

TVARIOS INŽINERINĖS MEDŽIAGOS: IŠŠŪKIAI IR ATEITIES KRYPTYS XXI AMŽIUJE

Edvinas Giedgaudas, Jonas Veliulis, lekt. Zita Sluckuvienė

Šiaulių valstybinė kolegija, Aušros al. 40, Šiauliai

Anotacija. Straipsnyje nagrinėjamos pažangių inžinerinių medžiagų vystymosi kryptys XXI amžiuje, atsižvelgiant į technologinius bei tvarumo iššūkius. Aptariamos nanostruktūrinės, kompozitinės ir biologiškai suyrančios medžiagos, jų taikymas ir perdirbavimo problemos. Analizuojamas „Žaliojo kurso“ poveikis medžiagų raidai bei galimi sprendimai klimato kaitos kontekste.

Pagrindiniai žodžiai: tvarios medžiagos, savaime atsinaujinantis betonas, kompozitai, nanostruktūrinės medžiagos, ekologiškas projektavimas.

Įvadas

Inžinerinės medžiagos – tai vienas kertinių technologinės pažangos komponentų, lemiančių produktų kokybę, ilgaamžiškumą ir aplinkosauginį poveikį. XXI amžiuje inžinerinių medžiagų vystymasis įgauna ypatingą reikšmę ne tik dėl augančių techninių reikalavimų, bet ir dėl globalių iššūkių – klimato kaitos, išteklių stygiaus, taršos bei žiedinės ekonomikos siekio.

Tyrimo aktualumas. Technologijos, paremtos naujos kartos medžiagomis, tampa būtinos tiek pramonei, tiek energetikai, transportui, medicinai ir kitiems sektoriams. Be to, Europos Sąjungos „Žaliojo kursas“ kelia griežtus reikalavimus aplinkai draugiškam projektavimui ir medžiagų perdirbimui, o tai dar labiau skatina naujų sprendimų paiešką.

Tyrimo objektas – medžiagų tvarumas.

Tyrimo tikslas - išanalizuoti inžinerinių medžiagų vystymo tendencijas XXI amžiuje, įvertinant tvaraus panaudojimo perspektyvas.

Apžvelgti pagrindines inžinerinių medžiagų grupes ir jų savybes;

1. Įvertinti pažangių medžiagų taikymą įvairiose pramonės srityse;
2. Išanalizuoti medžiagų gyvavimo ciklo ir perdirbimo iššūkius;
3. Aptarti ES „Žaliojo kurso“ reikalavimus ir poveikį medžiagų inžinerijai;
4. Pateikti galimas ateities vystymosi kryptis medžiagų srityje atsižvelgiant į klimato kaitą.

Tyrimo metodai: mokslinės literatūros analizė, lyginimas, apibendrinimas.

1. Inžinerinių medžiagų grupės ir jų savybės

Inžinerinės medžiagos skirstomos į keturias pagrindines grupes: metalus ir jų lydinis, keramiką, polimerus bei kompozitus. Kiekviena jų pasižymi savitomis fizikinėmis, cheminėmis ir mechaninėmis savybėmis, kurios lemia taikymo galimybes įvairiose inžinerijos srityse (1 lentelė).

Metalai (pvz., plienas, aliuminis, varis) plačiai naudojami dėl savo stiprumo, elastingumo, šiluminio ir elektrinio laidumo. Jie dažniausiai taikomi konstrukcijose, transporto priemonėse, elektros sistemose. Lydiniai, tokie kaip titano ar nikelio pagrindo junginiai, pasižymi padidintu atsparumu korozijai bei aukštomis temperatūroms (Huang, Feng ir Chen, 2021).

Keramika yra kieta, atspari dilimui, cheminiam poveikiui ir aukštai temperatūrai, tačiau trapi. Dėl šių savybių keramika taikoma terminiuose barjeruose, medicinos implantuose, elektronikoje. Šiuolaikinė pažangi keramika gali būti net elektrai laidžioji.

Polimerai – tai organinės kilmės medžiagos, pasižyminčios lengvumu, atsparumu korozijai ir formavimo lankstumu. Jie plačiai taikomi pakuotėse, automobiliuose, tekstilėje ir elektrotechnikos komponentuose. Naujos kartos biopolimerai ir perdirbami plastikai yra svarbūs tvarumo kontekste.

Kompozitai – tai daugiasluoksnės arba daugiafazės medžiagos, kuriose derinamos dviejų ar daugiau komponentų savybės (pvz.: anglies pluoštas + epoksidinė derva). Jie gali būti itin stiprūs ir lengvi, todėl naudojami aviacijoje, sporte, automobilių bei statybos sektoriuose. Kompozitų trūkumas – sudėtingas perdirbimas, dėl kurio reikia ieškoti naujų sudėtinių struktūrų ar biokilmių alternatyvų (Ashrith, Jeevan ir Xu, 2023).

