НАНОТЕХНОЛОГИЈЕ: ИЗАЗОВИ У БОРБИ ПРОТИВ КЛИМАТСКИХ ПРОМЕНА

Далибор Миленковић
Научно-стручно друштво за управљање ризиком од катастрофа, 11040 Београд, Србија; Међународни институт за истраживање катастрофа, 11040 Београд, Србија; ProSafeNet, глобални хаб за професионалце и научнике у области безбедности, сигурности, ризика и ванредних ситуација, 11040 Београд, Србија; имејл: dalibor.milenkovic@spsdrm.org

Владимир М. Цветковић
Катедра за управљање у ванредним ситуацијама и еколошку безбедност, Факултет безбедности, Универзитет у Београду, 11040 Београд, Србија; Студије безбедности и катастрофа, Катедра за технологију термичке обраде, Департман за инжењерство процеса животне средине и енергетских процеса, Montanuniversität, Леобен, Аустрија; Научно-стручно друштво за управљање ризиком од катастрофа, 11040 Београд, Србија; Међународни институт за истраживање катастрофа, 11040 Београд, Србија; имејл: vmc@fb.bg.ac.rs, vladimir.cvetkovic@vmcdrm.com

Александра Гајовић
Научно-стручно друштво за управљање ризиком од катастрофа, 11040 Београд, Србија; имејл: aleksandra.gajovic@spsdrm.org

Апстракт: *Климатске промене представљају системски ризик који истовремено погађа природне екосистеме, економију и јавно здравље, а ефекти се испољавају кроз чешће и интензивније екстремне временске догађаје, деградацију ресурса и нарушавање безбедности хране и воде. Ублажавање климатских промена захтева брзо смањење емисија гасова са ефектом стаклене баште, док адаптација подразумева прилагођавање инфраструктуре, производних система и јавних услуга новим климатским условима. У том контексту, нанотехнологија се издваја као*

хоризонтална технолошка платформа која омогућава развој материјала и уређаја са побољшаним функционалним својствима. Рад синтетише релевантна сазнања о потенцијалу нанотехнологије у областима хватања, складиштења и конверзије угљен-диоксида, повећања енергетске ефикасности, развоја напредних соларних ћелија и електрохемијског складиштења енергије, као и у одрживој пољопривреди, третману воде и мониторингу животне средине. Посебно се наглашава да су очекивани добици често условљени интеграцијом решења у целокупан proces, јер се користи могу анулирати високим енергетским и материјалним захтевима производње. Додатно, рад указује на кључне изазове у домену безбедности наноматеријала, укључујући токсиколошку неизвесност, потенцијалне утицаје на екосистеме, ограничења доступних емпиријских података и потребу за стандардизацијом, транспарентношћу и регулаторним оквиром заснованим на доказима. Закључује се да нанотехнологија може бити значајан део портфолија решења за климатску акцију, али само уз одговорне принципе развоја, валидирање перформанси у реалним условима и систематску процену ризика. Практична примена, међутим, захтева да се климатске користи квантификују мерљивим показатељима и да се упореде са потенцијалним нежељеним ефектима.

Кључне речи: *нанотехнологија; климатске промене; ублажавање; адаптација; процена ризика; одрживи развој*

NANOTECHNOLOGY: CHALLENGES IN COMBATING CLIMATE CHANGE

Dalibor Milenković
Scientific-Professional Society for Disaster Risk Management, 11040 Belgrade, Serbia; International Institute for Disaster Research, 11040 Belgrade, Serbia; ProSafeNet, a global hub for safety, security, risk, and emergency professionals and scientists, 11040 Belgrade, Serbia; e-mail: dalibor.milenkovic@spsdrm.org

Vladimir M. Cvetković
Department of Emergency Management and Environmental Security, Faculty of Security Studies, University of Belgrade, 11040 Belgrade, Serbia; Security and Disaster Studies, Chair of Thermal Processing Technology, Department of Environmental Process Engineering and Energy Process Engineering, Montanuniversität Leoben, Leoben, Austria; Scientific-Professional Society for Disaster Risk Management, 11040 Belgrade, Serbia; International Institute for Disaster Research, 11040 Belgrade, Serbia; e-mail: vmc@fb.bg.ac.rs, vladimir.cvetkovic@vmcdrm.com

Aleksandra Gajović
Scientific-Professional Society for Disaster Risk Management, 11040 Belgrade, Serbia; e-mail: aleksandra.gajovic@spsdrm.org

