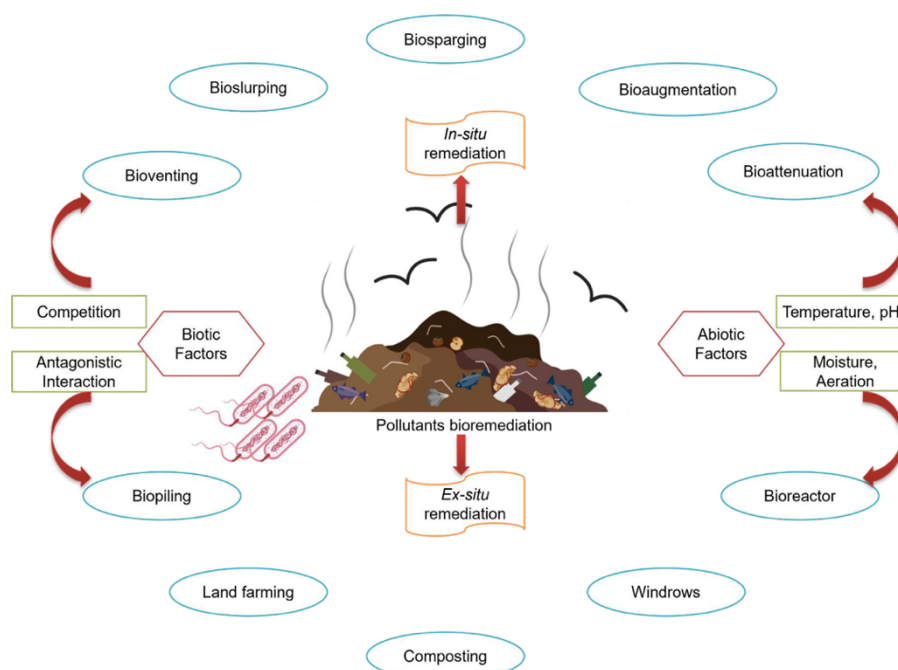
Šie maži organizmai vaidina svarbų vaidmenį žmogaus gyvenime. Jie padeda išvalyti teršalus, gerina dirvožemio derlingumą, prisideda prie maisto technologijų pažangos ir sintetina būtinas maistines medžiagas, kurios palaiko mūsų sveikatą. Daugeliu atvejų mes sugyvename su mikrobais net nežinodami apie jų buvimą.

Nors daugelis mikrobus atlieka apsaugines funkcijas, pavyzdžiui, apsaugo mus nuo kenksmingų patogenų, kiti gali turėti neigiamą poveikį. Jie gali sukelti ligų protrūkius, sugadinti maistą arba prisidėti prie medžiagų irimo ir skaidymosi (Postgate, 2003).

Mikrobų valymo strategijos ir technologijos

Mikrobinis valymas yra valymo metodo rūšis, kai panaudojamos natūralios dirvožemyje esančių mikrobus funkcijos, siekiant teršalus paversti netoksiškais, ir paprastai tai apima bioaugmentaciją ir biostimuliaciją. Dėl mažo kiekio ir silpno skaidymo gebėjimo vietiniai mikrobai

yra nuolat ribojami teršalų toksiškumo bendrai užterštoje aplinkoje. Bioaugmentacija apima privalomai skaidančių bakterijų sujungimą su padermėmis, kurios gali atlaikyti kelis sunkiuosius metalus (SM), siekiant pašalinti tikslinius teršalus (3 pav.). Biostimuliacija gerina dirvožemio kokybę, įvedant augimo hormonus ir maistines medžiagas, kurios skatina vietinės mikrofloros vystymąsi. Tačiau toliau aptariamos įvairios mikrobus valymo technologijos.

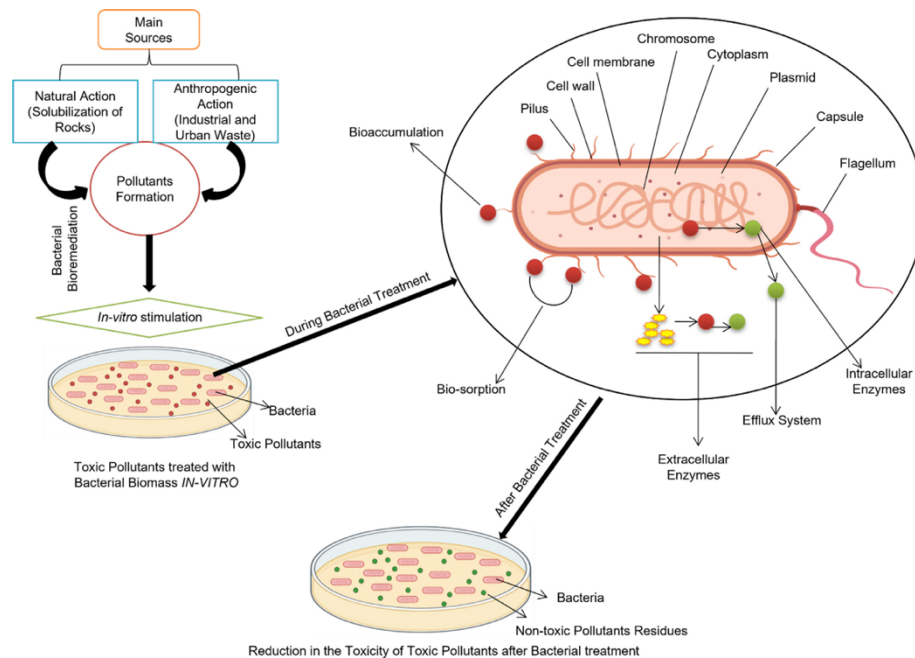


3 pav. Bakterijų bioremediacijos in vitro mechanizmai užterštoje aplinkoje, šaltinis: Sharma ir kt., 2022



Bioremediacijos metodai

Šis išvalymas panaikina poreikį išgauti užterštą dirvožemį ir jį transportuoti į valymo įrenginius už objekto ribų, taip sumažinant dirvožemio trikdymą, sumažinant pagalbininkų ir bendruomenės sąlytį su toksinais ir potencialiai sumažinant valymo išlaidas. Dirvožemio pralaidumas, taršos gylis, temperatūra ir tikėtinas cheminis gilusis išplovimas yra svarbios lauko charakteristikos, į kurias reikia atsižvelgti (Fasani ir kt., 2018). Teršalų valymas vietoje pavaizduotas 4 paveiksle.