Šalia tradicinių grupių vis sparčiau vystomos nanostruktūrinės, išmaniosios ir biologiškai suyrančios medžiagos, kurios pasižymi išskirtinėmis reakcijomis į aplinką, gebėjimu savarankiškai

atsinaujinti ar skaidytis aplinkoje. Medžiagos parinkimas inžineriniams tikslams priklauso nuo daugelio veiksnių – mechaninio stiprumo, atsparumo aplinkai, svorio, kainos, ilgaamžiškumo ir, vis dažniau, perdirbamumo bei ekologinio poveikio. Todėl šių grupių savybių pažinimas tampa būtinu pagrindu tvarių technologinių sprendimų kūrimui (Callister ir Rethwisch, 2018).

1 lentelė. Pagrindinių inžinerinių medžiagų grupių savybių palyginimas (Wendt, 2021)

Medžiagų grupė	Tankis (g/cm ³)	Tamprumo modulis (GPa)	Tempimo stipris (MPa)	Atsparumas korozijai	Šiluminis laidumas (W/m·K)	Perdirbamumas	Taikymo sritys
Metalai	7,8 (plienas), 2,7 (aliuminis)	70–210	200–1500	Vidutinis–aukštas	20–400	Geras	Statyba, transportas, energetika
Keramika	2-6	100–400	100–1000	Aukštas	2–50	Ribotas	Elektronika, medicina, šilumos izoliacija
Polimerai	0,9-2	0,1–4	20–100	Aukštas	0,1–0,5	Geras	Pakuotės, buitinė technika, automobilių dalys
Kompozitai	1,5-6	10–150	100–1200	Vidutinis–aukštas	Kintamas	Kintamas (priklauso nuo sudėties)	Aviacija, sportas, automobilių pramonė

2. Pažangių medžiagų taikymas įvairiose pramonės srityse

Pažangių inžinerinių medžiagų plėtra ir taikymas tampa esminiu veiksnium kuriant aukštos pridėtinės vertės technologinius sprendimus įvairiuose sektoriuose. Pramonė vis dažniau reikalauja ne tik stiprių ir ilgaamžių, bet ir lengvų, tvarių, išmanių ar funkcinių medžiagų, gebančių reaguoti į aplinkos veiksnius ar mažinti energijos sąnaudas (2 lentelė).

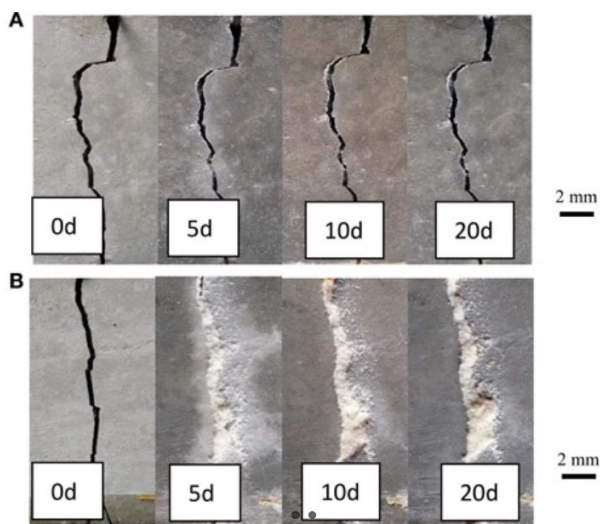
2 lentelė. Pažangių medžiagų taikymas įvairiose pramonės srityse (Verma V. ir Verma S. 2024)

Pramonės sritis	Naudojamos pažangiosios medžiagos	Pagrindinės savybės ir privalumai	Taikymo pavyzdžiai
Transportas	Anglies pluošto kompozitai, pažangūs aliuminio lydiniai	Lengvumas, stiprumas, degalų sąnaudų mažinimas	Lengvos automobilių ir lėktuvų konstrukcijos
Statyba	Savaime atsistatantis betonas, termoizoliaciniai aerogeliai	Ilgaamžiškumas, energijos efektyvumas, tvarumas	Energiją taupantys pastatai, ilgaamžės konstrukcijos
Energetika	Superlaidininkai, perovskitiniai saulės elementai	Aukštas efektyvumas, atsparumas ekstremalioms sąlygoms	Efektyvūs elektros tinklai, aukštatemperatūrinės jėgainės
Medicina	Biologiškai suderinami polimerai, nanostruktūrinės dangos	Geresnė integracija su audiniais, sumažinta atmetimo rizika	Implantai, audinių inžinerija, vaistų išlaisvinimo sistemos
Elektronika	Grafasas, nanovamzdeliai, pažangūs puslaidininkiai	Mažas dydis, didelis laidumas, greitesnis signalų perdavimas	Greitesni ir efektyvesni prietaisai, sensoriai, duomenų saugojimo sistemos

2.1. Pažangių medžiagų taikymo pavyzdys - savaime atsinaujinantis betonas

Vienas pagrindinių betoninių konstrukcijų trūkumų yra įtrūkimai, kurie leidžia drėgmei prasiskverbti į vidų, sukeldami armatūros koroziją ir silpnindami statinius. Sprendžiant šią problemą, buvo sukurta naujoviška medžiaga – savaime atsinaujinantis betonas, galintis pats užtaisyti smulkius plyšius.