Abstract: *Climate change represents a systemic risk that simultaneously affects natural ecosystems, the economy, and public health, with impacts manifested through more frequent and more intense extreme weather events, resource degradation, and impaired food and water security. Mitigation requires rapid reductions in greenhouse-gas emissions, while adaptation entails adjusting infrastructure, production systems, and public services to new climatic conditions. In this context, nanotechnology stands out as a horizontal technological platform that enables the development of materials and devices with improved functional properties. This paper synthesizes relevant evidence on the potential of nanotechnology in carbon-dioxide capture, storage, and conversion; enhanced energy efficiency; the development*

of advanced solar cells and electrochemical energy storage; as well as sustainable agriculture, water treatment, and environmental monitoring. In particular, the expected gains are often contingent on integrating solutions across the full process, because benefits can be offset by the high energy and material demands of production. The paper also highlights key challenges related to nanomaterial safety, including toxicological uncertainty, potential impacts on ecosystems, limitations of available empirical data, and the need for standardization, transparency, and an evidence-based regulatory framework. It is concluded that nanotechnology can be a meaningful component of the climate-action solution portfolio, but only under responsible development principles, validation of performance under real-world conditions, and systematic risk assessment. Practical deployment, however, requires that climate benefits be quantified with measurable indicators and compared against potential adverse effects.

Keywords: *nanotechnology; climate change; mitigation; adaptation; risk assessment; sustainable development*

УВОД

Климатске промене односе се на дугорочне промене температуре и временских услова (Cvetković & Grbić, 2021; Cvetković et al, 2019; Cvetković, 2013). Настају природно, кроз варијације у соларном циклусу сунца, али и од људске активности која је од 19. века њихов главни покретач, због сагоревања фосилних горива (UN, 2023). Наведено нужно сагоревање мења састав атмосфере због емисије гасова са ефектом стаклене баште, као што су угљен-диоксид, метан и азот-оксид (Karl & Tremberth, 2003). Измењен састав атмосфере узрокује главну карактеристику климатских промена, глобално загревање. До сада, просечна глобална температура увећана је за један степен у односу на пред индустријско доба. Очекује се да до 2052. године просечна температура порасте за додатних пола степена. Циљ борбе са климатским променама је задржати просечно загревање испод два степена. Прекорачење загревања од два степена водило би ка неповратним процесима са тешким последицама по живот људи (Masson-Delmotte, et al., 2018). Ти процеси довели би до комплексних последица по живот људи у областима: водених ресурса, енергетском сектору, транспорту, пољопривреди, природним екосистемима, људском здрављу и друштвеним заједницама (Karl, Melillo, & Peterson, 2009).

Нанотехнологије се појављују као интердисциплинарна област која повезује хемију, физику, инжењерство материјала и биомедицину, са заједничком карактеристиком: управљање својствима материјала и уређаја на нивоу 1–100 nm, где доминирају ефекти површинске енергије, квантне конфинације и изузетно велике специфичне површине. Код климатског дискурса, то се преводи у три могућности: више енергије из обновљивих извора по јединици материјала; брже и јефтиније складиштење и конверзију енергије и ефикасније уклањање угљен-диоксид и других загађивача из ваздуха и воде. Међутим, „потенцијал“ није исто што и „реализована климатска корист“. Заиста, историја климатске политике показује да технолошки оптимизам може постати механизам одлагања структуралних промена (смањење потражње, енергетска ефикасност, замена фосилне инфраструктуре), посебно када се обећавају будуће технологије великог обима са још увек недовољном зрелошћу. Дебате о ослањању на апсорпцију угљеника и негативне емисије у панелима за климатске промене управо се воде око овог ризика „прекомерног ослањања“ (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2022).

Додатно, наноматеријали уносе специфичне ризике: њихова реактивност, пенетрација, трансформације у животној средини и сложеност мерења изложености отежавају класичну процену ризика. Организација за економску сарадњу и развој и Међународна организација за стандардизацију у последњој деценији развијају оквире за тестирање, процену и управљање ризицима наноматеријала (International Organization for Standardization, 2011), док Европска агенција за хемикалије у оквиру регулатива Европске уније о регистрацији, евалуацији, ауторизацији и ограничењу хемикалија режима захтева специфичне информације за „нано-форме“ супстанци

од 1. јануара 2020. године (European Chemicals Agency, 2019). Стога, климатска агенда нанотехнологија мора да укључи и агенду одговорног иновирања: анализа животног циклуса, токсикологију, стандарде, праћење током животног циклуса и јасне путеве за крај животног века и рециклажу.

НАНОТЕХНОЛОГИЈА КАО ТЕХНОЛОШКА ПЛАТФОРМА

Ублажавање негативних ефеката климатских промена може се реализовати смањењем или престанком емисије штетних гасова и умањењем негативних последица изазваних већ насталим променама (IPCC, 2023). Технолошки напредак и технолошке иновације представљају један од начина унапређења борбе са климатским променама, где су између осталог, нанотехнологије један од битних фактора који може помоћи у борби са њима (Shukla, Skea, & Reisinger, 2022).