4 pav. Mikrobinis bioremediacijos taikymas užterštų vietų atkūrimui taikant in-situ ir ex-situ valymą, šaltinis: Sharma ir kt., 2022

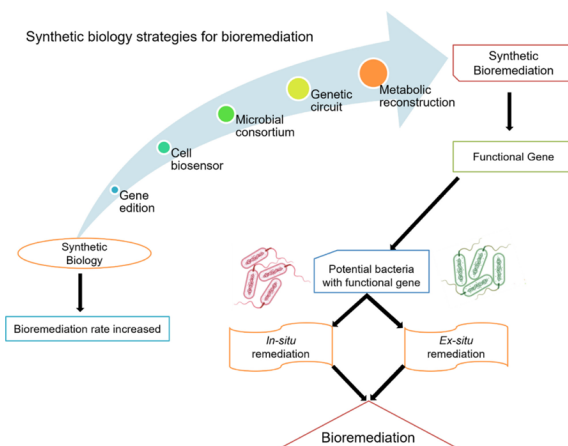
Mikrobai neskaido reikšmingų teršalų, o veikia jų fizikines ir chemines savybes (Sharma ir kt., 2021f; Sharma ir kt., 2021g). Valymo komponentas apima tarpląstelinį kaupimąsi, tolesnį ląstelių kompleksų formavimąsi ir oksidacijos-redukcijos arba nusodinimo skaičiavimus. Pavojingi sunkieji metalai yra plačiai paplitę pramoniniuose procesuose ir yra reikšmingi aplinkos teršalai. Molekulinis filtravimas metalams išgauti iš žemos kokybės medžiagų buvo paprastas ir sėkmingas (Dhaliwal ir kt., 2020). *Pseudomonas* sp., *Bacillus* sp., *Torulopsis bombicola*, *Desulfuromonas palmitatis* ir kiti mikroorganizmai gali detoksikuoti mechanines atliekas, nuotekų dumblą ir išvalyti sunkiaisiais metalais (SM) užterštus likučius bei dirvožemius (Priya ir Nagan, 2015). Mikrobu biomase pasižymi įvairiomis biosorbcijos galimybėmis, ir tarp rūšių vyksta esminiai pokyčiai. Jų ypatingas biosorbcijos gebėjimas priskiriamas didesniai tūrio ir paviršiaus santykiui ir tikėtinioms sudėtingos cheminės adsorbcijos vietoms, pirmiausia ląstelių membranoms (Li ir kt., 2019). Mikroorganizmai dažnai yra atsparesni ir ilgiau išlieka mišrioje kultūroje. Todėl kultūrų konsorciumai metaboliškai dominuoja metalų biosorbcijoje ir yra tinkami didelio masto taikymams. Tačiau, kadangi kiekvienos mikroorganizmo ląstelės biosorbcijos pajėgumas skiriasi, jis priklauso nuo konkrečių apdorojimo ir bandymo sąlygų (Dhaliwal ir kt., 2020).



Natūralus slopinimas

Teršalai biologinio skaidymosi metu paverčiami mažiau pavojinga forma arba imobilizuojami (natūralus susilpnėjimas). Šiuos transformacijos ir imobilizacijos mechanizmus pirmiausia sukelia mikroorganizmų biologinis skaidymas ir, mažesniu mastu, sąveika su natūraliai vykstančia chemine ir geologine terpės sorbcija. Šis mechanizmas būdingas konkrečiam teršalui ir buvo patvirtintas kaip būdas apdoroti kuro komponentus, tokius kaip BTEX (benzenas, toluenas, etilbenzenas ir ksilenas), bet ne daugeliui kitų klasių (Ganiyu ir kt., 2022). Natūralaus susilpnėjimo laikotarpis labai skiriasi priklausomai nuo vietos aplinkybių. Daugeliui užterštų vietų gali nereikėti išsamios valymo strategijos, o biologinis susilpnėjimas yra ekonomiškai efektyvus ir efektyvus. Iš tikrųjų Jungtinės Valstijos sėkmingai pritaikė įvairius biologinio valymo metodus, kurių kainos yra maždaug 80–90 % pigesnės nei alternatyvios valymo technologijos, pagrįstos cheminiais ir fiziniais principais. Išlaidos po valymo žymiai sumažėja, o vietos trikdymas yra minimalus. Pramoninės ir aplinkosaugos biotechnologijos taip pat teikia pirmenybę naujiems metodams, todėl procesai, kuriuose naudojamos švarios technologijos, siekiant maksimaliai padidinti produkciją ir kartu susidaryti mažiau likučių (Rhea ir Clark, 2022). Kadangi dauguma dirvožemių yra oligotrofiniai arba juose trūksta reikiamų mikrobus, daugeliu atvejų vien biologinio silpninimo nepakanka ir tai užima daug laiko.

Šie genetinės ir metabolinės inžinerijos metodai gali padėti bioremediacijos procese (Liang ir kt., 2020). Genų redagavimui ir metabolinei inžinerijai teršalus gyvenančios bakterijos yra pagrindinis idealus kandidatas, nes jos yra naudojamos išgyventi ir prieglobstį rasti stresinėmis sąlygomis, kai yra įvairių toksiškų, atsparių ir neskaidomų ksenobiotikų. Be to, metabolinio kelio supratimas, atrodo, yra labai svarbus analizuojant mikrobus bioremediaciją (Plewniak ir kt., 2018). 5 paveiksle pavaizduotas metabolinės rekonstrukcijos vaidmuo sintetinėje bioremediacijoje, naudojant tiek in situ, tiek ex situ būdus pavojingiems teršalams valyti.