2006 m. olandų mokslininkas Henkas Jonkersas pristatė technologiją, pagrįstą specialiomis bakterijomis, kurios, patekusioms į plyšius, išskiria kalcio karbonatą ir taip juos užtaiso. Siekiant padidinti bakterijų gyvybingumą betone, jos kapsuliuojamos kartu su maisto medžiagomis. Šis metodas leidžia užtaisyti iki 1 mm pločio plyšius, tačiau kapsuliavimo technologija yra brangi. Plačiau taikoma alternatyva yra kristaliniai priedai. Į betoną įmaišius apie 1 % šių priedų (pagal cemento masę), jis geba savaime užtaisyti iki 0,4 mm pločio plyšius, todėl ši technologija dėl paprastesnio taikymo ir mažesnių sąnaudų yra plačiau naudojama (1 pav.) (Amran ir kt., 2022).



1 pav. Savaime atsinaujinančio betono pavyzdys (Amran ir kt., 2022).

2.2. Pažangių medžiagų taikymo pavyzdys – anglies pluošto kompozitai

Vienas pažangiausių šiuolaikinėje statyboje taikomų sprendimų – anglies pluošto armavimo kompozitai, kurie vis plačiau naudojami esamų gelžbetoninių konstrukcijų stiprinimui ir atnaujinimui. Šios medžiagos pasižymi itin dideliu stipriu tempiant, mažu tankiu bei atsparumu korozijai, todėl leidžia efektyviai sustiprinti konstrukcijas jų nenaikinant. Dažniausiai anglies pluošto kompozitai montuojami klijuojant juostas prie paviršiaus arba apvyniojant elementus, naudojant epoksidines dervas. Tyrimai rodo, kad tinkamai pritaikyti CFRP gali padidinti lenkiamąjį stiprį iki 50 % ir sumažinti plyšių plotį net kelis kartus (Hegde, Shenoy ir Chethan, 2019).



2 pav. Anglies pluošto kompozitų pavyzdys (Rajak, Pagar, Menezes ir Linul, 2019)

Naujausi tyrimai pabrėžia CFRP stiprinimo efektyvumo priklausomybę nuo įvairių veiksnių. Pavyzdžiui, Mashhadi ir kt. (2023) nustatė, kad CFRP juostų ilgis ir plotis, taip pat U formos inkarų naudojimas, reikšmingai veikia betono sijų lenkiamąjį stiprį ir energijos sugėrimą. Be to, Wang ir kt. (2023) analizavo CFRP stiprinimo efektyvumą esant skirtingoms temperatūroms, nustatydami, kad aukštesnės temperatūros gali sumažinti CFRP ir betono sąsajos stiprumą.

Dėl savo savybių šie kompozitai ypač tinka kultūrinio paveldo objektų restauracijai, tiltų, viadukų ar inžinerinių tinklų modernizavimui, kur svarbu išlaikyti konstrukcijos geometriją ir ilgaamžiškumą. Ši technologija skirta didelio eksploatacinio amžiaus statiniams atnaujinti, kartu išvengiant brangaus griovimo ar visiško perstatymo poreikio (Rajak, Pagar, Menezes ir Linul, 2019).

3. Medžiagų gyvavimo ciklai ir perdirbimo iššūkiai

Medžiagų gyvavimo ciklas yra esminis veiksnys vertinant jų poveikį aplinkai ir tvarumo potencialą. Ji apima 5 etapus: žaliavų išgavimas, gamyba, naudojimas, atliekos, perdirbimas/šalinimas. Statybos sektoriuje, kuris generuoja daugiau nei 30 % visų atliekų Europos Sąjungoje, ypač svarbu vertinti medžiagų pasirinkimą ne tik pagal mechanines savybes, bet ir pagal tai, kaip jos veikia per visą eksploatacijos trukmę – nuo žaliavų gavybos iki galutinio utilizavimo (Pomponi & Moncaster, 2017).

Nepaisant augančio poreikio perdirbti medžiagas ir mažinti aplinkos taršą, medžiagų perdirbamumas vis dar susiduria su reikšmingais iššūkiais. Vienas svarbiausių – medžiagų sudėtingumas, ypač daugiassluoksnių ar kompozitinių sistemų atveju. Tokios medžiagos, kaip anglies pluošto kompozitai ar termoizoliacinės daugiassluoksnės plokštės, sudarytos iš kelių skirtingų komponentų, dažnai neturi ekonomiškai pagrįstų atskyrimo technologijų (Pickering, Efendy ir Leeke, 2016). Užterštumas, pavyzdžiui, cheminės liekanos, klijai ar sunkieji metalai, taip pat riboja antrinę panaudojimą, ypač kai kalbama apie statybines ar elektronikos atliekas (Johansson et al., 2021). Trečias veiksnys – savybių praradimas: daugelis polimerinių medžiagų, ypač plastikai, po perdirbimo praranda dalį mechaninių ar termoizoliacinių savybių, todėl tampa mažiau tinkami pakartotiniam naudojimui aukštesnės kokybės gaminiuose (Zhang ir kt., 2023). Prie šių techninių apribojimų prisideda ir trūkstanti perdirbimo infrastruktūra, ypač regionuose, kuriuose nėra išplėtos surinkimo ir rūšiavimo sistemos. Galiausiai, didelės perdirbimo sąnaudos – tiek energijos, tiek darbo jėgos prasme – dažnai daro pirminę žaliavą ekonomiškai patrauklesne nei antrinę, taip stabdydamos perdirbtų medžiagų rinkos plėtrą. Šių iššūkių sprendimui reikalingos ne tik technologinės inovacijos, bet ir politiniai bei ekonominiai instrumentai, skatinantys ciklinės ekonomikos įgyvendinimą praktikoje.