Способност ове технологије је да користи материју на нанометарској скали, обично од 1 до 100 nm. Нанометар је један милијардити део метра, а из перспективе ове скале, атом водоника има пречник од 0,1 нм (Weir, Sierra, & Jones, 2005). Та материја јесу наноматеријали који могу бити природни, случајно добијени или произведени материјали који садрже честице или у везаном стању или као агрегат или агломерат, код којих једна или више димензија спада у ред величине од једног до 100 нм (EUON, 2023). Нанотехнологије омогућавају манипулацију материјом не само од врха ка дну, већ на атомском нивоу и стварање продуката управо од атома и молекула, од дна ка врху, са тенденцијом да измене индустрију какву сада познајемо (Drexler, Peterson, & Pergamit, 1993).

Од почетка 21. века, нанотехнологије су продрле у скоро све научне области и дисциплине, као и у све облике инжењерства. Користе се у комерцијалним производима најширег спектра, од наноструктурираних премаза, текстила, па до складиштења енергије, екологије и ћелијског горива (Roco, Mirkin, & Hersam, 2010¸Colvin, 2003). Глобално тржиште наноматеријала у индустријама које имплементирају нанотехнологију, може до 2030. године да достигне око 115 милијарди долара, не рачунајући вредност добара у којима су коришћени (Data Bridge, 2022).

НАНОТЕХНОЛОГИЈЕ У УБЛАЖАВАЊУ КЛИМАТСКИХ ПРОМЕНА И ПОСЛЕДИЦА

Нанотехнологије могу да помогну у борби са климатским променама кроз производњу и употребу специфичних наноматеријала као што су: лаки нанокомпозитни материјали; нанопремази; нанокатализатори; наноструктурирани материјали; унапређени обновљиви извори енергије; унапређене батерије и наносензори (Nano Magazine, 2017). Соларна енергија је једна од најбрже растућих

опција за декарбонизацију, али даљи напредак зависи од ефикасности, трајности и материјалне одрживости уређаја. Перовскитне соларне ћелије су пример области у којој нано-инжењеринг дефеката и транспортних слојева директно подиже ефикасност. Системски изазов остаје дугорочна стабилност и производња (Raman, et al., 2014). Механизми деградације оваквих иновативних панела (влага, кисеоник, ултраљубичасто зрачење, термички стрес и сл.), намећу потребу стандардизације протокола тестирања трајности. У пракси, климатска корист перовскитне соларне ћелије зависи од тога да ли ће се обезбедити век трајања упоредив са силицијумским технологијама и да ли ће се решити питања токсичности и управљања оловом (Khenkin et al., 2020; Yang et al., 2024). Међутим, наноматеријали могу увести и нове проблеме: повећана реактивност, сложенија производња и већи трошак, као и компромис између високих перформанси и индустријске продуктивности (Qi et al., 2017; Song et al., 2011). Декарбонизација транспорта, захтева нове приступе код батерија, те ће главни изазов бити прелаз са „идеалних“ лабораторијских узорака на робусне, масовно производиве електроде без деградације перформанси и без значајног повећања трошкова (Zhai et al., 2022).

Код смањења или престанка емисије штетних гасова, савремени технолошки процеси омогућили су рад на развоју наноматеријала који могу служити за њихово прикупљање. Досадашњи развој на овом пољу, осим научног пробоја, представља и финансијски изазов због цене процеса (Khullar, 2017). Постоји више начина прикупљања угљен-диоксида екстракцијом: пре сагоревања, после сагоревања, прављењем кисеоничких горива и кроз хемијско везивање. Остали процеси су електролитичка, фотокаталитичка и фотоелектрокаталитичка редукција (Thongam & Chaturvedi, 2021). Код постојећих технологија, могу допринети смањењу емисије угљен-диоксида унапређењем ефикасности појединих процеса и добијања енергије из обновљивих извора, односно еколошку производњу горивих ћелија. Међутим, процес зависи од целокупног система производње не само производње горивих ћелија, већ енергије, где проблеми стабилности, као и реални услови коришћења представљају изазов (Zhou et al., 2021). Могу помоћи код складиштења енергије новим врстама батерија и кондензатора. Ипак нанотехнологије, сумарно могу унапредити транспорт електричне енергије и осветљење без ослобађања топлоте. У будућности, нанотехнологије могу омогућити климатски инжењеринг, добијање сировина и локализацију индустријске производње што би допринело и значајном смањењу потрошње фосилних горива (Mamalis, Ramsden, Holt, Vortselas, & Mamali, 2011; Hussein, 2015).