5 pav. Metabolinės rekonstrukcijos vaidmuo sintetinėje bioremediacijoje, taikant in-situ ir ex-situ būdus pavojingų teršalų bioremediacijai.





Atvejų analizės

„Deepwater Horizon“ naftos išsiliejimas (2010 m., Meksikos įlanka)

„Deepwater Horizon“ nelaimės metu į Meksikos įlanką išsiliejo apie 134 milijonai galonų žalios naftos – tai vienas didžiausių jūrinių naftos išsiliejimų istorijoje. Po to dauginosi vietinės jūrinės bakterijos, ypač *Alcanivorax* ir *Cycloclasticus* rūšys, kurios atliko svarbų vaidmenį skaidant angliavandenilius. Šie mikrobai panaudojo naftą kaip anglies šaltinį, veiksmingai sumažindami išsiliejimo poveikį aplinkai. Meksikos įlankos tyrimų iniciatyvos (GoMRI) finansuojami tyrimai suteikė įžvalgų apie mikrobų genomiką ir angliavandenilių bioremediacijos reakcijas jūrų ekosistemose.

Plastiko tarša vandenynuose

Plastiko atliekos, ypač mikroplastikas, plačiai paplito jūrų aplinkoje ir kelia grėsmę jūrų gyvūnijai ir žmonių sveikatai. Siekiant spręsti šią problemą, ieškoma novatoriškų bioremediacijos metodų:

Bendruomenės inicijuojamos iniciatyvos: Keralos valstijoje, Indijoje, Munambamo žvejų bendruomenė inicijavo projektą „Drive to Recover Ocean Plastic“ (DROP). Jame dalyvauja daugiau nei 600 žvejų laivų, savo kelionių metu rinkdami plastiko atliekas, todėl vien 2024–2025 m. buvo surinkta 22 000 kg plastiko. timesofindia.indiatimes.com

Mikrobiniai sprendimai: Tyrimais nustatyti plastiką skaidantys grybai, galintys suskaidyti sintetinius polimerus, tokius kaip poliuretanai. Šie grybai galėtų būti naudojami kontroliuojamoje aplinkoje, pavyzdžiui, nuotekų valymo įrenginiuose, siekiant sumažinti plastiko taršą. reuters.com+1 bassconnections.duke.edu+1

Sunkiųjų metalų užterštumas kasybos vietose

Kasybos veikla dažnai sukelia sunkiųjų metalų užterštumą aplinkiniuose dirvožemiuose ir vandens telkiniuose. Bioremediacijos strategijos, kuriose naudojami mikrobai, parodė potencialą mažinant šių teršalų kieki:

Čišia kalno švino ir cinko kasykla, Kinija: tyrimai atskleidė didelę sunkiųjų metalų taršą dirvožemyje aplink kasyklą. Mikrobų bendrijos, įskaitant *Sphingomonas* ir *Pseudomonas* rūšis, parodė atsparumą sunkiesiems metalams ir prisidėjo prie dirvožemio atkūrimo pastangų. pubs.rsc.org

„Tar Creek Superfund“ teritorija, JAV: įdiegta novatoriška bioremediacijos sistema, skirta apleistų kasyklų užterštam gruntiniam vandeniui, užterštam švinu, cinku, kadmiu ir geležimi, valyti. Sistemoje naudojama tvenkinių serija su aerobinių ir anaerobinių bakterijų apdorojimo įrenginiais, kurie žymiai sumažina sunkiųjų metalų koncentraciją vandenyje.

Biotechnologija ir ateitis

Mikrobų stiprinimas aplinkos valymui

Biotechnologijų pažanga leido mokslininkams genetiškai modifikuoti mikroorganizmus, siekiant pagerinti jų gebėjimą skaidyti aplinkos teršalus. Tokios technologijos kaip CRISPR-Cas9 leidžia tiksliai modifikuoti mikrobų genomus, pagerinant jų metabolinius kelius sudėtingų teršalų skaidymui. Pavyzdžiui, *Pseudomonas putida*, *Bacillus subtilis* ir *Escherichia coli* buvo sukurtos taip, kad padidintų tokių fermentų kaip citochromo P450 ir dioksigenazių raišką, todėl organiniai teršalai skaidomi greičiau. mdpi.com/researchgate.net





Be to, tokios priemonės kaip „XenoBug“, kurią sukūrė IISER Bhopal tyrėjai, naudoja mašininį mokymąsi, kad numatytų bakterijų fermentus, galinčius skaidyti įvairius teršalus, taip supaprastindamos veiksmingų mikrobų padermių identifikavimą bioremediacijos pastangoms. timesofindia.indiatimes.com

Etiniai ir ekologiniai aspektai

Nors genetiškai modifikuoti mikrobai siūlo daug žadančių taršos mažinimo sprendimų, jų naudojimas kelia keletą etinių ir ekologinių problemų:

- Ekologinis poveikis: Inžinerinių organizmų išleidimas į aplinką gali sutrikdyti esamas ekosistemas, o tai gali sukelti nenumatytų pasekmių, tokių kaip vietinių mikrobų bendrijų išstūmimas arba horizontalus genų perdavimas netikslinėms rūšims. pollution.sustainability-directory.com
- Biologinio sulaikymo iššūkiai: Labai svarbu užtikrinti, kad genetiškai modifikuoti mikrobai neišliktų už numatytų taikymo sričių ribų. Vidinio biologinio sulaikymo strategijos vis dar kuriamos, o jų veiksmingumas realiomis sąlygomis lieka neaiškus. nature.com
- Lygybė ir prieiga: Bioremediacijos technologijų teikiama nauda turi būti prieinama visoms bendruomenėms, ypač toms, kurias neproporcingai paveikė tarša. Yra rizika, kad patentuotos technologijos gali apriboti prieigą prie jų nepalankioje padėtyje esantiems regionams, taip padidindamos aplinkosauginę neteisybę. pollution.sustainability-directory.com
- Atkūrimo tikslų apibrėžimas: „Švarios“ arba „atkurtos“ aplinkos nustatymas yra subjektyvus ir gali skirtis tarp suinteresuotųjų šalių. Labai svarbu įtraukti bendruomenes į atkūrimo tikslų nustatymą, siekiant užtikrinti, kad bioremediacijos pastangos atitiktų vietos vertybes ir poreikius. pollution.sustainability-directory.com