4. XXI amžiaus iššūkiai: „Žaliojo kurso“ reikalavimai ir poveikis medžiagų inžinerijai

Sparčiai progresuojant inžinerinių medžiagų mokslui, vis ryškiau iškyla būtinybė derinti technologinę pažangą su aplinkosauginiais ir socialiniais tikslais. Europos Sąjungos „Žaliojo kursas“ (angl. *European Green Deal*) numato žaliavų vartojimo optimizavimą, perdirbamumą, atliekų mažinimą ir klimato kaitos švelninimą – tai reiškia tiesioginius reikalavimus tiek medžiagų kūrėjams, tiek jų taikytojams. Europos Sąjungos „Žaliojo kursas“ numato esminius pokyčius medžiagų ir gamybos srityje – siekiama iki 2050 m. pereiti prie klimato neutralios ekonomikos, kurioje svarbus vaidmuo tenka tvariai žaliavų grandinei, ekologiškam projektavimui ir efektyviam atliekų tvarkymui (Europos Komisija, 2019) (3 pav.).

4.1. ES žaliosios politikos įtaka inžinerinių medžiagų plėtrai

„Žaliojo kurso“ įgyvendinimui ES taiko įvairius teisės aktus, tiesiogiai susijusius su medžiagų gyvavimo ciklu, pavyzdžiui:

- Atliekų pagrindų direktyva (2008/98/EB), kuria įtvirtinami atliekų prevencijos, perdirbimo ir pakartotinio naudojimo principai;
- Elektros ir elektroninės įrangos atliekų direktyva (2012/19/ES, WEEE), reglamentuojanti komponentų, ypač sudėtingų medžiagų, tvarkymą;

- Baterijų reglamentas (2023/1542/ES), kuriame nustatyti griežti reikalavimai baterijų sudėčiai, ženklavimui, antriniam naudojimui ir perdirbamumui.

Šie reikalavimai tiesiogiai veikia medžiagų inžineriją – tiek projektavimo etape, tiek produkto gyvavimo pabaigoje. Kuriant naujas medžiagas, būtina atsižvelgti į jų perdirbamumą, t.y. medžiagos sudėties paprastumą, komponentų atskyrimo galimybes, gyvavimo ciklo poveikį aplinkai (nuo žaliavų išgavimo iki atliekų utilizavimo) bei anglies dioksido emisijų pėdsaką, ypač metalų, polimerų, retųjų elementų atveju.

Be to, ES skatina taikyti ekologiško projektavimo principus (eco-design), kai medžiagos ir produktai kuriami taip, kad būtų ilgalaikiai, lengvai pataisomi ir pakartotinai naudojami. Tai reiškia, kad inžinieriai turi ne tik siekti techninio efektyvumo, bet ir numatyti aplinkosauginį poveikį bei perdirbimo galimybes dar projektavimo stadijoje.



3 pav. Europos „žaliojo kurso“ žymėjimas (pagal Europos komisiją)

4.2. „Žaliojo kurso“ ir žiedinės ekonomikos sąsaja

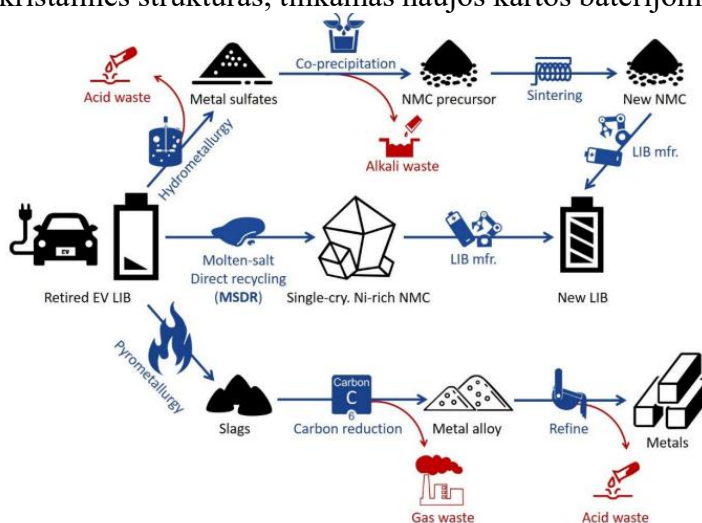
„Žaliasis kursas“ taip pat skatina pereiti nuo tradicinės linijinės ekonomikos prie žiedinės ekonomikos, kur medžiagų naudojimo ciklas uždaromas – žaliavos tampa ištekliais naujiems produktams. Ši paradigma verčia iš esmės permąstyti medžiagų pasirinkimą, jų sudėtingumą ir integravimą į sistemas, kur tvarumas tampa ne galimybe, o būtinybe (Andersen, Shan, Bruckner, Černý, Hidiroglu ir Hubacek, 2024).

Viena iš opiausių problemų – medžiagų gyvavimo ciklo valdymas. Medžiagos, pasižyminčios puikiomis eksploatacinėmis savybėmis, dažnai būna sunkiai perdirbamos, ypač kai naudojami kompleksiniai kompozitai ar retieji elementai. Pavyzdžiui, elektromobilių baterijose naudojamos medžiagos, tokios kaip ličio, kobalto ar nikelio junginiai, kelia perdirbimo sudėtingumo, pavojingų atliekų bei išteklių išsekimo klausimų, o jau esamos technologijos dar nėra pajėgios užtikrinti efektyvaus žaliavų atgavimo masto (Thormann, Neuling ir Kaltschmitt, 2021). Tačiau paskutiniu metu vis daugėja tyrimų įrodančių galimybę tvariai atnaujinti ir perdirbti žemos nikelio koncentracijos katodus į aukštos kokybės kristalines baterijų medžiagas, taip reikšmingai prisidedant prie žiedinės ekonomikos tikslų (4 pav., 5 pav.).



4 pav. Žiedinė ekonomika (pagal Europos Parlamento tyrimų tarnybą)

Penktame paveiksle schematiškai pavaizduota uždaro ciklo perdirbimo sistema, kuri leidžia naudotas elektromobilių baterijų katodines medžiagas (NMC) ne tik perdirbti, bet ir atnaujinti į aukštesnės kokybės vienkristalines struktūras, tinkamas naujos kartos baterijoms. (Qian et al., 2021).



5 pav. Uždaro ciklo žemos nikelio koncentracijos baterijų katodų perdirbimo schema (Qian ir kt., 2021)

Tokio pobūdžio taikomas lydytų druskų regeneravimo metodas užtikrina mažesnes energijos sąnaudas, leidžia išvengti taršių cheminių procesų bei gali išlaikyti ir pagerinti baterijų elektrochemines savybes. Žiedinės ekonomikos požiūriu šis metodas leidžia neutilizuoti, bet transformuoti baterijos komponentus į geresnius nei pradiniai, taip uždarant medžiagų ciklą. Taip pat atsižvelgiama į pagrindinius žiedinės ekonomikos principus: ilgaamžiškumas, pakartotinis naudojimas, aukštesnės vertės atkūrimas.

5. Inžinerinių medžiagų vystymasis ir klimato kaita

Klimato kaita vis labiau veikia inžinerinių medžiagų plėtrą, skatindama kurti tvaresnius, atsparesnius ir aplinkai draugiškesnius sprendimus. Naujausi moksliniai tyrimai leidžia išskirti pagrindines tendencijas, parodančias, kaip klimato pokyčiai daro įtaką šių medžiagų patvarumui (3 lentelė).

3 lentelė. Klimato kaitos padariniai metalui ir betonui bei taikomi sprendimo būdai

Inžinerinės medžiagos	Klimato kaitos padariniai	Taikomi sprendimo būdai
Metalas	Dėl padidėjusios temperatūros, drėgmės ir atmosferos teršalų koncentracijos spartėja korozija, o tai kelia grėsmę infrastruktūros ilgaamžiškumui ir didina anglies dioksido	Galvanizacija (3 pav.) - Naudojamos apsauginės dangos, tokios kaip cinko danga, kurios efektyviai apsaugo metalus nuo