Žaliųjų technologijų ateities potencialas

Biotechnologijų integravimas į aplinkos atkūrimą yra labai perspektyvus kuriant tvarias ir veiksmingas valymo strategijas:

- Sintetinė biologija ir kryptinga evoliucija: Pasitelkdami sintetinę biologiją ir kryptingą evoliuciją, mokslininkai gali sukurti mikrobus, turinčius patobulintų gebėjimų skaidyti teršalus, siūlydami pritaikytus sprendimus konkreitiems užterštumo scenarijams.
- Nanobioremediacija: Nanotechnologijų ir mikrobų valymo derinimas gali pagerinti bioremediacijos medžiagų tiekimą ir efektyvumą, todėl teršalus galima tiksliau nukreipti į aplinką. prism.sustainability-directory.com
- Mikrobiniai kuro elementai (MKL): MKL naudoja mikrobų medžiagų apykaitos aktyvumą elektros energijai gaminti ir tuo pačiu metu skaido organinius teršalus, todėl teikia dvigubą naudą – energijos gamybą ir aplinkos valymą. lt.wikipedia.org
- Mikrobinės elektrolizės anglies dioksido surinkimas (MECC): ši technologija naudoja mikrobus anglies dioksidui surinkti nuotekų valymo procesų metu, paversdama jį stabiliomis mineralinėmis formomis ir prisidedama prie anglies dioksido sekvestracijos. lt.wikipedia.org

Tobulėjant šioms technologijoms, tarpdisciplininis mikrobiologų, aplinkos mokslininkų, etikų ir politikos formuotojų bendradarbiavimas bus būtinas siekiant užtikrinti, kad biotechnologiniai taršos sprendimai būtų veiksmingi, etiški ir teisingi.





Papildytoji realybė veiksme: mikrobu valymo tyrinėjimas

Įsivaizduokite, kad galite vizualizuoti mikroskopinius mikrobus, stebėti, kaip jie sąveikauja su teršalais, ir stebėti juos veikiant, kai jie valo naftos išsiliejimus ar plastiko atliekas – visa tai jūsų artimiausioje aplinkoje. Ši įtraukia patirtis įmanoma dėl papildytosios realybės (AR) – technologijos, kuri perkelia skaitmeninį turinį į realų pasaulį per tokius įrenginius kaip išmanieji telefonai, planšetiniai kompiuteriai ar AR akiniai.

Naujausi tyrimai pabrėžė AR veiksmingumą gerinant gamtos mokslų ugdymą. Arici (2024 m.) tyrimas parodė, kad AR technologija skatina jautrumą aplinkai ir teigiamą elgesį, todėl yra vertinga priemonė gamtos mokslų ugdyme.

Mikrobiologijos srityje papildytoji realybė (AR) buvo veiksmingai naudojama siekiant palengvinti sudėtingų procesų mokymąsi. Herlinos ir kt. (2024 m.) atliktame tyrime buvo sukurtas AR pagrindu sukurtas mikrobiologijos praktinis vadovas, kuris žymiai pagerino studentų supratimą ir įsitraukimą, leisdamas jiems sąveikauti su virusų ir kitų mikroorganizmų 3D modeliais.

Šiame skyriuje ne tik sužinosite apie nepaprastas mikrobu galimybes valant aplinką, bet ir bendrausite su jais per papildytosios realybės (AR) patirtis. Šios veiklos skirtos abstrakčioms mokslinėms sąvokoms apčiuopiaminti, pagerinti jūsų supratimą apie mikrobu procesus ir įkvėpti novatorišką mąstymą apie tvarius taršos sprendimus.

„Papildytoji realybė veiksme: mikrobu valymo tyrinėjimas“ – tai edukacinė koncepcija, kuri integruoja besiformuojančias technologijas su aplinkos mokslu, kad nematomi mikrobu bioremediacijos procesai būtų matomi ir interaktyvūs. Mikrobu valymas, dar žinomas kaip bioremediacija, reiškia mikroorganizmų, tokių kaip bakterijos, grybeliai ir dumbliai, naudojimą pavojingiems teršalams skaidyti arba paversti mažiau kenksmingomis formomis. Šis procesas atlieka labai svarbų vaidmenį sprendžiant aplinkosaugos problemas, tokias kaip naftos išsiliejimai, sunkiųjų metalų užterštumas ir plastiko tarša. Pavyzdžiui, *Pseudomonas* ir *Bacillus* rūšys dažniausiai naudojamos angliavandeniliams skaidyti, o *Deinococcus radiodurans* parodė didelį potencialą valant radioaktyvias atliekas (Gadd, 2010; Varjani, 2017). Papildytosios realybės (AR) integravimas į šį kontekstą suteikia naują pedagoginę priemonę, skirtą vizualizuoti sudėtingas biologines sąveikas, kurios kitaip būtų nepastebimos plika akimi. AR gali imituoti užterštą aplinką, realiuoju laiku rodyti mikrobu aktyvumą ir leisti besimokantiems sąveikauti su skirtingomis bioremediacijos strategijomis, gerinant tiek supratimą, tiek įsitraukimą. Bacca ir kt. tyrimai. (2014) ir Dunleavy ir kt. (2009) tyrimai rodo, kad papildytoji realybė (AR) palaiko patirtinį mokymąsi, nes abstraktūs moksliniai procesai tampa prieinamesni ir įsimintinesni. Edukacinės AR programos, tokios kaip „Unity with Vuforia“, „JigSpace“ arba „Assemblr EDU“, gali būti panaudotos kuriant dinamines mikrobu reakcijos į aplinkos toksinus simuliacijas. Šis požiūris ne tik praturtina mokslinį raštingumą, bet ir skatina mokinius kritiškai mąstyti apie tvarius sprendimus ir biotechnologijų vaidmenį aplinkos apsaugoje. AR ir mikrobu bioremediacijos derinys suteikia galingą tarpdisciplininę mokymosi patirtį, pagrįstą Singh ir Chandra (2019) nustatytais principais, aprašytais jų tyrinėjant taršos kontrolės biotechnologijas, ir paremtą Crawford ir Crawford darbuose apie bioremediacijos principus ir taikymą pateikta pamatine sistema.