	(CO₂) emisijas (European Commission Joint Research Centre, 2020). Aukštesnė temperatūra ir didesnė santykinė drėgmė skatina korozijos greitį, ypač pakrančių ir jūrinėse zonose. Pavyzdžiui, Australijoje atliktas tyrimas parodė, kad iki 2100 metų Brisbene korozijos greitis gali padidėti apie 14% dėl klimato pokyčių (Nguyen, Wang, Leicester, 2013).	korozijos. Tyrimai rodo, kad cinko dangos gali sumažinti korozijos greitį iki 14%; • Aliuminio dangos. Aliuminis gerai atspindi šilumą ir šviesą, ilgaamžis, naudojamas architektūroje ir jūriniuose objektuose; • Nikelio dangos. Šios dangis naudojamas, kai reikia geros išvaizdos (blizgesio) ir atsparumo dilimui. (Yu, Hu ir Meng, 2020). 2. Organinės bei neorganinės dangos • Organinės a. Dažai (epoksidiniai, poliuretaniniai, akriliniai) sukuria fizinį barjerą, neleidžia drėgmei ar deguoniui pasiekti metalo paviršiaus (Diniz, De Andrade, Martins ir De Azevedo, 2013); b. Bituminės dangos - apsauginės dangos, pagamintos iš bitumo (juoda, lipni medžiaga, gaunama iš naftos). Naudojamos vamzdynų ar požeminių /konstrukcijų apsaugai (Guma, Madakson, Yawas ir Aku, 2015); c. Plastikinės dangos (PVC, PE) taikomos kabeliams, vamzdžiams ir kitiems daiktams, kuriems reikalinga izoliacija nuo korozijos ir cheminių medžiagų (Zhang, Li ir Wang, 2021). • Neorganinės a. Zn-Al ar Zn-Mg dangos: geresnė apsauga nei vien cinkas, naudojamos statybų sektoriuje (Yu, Hu ir Meng, 2020).
Keramika	Keramikos gamybai reikalinga didelė šiluminė energija: apie 940 kWh energijos vienai tonai plytelių ir iki 5830 kWh/t sudėtingiems gaminiams. Degimo proceso metu į aplinką išmetama iki 80% visų pramonės šiltnamio efektą sukeliančių dujų (Myungbeen, 2024). Remiantis El-Mahdy (2022) tyrimu, klimato kaitos sukelti ekstremalūs reiškiniai (sausros, potvyniai) paveikia molio ir kaolino telkinius, lemia tiekimo sutrikimus bei gamybos kaštų didėjimą.	Tradiciškai keramika degama krosnyse, kurios naudoja iškastinį kurą, pavyzdžiui, gamtines dujas arba anglį. Degant šiam kurui išsiskiria daug CO₂. Jei būtų pradėtos naudoti elektrinės krosnys, kurios veikia elektra, ir ta elektra gaunama iš atsinaujinančių šaltinių (saulės, vėjo, hidroenergijos), iškastinio kuro deginimas tampa nebūtinasis. Keramikos pramonė, įtraukdama atliekų perdirbimą į gamybos ciklą, pereina prie žiedinės ekonomikos, kurioje atliekos tampa vertinga žaliava. Tai ne tik naudinga aplinkai, bet ir stiprina pramonės tvarumą bei ilgaamžiškumą. Perdirbtų atliekų panaudojimas gali būti pigesnis nei naujo molio kasimas, transportavimas ir paruošimas. Mažesnės žaliavų kainos gali padaryti keramikos gaminius konkurencingesnius rinkoje. (Hernández García, Monteiro, ir Lopera, 2024).

Polimerai	Tradicinių polimerų gamyba, ypač iš iškastinio kuro, prisideda prie šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisijų. Net kai kurie bioplastikai, gaminami iš augalinių šaltinių, dažnai turi panašią cheminę sandarą kaip ir iškastiniai plastikai, todėl jų perdirbimas ir skaidymas kelia problemas. (Rosenboom, Langer, Traverso, 2022).	Fermentinis skaidymas: Mokslininkai inžineriniu būdu sukūrė fermentus, tokius kaip PETazė ir MHETazė, kurie gali efektyviai skaidyti PET plastiką į jo monomerus, leidžiant jį perdirbti į naują plastiką. (Tournier, Topham, Gilles ir kt., 2020). Sukurtos specialios plastiko priedų technologijos, kurios leidžia įprastiems plastikams greitai ir natūraliai suirti aplinkoje. Šios technologijos leidžia plastikams skaidytis nesusidarant mikroplastikui, kuris kelia grėsmę ekosistemoms. Tokie priedai: mangano, geležies, kobalto arba nikelio stearatai, keičia polimero cheminę struktūrą, paskatindami plastiko biocheminį skaidymą esant aplinkos sąlygoms – šviesai, drėgmei, mikroorganizmams. (Rajendran, S., et al., 2021).
Kompozitai	Klimato kaita lemia ekstremalesnes aplinkos sąlygas, tokias kaip didesni temperatūros svyravimai, padidėjusi drėgmė ir UV spinduliuotė. Šie veiksniai gali pagreitinėti kompozitinių medžiagų, ypač polimerinių kompozitų, senėjimą ir irimą. Tyrimai rodo, kad tokiomis sąlygomis kompozitai gali prarasti mechanines savybes, atsparumą ir ilgaamžiškumą, ypač šaltuose klimatuose, kur dažni užšalimo-atšilimo ciklai. (Sapuan, Ishak, Mustapha, Maleque, 2020). Dauguma tradicinių kompozitinių medžiagų, ypač sustiprintų anglies pluoštu, yra sunkiai perdirbamos dėl jų termoreaktyvių matricų. Klimato kaitos kontekste didėja spaudimas kurti tvarius perdirbimo metodus, tačiau šioje srityje vis dar kyla technologinių ir ekonominių kliūčių. Naujausi tyrimai pabrėžia būtinybę integruoti kompozitų pramonę į žiedinę ekonomiką, siekiant sumažinti aplinkos poveikį ir išteklių naudojimą (Pickering, Howard, Scarpa, Soutis, 2023).	UV stabilizatorių naudojimas: Integruojant UV stabilizatorius į kompozitų sudėtį, galima sumažinti UV spinduliuotės sukeltą degradaciją. Terminių stabilizatorių integravimas: Įtraukiant terminius stabilizatorius į kompozitų sudėtį, galima pagerinti jų atsparumą temperatūros svyravimams ir sumažinti termiškai sukeltą degradaciją. Drėgmės barjerų įdiegimas: Naudojant drėgmės barjerus arba hidrofobines dangas, galima sumažinti drėgmės įsiskverbimą į kompozitus, taip išvengiant drėgmės sukeltos žalos. Nanoceliuliozės naudojimas: Tyrimai rodo, kad nanoceliuliozės pridėjimas prie polimerinių kompozitų gali pagerinti jų mechanines savybes ir atsparumą senėjimui. Paviršiaus modifikavimas: Paviršiaus modifikavimo metodai, tokie kaip plazmos apdorojimas ar cheminės modifikacijos, gali pagerinti kompozitų atsparumą aplinkos poveikiui (Sapuan, Ishak, Mustapha, Maleque, 2020; M. A. El-Sayed, A. A. El-Sayed, M. M. El-Sayed (2021)).

IŠVADOS

1. Pagrindinės inžinerinių medžiagų grupės – metalai, keramika, polimerai ir kompozitai – pasižymi skirtingomis savybėmis, lemiančiomis jų taikymą. Vis svarbesnį vaidmenį įgauna pažangios ir tvarios medžiagos, kurios leidžia kurti efektyvius bei aplinkai palankius inžinerinius sprendimus.
2. Pažangių medžiagų taikymas – nuo savaimės atsinaujinančio betono iki anglies pluošto kompozitų – leidžia kurti tvaresnius, ilgaamžius ir funkcionalius sprendimus įvairiose pramonės šakose.

3. Medžiagų perdirbimą riboja tokie veiksniai kaip cheminė sudėtis, užterštumas, savybių praradimas bei infrastruktūros ir ekonominių priemonių trūkumas, todėl būtina skatinti inovacijas visame gyvavimo cikle.
4. „Žaliojo kurso“ keliamas tikslas pasiekti klimatui neutralią ekonomiką skatina medžiagų inžineriją orientuoti į tvarumą, ilgaamžiškumą ir perdirbamumą. Šie reikalavimai keičia medžiagų parinkimo kriterijus ir visą kūrimo procesą.
5. Ateities medžiagų inžinerija turės derinti technologinį efektyvumą su tvarumu – siekiant kurti perdirbamas, mažą anglies pėdsaką paliekančias medžiagas. Klimato kaitos akivaizdoje būtinas tarpdisciplininis požiūris ir žiedinės ekonomikos principų integravimas nuo pat projektavimo etapo.

Informacijos šaltinių sąrašas

1. Amran, M., Onaizi, A. M., Fediuk, R., Vatin, N. I., Muhammad Rashid, R. S., Abdelgader, H., & Ozbakkaloglu, T. (2022). Self-healing concrete as a prospective construction material: a review. *Materials*, 15(9), 3214. <https://www.mdpi.com/1996-1944/15/9/3214>
2. Andersen, E. V., Shan, Y., Bruckner, B., Černý, M., Hidiröglü, K., & Hubacek, K. (2024). The vulnerability of shifting towards a greener world: The impact of the EU's green transition on material demand. *Sustainable Horizons*, 10, 100087. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S277273782300041X>
3. Ashrith, H. S., Jeevan, T. P., & Xu, J. (2023). A review on the fabrication and mechanical characterization of fibrous composites for engineering applications. *Journal of Composites Science*, 7(6), 252. <https://doi.org/10.3390/jcs7060252>
4. Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2018). *Materials Science and Engineering: An Introduction* (10th ed.). Wiley. <https://www.wiley.com/en-us/Materials+Science+and+Engineering%3A+An+Introduction%2C+10th+Edition-p-9781119405498>
5. Diniz, F. B., De Andrade, G. F., Martins, C. R., & De Azevedo, W. M. (2013). A comparative study of epoxy and polyurethane based coatings containing polyaniline-DBSA pigments for corrosion protection on mild steel. *Progress in Organic Coatings*. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2013.02.010>
6. Europos Komisija. (2019). Europos žaliasis kursas. Prieiga per internetą 2025-04-15: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_lt
7. Guma, T. N., Madakson, P. B., Yawas, D. S., & Aku, S. Y. (2015). Modification of bituminous coatings to prevent stress corrosion cracking of carbon steel. *International Journal of Corrosion and Scale Inhibition*. <https://doi.org/10.17675/2305-6894-2015-4-3-226-234>
8. H. El-Mahdy (2022). Impact of Extreme Weather on Ceramic Manufacturing. https://www.researchgate.net/publication/358880381_A_study_on_the_impact_of_extreme_weather_events_on_the_ceramic_manufacturing_in_Egypt
9. Hegde, S., Shenoy, B. S., & Chethan, K. N. (2019). Review on carbon fiber reinforced polymer (CFRP) and their mechanical performance. *Materials Today: Proceedings*, 19, 658-662. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.749>
10. Hernández García, L. C., Monteiro, S. N., & Lopera, H. A. C. (2024). Recycling Clay Waste from Excavation, Demolition, and Construction: Trends and Challenges. *Sustainability*, 16(14), 6265. <https://ideas.repec.org/a/gam/jsusta/v16y2024i14p6265-d1440441.html>
11. Huang, H., Feng, W., & Chen, Y. (2021). Two-dimensional biomaterials: material science, biological effect and biomedical engineering applications. *Chemical Society Reviews*, 50(20), 11381-11485. <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2021/cs/d0cs01138j/unauth>
12. Yu, Z., Hu, J., & Meng, H., 2020. A Review of Recent Developments in Coating Systems for Hot-Dip Galvanized Steel. *Frontiers in Materials*. <https://www.frontiersin.org/journals/materials/articles/10.3389/fmats.2020.00074/full>
13. Johansson, N., Roth, L., Eklund, M., & Ljunggren Söderman, M. (2021). Critical and scarce materials – risks related to their supply, use and recycling. *Journal of Cleaner Production*, 280, 124508. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124508>