AR diegimas mikrobu bioremediacijos mokyme

AR pagrindu veikiančių mokymosi veiklų kūrimas

Papildytoji realybė (AR) siūlo įtraukiančią patirtį, kuri gali pagerinti mikrobu bioremediacijos procesų supratimą. Perkeldama skaitmeninę informaciją į realaus pasaulio aplinką, AR gali padaryti abstrakčias





sąvokas apčiuopiamas. Pavyzdžiui, studentai gali vizualizuoti, kaip konkretūs mikrobai sąveikauja su teršalais, stebėti skaidymo procesą ir suprasti poveikį aplinkai.

Naujausi tyrimai parodė papildytosios realybės (AR) veiksmingumą gamtos mokslų ugdyme. Sisteminiėje apžvalgoje pabrėžta, kad AR taikymas aplinkosauginiame ugdyme žymiai pagerina mokinių supratimą apie sudėtingas sąvokas, didina įsitraukimą ir skatina aplinkosauginį sąmoningumą. Panašiai, mikrobiologijos ugdymo tyrimai parodė, kad AR pagrįstos priemonės gali pagerinti mokinių supratimą ir susidomėjimą mokomuoju dalyku. ejmste.com/academic.oup.com

Mokslinis pagrindimas, edukacinė integracija ir įrankiai

Mikrobinė bioremediacija – tai procesas, kurio metu mikroorganizmai naudojami teršalams iš aplinkos, įskaitant dirvožemį, gruntinį vandenį ir jūrų ekosistemas, skaidyti, transformuoti arba pašalinti. Nors bioremediacija yra būtina norint tvariai spręsti taršos problemą, jos mokymas kelia didelių iššūkių dėl nematomos ir sudėtingos mikrobų sąveikos. Papildytoji realybė (AR), kaip įtraukianti technologija, suteikia unikalią galimybę pagerinti mikrobų bioremediacijos procesų supratimą ir perteikimą. Naudodama interaktyvias vizualizacijas, erdvinius perdengimus ir realaus laiko duomenų integraciją, AR užpildo atotrūkį tarp abstrakčių mikrobiologinių žinių ir patirtinio mokymosi (Bacca ir kt., 2014; Beck ir kt., 2022).

Vienas iš pagrindinių AR privalumų yra gebėjimas vizualizuoti nematomą mikrobų aktyvumą. Naudodami 3D modeliavimą, besimokantieji gali stebėti, kaip bakterijų padermės, tokios kaip *Alcanivorax borkumensis* arba *Pseudomonas putida*, reaguoja į teršalus, tokius kaip angliavandeniai ar sunkieji metalai (Vidali, 2001). Šios simuliacijos gali parodyti bioremediacijos eigą laikui bėgant, parodant, kaip aplinkos veiksniai (pvz., temperatūra, maistinių medžiagų kiekis, deguonies prieinamumas) veikia mikrobų veiklą (Dunleavy ir Dede, 2014). Šis interaktyvumas pagerina sąvokų išimimą ir besimokančiųjų įsitraukimą, suteikdamas galimybę aktyviai eksperimentuoti virtualioje aplinkoje.

Be to, AR suteikia reikšmingų privalumų erdvinis mokymasis. Projektuodami mikrobinis procesus į realaus pasaulio erdves, tokias kaip užteršto dirvožemio ar vandens aplinkos skerspjūviai, studentai įgyja gilesnį erdvinės dinamikos ir mikrobų bei teršalų sąveikos supratimą (Martínez-García ir kt., 2020). Kadangi tiesioginė prieiga prie užterštų vietų ar gyvų mikrobų dažnai yra nesaugi arba nepraktiška, papildytoji realybė (AR) tarnauja kaip...saugus modeliavimo įrankis, atkartojant pavojingus scenarijus be realaus pasaulio rizikos (Bacca ir kt., 2014).

Švietimo naudojimo atvejai:

- AR naftos išsijieimo laboratorijos modeliavimas: naudodami „Meta Quest“ arba mobiliuosius įrenginius, studentai ant naftos dėmių dislokuoja virtualius mikrobus ir stebi jų degradaciją įvairiomis sąlygomis.
- Interaktyvus dirvožemio valymo žemėlapis: „HoloLens“ pagrindu sukurta papildytoji realybė leidžia besimokantiems tyrinėti sluoksniuotus dirvožemio modelius, rodančius teršalų plitimą ir mikrobų kolonizaciją (Gadd, 2010).
- Realaus laiko jutiklis + AR prietaisų skydelis: aplinkos jutikliai seka teršalų lygius; AR perdengimai rodo mikrobų reakcijas, susiedami duomenis su biologine funkcija (Martínez-García ir kt., 2020).
- 3D mikrobų tyrinėjimo programėlė: mokiniai nuskaity QR kodus, kad aktyvuotų išsamius bakterijų modelius, pabrėždami ląstelių struktūras ir biologinio skaidymo vaidmenį (Beck ir kt., 2022).

Šias programas palaiko prieinami įrankiai ir platformos, įskaitant „Unity 3D“, „AR Foundation“, „ARKit/ARCore“ ir 3D modeliavimo programinę įrangą, pvz., „Blender“ ir „Sketchfab“. Tokia aparatinė





įranga kaip „Microsoft HoloLens“ ir „Meta Quest 3“ palaiko įtraukiančias, realaus laiko patirtis, kurios tampa vis labiau prieinamos ir lengvai pritaikomos.

Mokymo programos integravimas

AR gali būti įtraukta į aplinkos mokslų, biotechnologijų ar mikrobiologijos kursus vidurinėje mokykloje, universitete ar profesiniame mokyme. Veiksmingos pedagoginės strategijos apima:

- Tyrimais grįstas mokymasis: skatina mokinius išbandyti kintamuosius virtualioje bioremediacijos aplinkoje.
- Žaidimais grįstas mokymasis: suteikia motyvacijos per misijas arba problemų sprendimo iššūkius.
- Apverstos klasės: mokiniai prieš pamokas nagrinėja papildytosios realybės modulius ir taiko koncepcijas diskusijų metu.

Šiame kontekste AR privalumai apibendrinti toliau:

Nauda	Aprašymas
Panardinimas	Realistinės, interaktyvios atkūrimo aplinkos simuliacijos
Išlaikymas	Multisensorinis mokymasis gerina supratimą ir atmintį
Prieinamumas	Nešiojamas ir pritaikomas įvairiems skaitmeniniams įrenginiams
Pritaikymas	Modeliavimas gali būti pritaikytas prie vietinių teršalų, ekosistemų ar mikrobus
Bendradarbiavimas	Palaiko komandinį mokymąsi ir bendras AR aplinkas

Ateityje gali būti plėtojamos dirbtinio intelekto valdomos papildytosios realybės (AR) mokymo sistemos, jutikliais integruotos vizualizacijos ir debesijos pagrindu veikiančios AR mokymosi platformos, kurios dar labiau pagerins prieinamumą ir pritaikomumą įvairiose disciplinose ir vietose.





Išvados

Papildytoji realybė yra galinga edukacinė priemonė, padedanti mokytis mikrobų bioremediacijos. Paversdama nematomus biologinius procesus matoma, interaktyvia ir manipuluojama patirtimi, papildytoji realybė padeda besimokantiejiems suvokti sudėtingas aplinkos sąveikas, kurios dažnai nepasiekiamos tradiciniais metodais. Ji leidžia saugiai imituoti realaus pasaulio scenarijus, gerina įsitraukimą per interaktyvų mokymąsi ir padeda įsiminti žinias per erdvinį ir vaizdinį samprotavimą.

Tobulėjant įtraukiančių technologijų sričiai, papildytoji realybė (AR) tampa neatsiejama aplinkosauginio švietimo ir informavimo dalimi, ypač skatinant tvarią praktiką, tarpdisciplininį mokymąsi ir mokslinį smalsumą. Nesvarbu, ar tai būtų klasėje, laboratorijoje, ar viešojoje erdvėje, AR gali ugdyti besimokančiųjų kartą, geriau pasirengusią suprasti taršą ir kovoti su ja taikant biologinius ir ekologinius sprendimus.

Fazė	Aprašymas
Tyrinėjimas	- Iširti, kaip mikrobai valo aplinkos taršą taikydami bioremediaciją ir kaip tai taikoma realiose situacijose.
	- Turinio kūrimas: Kurti edukacinį turinį, susiejantį biologiją, aplinkos mokslą ir su mikrobų valymu susijusias technologijas.
	- Poreikių analizė: nustatyti besimokančiųjų supratimą apie taršą, mikroorganizmus ir ekologinį atkūrimą, siekiant formuoti veiksmingą mokymą.
Taikymas	- Mokymo programos įgyvendinimas: naudojant papildytosios realybės įrankius, pristatyti interaktyvias pamokas apie taršos tipus, mikrobų veikimą ir bioremediacijos mechanizmus.
	- Interaktyvūs pratimai: naudokite papildytosios realybės (AR) programėles (pvz., „Curiscope Virtuali-Tee“, „Merge Cube“), kad imituotumėte užterštą aplinką ir mikrobų aktyvumą.
	- Atsiliepimų rinkimas: registruokite mokinių pastebėjimus ir atsiliepimus apie virtualius valymus ir mikrobų elgesio modeliavimus, kad patobulintumėte mokymosi patirtį.





Gilinimas	- AR integracija: taikykite AR, kad vizualizuotumėte užterštas ekosistemas, mikrobų kolonijas ir jų taršos skaidymo procesus.
	- Interaktyvus mokymasis: leiskite mokiniams išbandyti virtualų mikrobų efektyvumą, įvedant teršalus ir matuojant valymo rezultatus.
	Žaidimo turinys: - Taškai ir ženkleliai Gaukite atlygį už taršos tipų nustatymą, efektyvaus valymo modeliavimą arba mikrobų veikimo optimizavimą. - Lyderių lentelės Įvertinkite rezultatus laiko iššūkiuose valant virtualias užterštas vietas. - Užduotys ir lygiai Atverti vis sudėtingesnius etapus – nuo teršalų nustatymo iki išties atkūrimo ekosistemų valdymo. - Atlygiai už tyrinėjimą: Paslėpkite mikrobų rūšis arba valymo užuominas papildytosios realybės (AR) aplinkoje, kad paskatintumėte gilesnį tyrimą. - Bendradarbiavimo pagrindu sukurtos žaidimo užduotys Komandos dirba kartu, kad spręstų didelio masto papildytosios realybės (AR) pagrindu sukeltas aplinkos katastrofas, naudodamos mikrobų strategijas.
	AR pagrįsti vertinimai: - Įvertinkite supratimą, leisdami mokiniams atlikti taršos valymo misijas naudojant papildytąją realybę (AR) ir pateikiant rezultatus su analize prieš ir po.