14. M. A. El-Sayed, A. A. El-Sayed, M. M. El-Sayed (2021). Micro- and Nanocellulose in Polymer Composite Materials: A Review. *Polymers*. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7827473/>
15. Mashhadi, A. R., Varastehpour, H., & Ghassemizadeh, S. M. (2023). Optimization of Carbon Fiber-Reinforced Polymer (CFRP) Sheet Dimensions and Anchorage for Strengthening Concrete Beams. *Buildings*, 14(12), 3953. <https://www.mdpi.com/2075-5309/14/12/3953>
16. Minh N. Nguyen, Xiaoming Wang, Robert H. Leicester (2013). An Assessment of Climate Change Effects on Atmospheric Corrosion Rates of Steel Structures. *Corrosion Engineering, Science and Technology*, 48(5), 359–369. <https://doi.org/10.1179/1743278213Y.0000000087>
17. Myungbeen Choi (2024). Ceramics Research Done Smartly: Machine Learning for Accelerating the Transition to Sustainable Ceramics. The National High School Journal of Science (NHSJS). <https://nhsjs.com/2024/ceramics-research-done-smartly-machine-learning-for-accelerating-the-transition-to-sustainable-ceramics/>
18. Pickering, S. J., Efendy, M. G. A., & Leeke, G. A. (2016). A review of recycling processes for carbon fibre composite materials. *Progress in Materials Science*, 72, 66–95. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2015.09.002>
19. Rajak, D. K., Pagar, D. D., Menezes, P. L., & Linul, E. (2019). Fiber-reinforced polymer composites: Manufacturing, properties, and applications. *Polymers*, 11(10), 1667. <https://doi.org/10.3390/polym11101667>
20. Rajendran, S., et al. (2021). Advances in biodegradable materials for sustainable environmental remediation. *Environmental Research*, 199, 111401. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111401>
21. Rosenboom, J. G., Langer, R., & Traverso, G. (2022). Bioplastics for a circular economy. *Nature Reviews Materials*, 7(2), 117-137. <https://www.nature.com/articles/s41578-021-00407-8>
22. S. M. Sapuan, M. R. Ishak, A. Mustapha, M. A. Maleque (2020). Effects of cold climates on polymer composite material properties. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2452321620308477>
23. S. Pickering, E. Howard, F. Scarpa, C. Soutis (2023). Some of the challenges faced by the Composites Industry in its bid to become more sustainable. *Green Chemistry*. <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2023/su/d3su00200d>
24. Thormann, L., Neuling, U., & Kaltschmitt, M. (2021). Opportunities and challenges of the European green deal for the chemical industry: An approach measuring innovations in bioeconomy. *Resources*, 10(9), 91. <https://doi.org/10.3390/resources10090091>
25. Tournier, V., Topham, C. M., Gilles, A., David, B., Folgoas, C., Moya-Leclair, E., ... & Marty, A. (2020). An engineered PET depolymerase to break down and recycle plastic bottles. *Nature*, 580(7802), 216-219. <https://www.nature.com/articles/S41586-020-2149-4>
26. Verma, V. K., & Verma, S. (2024). Applications and potential of advanced materials: an overview. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2024.05.004>
27. Wang, H., Li, C., Song, S., Wang, Y., Meng, Q., & Li, F. (2023). Flexural Performance of Cracked Reinforced Concrete Beams Strengthened with Prestressed CFRP Sheets under Repeated Loads. *Buildings*, 13, 2115. <https://doi.org/10.3390/buildings13082115>
28. Wendt, U. (2021). Engineering materials and their properties. *Springer Handbook of Mechanical Engineering*, 233-292. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-47035-7_8
29. Zhang, C., Hu, M., van der Meide, M., Di Maio, F., Yang, X., Gao, X., ... & Li, C. (2023). Life cycle assessment of material footprint in recycling: A case of concrete recycling. *Waste Management*, 155, 311-319. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.10.035>
30. Zhang, Y., Li, X., & Wang, Y. (2021). Polyvinyl chloride/epoxy double layer powder coating enhances coating adhesion and anticorrosion protection of substrate. *Journal of Coatings Technology and Research*. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2021.106335>