Literatūra

- Arici, F. (2024). Papildytosios realybės technologijų veiksmingumo tyrimas gamtos mokslų ugdyme aplinkosauginio raštingumo, savireguliacijos ir motyvacijos mokytis gamtos mokslų požiūriu. Tarptautinis žmogaus ir kompiuterio sąveikos žurnalas, 40(24), 8476–8496. <https://doi.org/10.1080/10447318.2024.2310921>
- Bacca, J., Baldiris, S., Fabregat, R., Graf, S. ir Kinshuk. (2014). Papildytosios realybės tendencijos švietime: sisteminė tyrimų ir taikymų apžvalga. „Educational Technology & Society“, 17(4), 133–149.
- Beck, D. A. C., Pope, R. K. ir McNicholas, P. J. (2022). Nematomas pasaulis atskleistas: papildyta realybė mikrobiologijos mokymui. Žurnalas „Mikrobiologijos ir biologijos mokymas“, 23(1), e00143-21.
- Boopathy, R. (2021). Biologinis oro teršalų valymas: apžvalga. Žurnalas „Aplinkos mokslas ir biotechnologijos apžvalgos“, 20, 457–472. <https://doi.org/10.1007/s11157-021-09555-9>.
- Crawford, R. L. ir Crawford, D. L. (1996). Bioremediacija: principai ir taikymas. Kembridžo universiteto leidykla.
- Deshusses, M. A. (1997). Biologinis nuotekų oro valymas biofiltruose. Biotechnology Progress, 13(3), 239–248.
- Dhaliwal, S.S., Singh, J., Taneja, P.K., Mandal, A., 2020. Išvalymo metodai sunkiųjų metalų šalinimui iš dirvožemio, užteršto iš skirtingų šaltinių: apžvalga. „Environmental Science and Pollution Research“ 27 (2), 1319–1333.
- Dunleavy, M., ir Dede, C. (2014). Papildytosios realybės mokymas ir mokymasis. J. M. Spector ir kt. (red.), Švietimo komunikacijų ir technologijų tyrimų vadovas (p. 735–745). Springer.
- Dunleavy, M., Dede, C. ir Mitchell, R. (2009). Įtraukiančių dalyvaujamųjų papildytosios realybės modeliavimų mokymo ir mokymosi galimybės ir apribojimai. Mokslo, švietimo ir technologijų žurnalas, 18(1), 7–22. <https://doi.org/10.1007/s10956-008-9119-1>
- Fang, C. F. ir Ling, D. L. (2003). Medžių juostų teikiamo triukšmo mažinimo tyrimas. „Landscape and Urban Planning“, 63(4), 187–195.
- Fasani, E., Manara, A., Martini, F., Furini, A., DalCorso, G., 2018. Augalų genetinės inžinerijos potencialas dirvožemio, užteršto sunkiaisiais metalais, valymui. Plant, cell & environment 41 (5), 1201–1232.
- Jungtinių Tautų Maisto ir žemės ūkio organizacija (FAO). (2021). Dirvožemio tarša: paslėpta realybė. Gauta iš: <https://www.fao.org/documents/card/en/c/I9183EN>
- Fredrickson, J. K., Zachara, J. M., Kennedy, D. W. ir kt. (2004). Geobacter metallireducens redukuoja uraną ir skatina jo imobilizaciją. Environmental Science & Technology, 38(7), 2149–2154.
- Gadd, G. M. (2010). Metalai, mineralai ir mikrobai: geomikrobiologija ir bioremediacija. Mikrobiologija, 156(3), 609–643. <https://doi.org/10.1099/mic.0.037143-0>
- Ganiyu, S.O., Sable, S., El-Din, M.G., 2022. Pažangūs oksidacijos procesai ištirpusių organinių medžiagų skaidymui gautame vandenyje: proceso našumo, skaidymo kinetikos ir kelio apžvalga. Cheminės inžinerijos žurnalas 429, p. 132492.





Ghosal, D., Ghosh, S., Dutta, T. K. ir Ahn, Y. (2016). Dabartinė žinių apie policiklinių aromatinių angliavandenilių (PAH) mikrobų skaidymą padėtis: apžvalga. „Frontiers in Microbiology“, 7, 1369. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.01369>

Hartman A (2024). Bioremediacija: gamtos ekologiškai sąmoninga valymo strategija. Adv Genet Eng. 13:282.

Haritash, A. K., ir Kaushik, C. P. (2009). Policiklinių aromatinių angliavandenilių (PAH) biologinio skaidymo aspektai: apžvalga. Pavojingų medžiagų žurnalas, 169(1–3), 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.03.137>.

Herlina.M., Fitriani.A., Lubis.R. (2024). Mikrobiologijos praktinio vadovo, pagrįsto papildytosios realybės technologija, naudojant virusinę medžiagą, kūrimas, DOI: 10.35445/alishlah.v16i4.4952

Knop, E., Zoller, L., Ryser, R. ir kt. (2017). Dirbtinė šviesa naktį kaip nauja grėsmė apdulkinimui. Nature, 548(7666), 206–209.

Kumar, M., ir Gopal, M. (2021). Mikrobinis bioremediacija: tvari aplinkos valymo priemonė. Aplinkos technologijos ir inovacijos, 23, 101693. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101693>.

Li, C., Zhou, K., Qin, W., Tian, C., Qi, M., Yan, X., Han, W., 2019. Dirvožemio užterštumo sunkiaisiais metalais apžvalga: poveikis, šaltiniai ir valymo metodai. Dirvožemio ir nuosėdų užterštumas: tarptautinis žurnalas 28 (4), 380–394.

Liang, Y., Jiao, S., Wang, M., Yu, H., Shen, Z., 2020. CRISPR/Cas9 pagrindu sukurta genomo redagavimo sistema Rhodococcus ruber TH. Metabolinė inžinerija 57, 13–22.

Logan, B. E., Hamelers, B., Rozendal, R. ir kt. (2006). Mikrobiniai kuro elementai: metodologija ir technologija. „Environmental Science & Technology“, 40(17), 5181–5192.

Martínez-García, M., Andrés, M. A. ir Andreu, A. (2020). Nematomo vizualizavimas: kaip pasitelkti įtraukiasias technologijas aplinkosaugos priežiūrai skatinti. „Frontiers in Environmental Science“, 8, 23.

Meckenstock, R. U., Elsner, M., Griebl, C. ir kt. (2015). Biologinis skaidymas: mikrobų valymo užterštuose vandeninguosiuose sluoksniuose kontrolės koncepcijų atnaujinimas. „Environmental Science & Technology“, 49(12), 7073–7081.

Plewniak, F., Crognale, S., Rossetti, S., Bertin, P.N., 2018. Genominis požiūris į bioremediaciją: arseno šalinimo atvejis. „Frontiers in microbiology“ 9, p. 820.

Pointing, S. B. (2001). Baltojo puvinio grybų atliekamo bioremediacijos įgyvendinamumas. Taikomosios mikrobiologijos ir biotechnologijos žurnalas, 57(1–2), 20–33. <https://doi.org/10.1007/s002530100754>

Priya, A. K., Nagan, S., 2015. Sunkiųjų metalų valymas iš galvanizavimo nuotekų naudojant bakterijų padermes imobilizuotame kolonėlės reaktoriuje su aukštyn srautu. „Journal of Gynyoti ir taikomoji mikrobiologija“ 9 (2), 1411–1416.

Rhea, L.K., Clark, C., 2022. Didelių praskiestų chloretilenų ir 1,4-dioksano srautų valdymas stebint natūralų silpnėjimą (MNA) ir MNA didinimą. Žurnalas „Remediation Journal“.

Sharma, P., Bano.A., Pratap Singh.S., Kishore Dubey.N., Chandra.R., Iqbal.H.M.N.(2022) Naujausi pasiekimai taikant mikrobų pagalba atliekamas toksiškų teršalų valymo strategijas.





Sharma, P., Kumar, S., 2021f. Sunkiųjų metalų bioremediacija iš pramoninių nuotekų endofitais ir jų metabolinis aktyvumas: naujausi pasiekimai. *Bioresource Technology* 339, 125589.

Sharma, P., Kumar, S., Pandey, A., 2021g. Bioremediaciniai metalų teršalų valymo metodai naudojant metagenomikos metodus: apžvalga. „*Journal of Environmental Chemical Engineering*“ 9 (4), p. 105684.

Singh, R. ir Strong, P. J. (2022). Bioremediacija: dabartiniai taikymai ir kylančios tendencijos. „*Frontiers in Microbiology*“, 13, 872–95. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.872695>.

Singh, J. ir Chandra, R. (2019). Taršos kontrolės biotechnologijos. „*Environmental Chemistry Letters*“, 17, 1335–1355. <https://doi.org/10.1007/s10311-019-00865-6>

Jungtinių Tautų aplinkos programa (UNEP, 2021), Maisto ir žemės ūkio organizacija (FAO, 2021), JAV Aplinkos apsaugos agentūra (EPA, 2023)

Jungtinių Tautų aplinkos programa (UNEP, 2021). Vandens tarša. Gauta iš: <https://www.unep.org/explore-topics/water/what-we-do/addressing-water-pollution>

JAV Aplinkos apsaugos agentūra (EPA). (2023). Bioreaktoriai ir biofiltrai oro taršai kontroliuoti. Gauta iš: <https://www.epa.gov/air-research/bioreactors-and-biofilters-air-pollution-control>

Varjani, S. J. (2017). Naftos angliavandenilių mikrobu skaidymas. *Bioresource Technology*, 223, 277–286. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.10.037>

Vidali, M. (2001). Bioremediacija. Apžvalga. *Grynoji ir taikomoji chemija*, 73(7), 1163–1172.

Vymazal, J. (2011). Dirbtinės šlapynės nuotekų valymui: penkių dešimtmečių patirtis. *Aplinkos mokslas ir technologijos*, 45(1), 61–69.

Zeyaulah, M. ir kt. (2023). Bioremediacijos metodų pažanga: naujausi pokyčiai ir ateities perspektyvos. *Aplinkos mokslas ir taršos tyrimai*. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-27790-z>.

https://lt.wikipedia.org/wiki/Archaea?utm_source=chatgpt.com

https://www.britannica.com/science/microbiology/Types-of-microorganisms?utm_source=chatgpt.com

preprints.org

pmc.ncbi.nlm.nih.gov

nature.com

https://gosharpener.com/blogs/710991/Environmental-Pollution?lang=de_de





<https://www.who.int/health-topics/air-pollution>

<https://www.unep.org/explore-topics/water/what-we-do/addressing-water-pollution>

<https://www.fao.org/documents/card/en/c/I9183EN>

<https://www.who.int/europe/publications/i/item/9789289053563>

<https://www.darksky.org/light-pollution/>

<https://www.epa.gov/nps/nonpoint-source-urban-areas>

<https://www.iaea.org/topics/radioactive-contamination>

[pmc.ncbi.nlm.nih.govfrontiersin.org](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/frontiersin.org)

[It.wikipedia.org](https://it.wikipedia.org)

<https://editverse.com/bioremediation-using-nature-to-clean-up-pollution/>

wired.comtos.org+1wired.com+1

timesofindia.indiatimes.com

reuters.com+1bassconnections.duke.edu+1

pubs.rsc.org

mdpi.comresearchgate.net

pollution.sustainability-directory.com

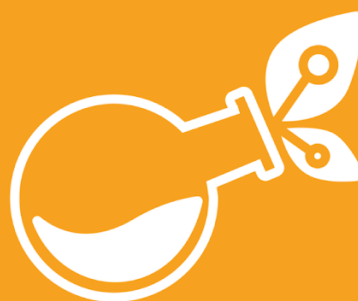
prism.sustainability-directory.com

ejmste.comacademic.oup.com





Co-funded by
the European Union



BIOS4YOU AR 2.0

BIO-INSPIRED STEM TOPICS FOR ENGAGING YOUNG GENERATIONS
THANKS TO THE USE OF AUGMENTED REALITY



Project Number: KA220-BW-23-30-126516

Funded by the European Union. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Education and Culture Executive Agency (EACEA). Neither the European Union nor EACEA can be held responsible for them.