Код умањења негативних последица и утицаја климатских промена, примена нанотехнологија може бити корисна за целокупни екосистем, а конкретно, за пољопривреду односно производњу хране, воду и њену доступност, здравље и живот људи, али и остале области. Постоји велики број врста наноматеријала који у томе могу помоћи. Они се могу користити за смањење загађења у природи, односно ваздуху, води и земљишту, смањење емисије штетних гасова, као и током производних

процеса и употребе обновљивих извора енергије (Arundhathi et al., 2024; Meskher et al., 2025). Овде се појављују као алат за: повећање процесне ефикасности; замену материјала и прецизније управљање у агросистемима. Међутим, реални ефекат зависи од интеграције у постојећа постројења, трајност и доступност сировина. Свака уштеда у енергији мора се упоредити са укупним материјалним и енергетским отиском производње, посебно ако су потребни племенити или критични метали. У пољопривреди, концепт нано-ђубрива и нано-пестицида заснива се на контролисаном ослобађању и циљаном дејству активних супстанци ради повећања ефикасности, ипак ризик акумулације наночестица у земљишту, доводи до неизвесности и непознаница о дугорочним ефектима (Klaine et al., 2008; Lead et al., 2018).

Поред тога, користе се и за одрживу архитектуру и сензорско праћење процеса у природи али могу имати смисла само ако су део оперативних процеса који заиста редукују емисије (Chausali, Saxena, & Prasad, 2023; Rose, 2022; Akbari-Saatlu et al., 2020). Директно хватање из ваздуха угљен-диоксида је посебно захтеван процес јер материјали морају имати високу афинитетност уз разумну енергију регенерације и наглашава се да је енергетски биланс процеса критичан за климатски ефекат (Bose et al., 2024; Simari, 2025). Ако енергија за регенерацију долази из фосилних извора или ако материјали имају висок угљенични отисак производње, нето уклањање може бити значајно мање од теоријског. У овом сегменту активна је комерцијализација и финансирање од стране држава, а самим тим и убрзана примена свих достигнућа (Mazzola, 2003).

Још увек је непотпуно истражен штетан утицај инцидентних и произведених наноматерија на човека и природу може представљати „Ахилову тетиву“ нанотехнологија (Dunphy Guzmán, Taylor, & Banfield, 2006). Развој ових технологија рађа више питања од одговора. Узевши у обзир њене специфичности, интердисциплинарна научна комуникација може пружити одговоре на ризике и уредити ову област (Maynard, 2006). Очекује се да у будућности нанотехнологије буду укључене у све врсте индустрија и тиме доприносу решавању проблема климатских промена. Међутим потребно је предузети све мере заштите, предострожности и одрживости у коришћењу истих ради заштите од штетних последица њихове употребе (Malik, Muhammad, & Waheed, 2023). Као и све нове технологије представљају ризик за људе и природу. Циљ је да разумемо и предвидимо такве ризике да би се смањила неизвесност и извршила процена и управљање ризиком зарад одговорног развоја нанотехнологија (NNI, 2003).

Многе нано-омогућене технологије показују изузетне перформансе у контролисаним лабораторијским условима, али се њихов учинак често погоршава при у реалним условима. У индустријском окружењу, чак и мали проценат варијабилности може довести до значајног пада употребне вредности, што директно повећава трошак и угљенични отисак по јединици производа (Khenkin et al., 2020; Yang et al., 2024).

Да би нанотехнологија била климатски релевантна, неопходно је да нето ефекат у животном циклусу буде позитиван. То подразумева да се уштеде у фази употребе

не анулирају високим емисијама у фази производње, транспорта или краја животног века. Анализе животног циклуса за наноматеријале показују да постоји велика методолошка неусклађеност, као и недовољно података за мерење при сагледавању корисности процеса (Nizam & Hanafiah, 2021).

У домену угљеничних наноматеријала, посебну пажњу добијају дуге, круте карбонске нанотубе које могу испољити „фиброзни“ патогени потенцијал сличан азбесту. Прегледи података о изложености и ризику истичу да су најзначајнији ризици повезани са хроничном инхалационом изложеношћу радника при производњи и руковању, посебно ако нема контроле емисија прашине (Aschberger et al., 2010; Donaldson & Poland, 2010). Експериментални радови су показали да нанотубе одређених димензија могу активирати сличне путеве канцерогенезе као дуговлакнасти азбест, што захтева опрез и строге мере контроле изложености (Port et al., 2017).

Еколошка судбина наноматеријала укључује агломерацију, седиментацију, адсорпцију на органску материју и трансформације (оксидација, сулфидација), што мења био-доступност и токсичност. Прегледи понашања наноматеријала у животној средини наглашавају да је предвиђање концентрација у реалним условима и даље ограничено недостатком података о емисијама, токовима и трансформацијама (Gottschalk et al., 2013; Som et al., 2013).

Многе нано-омогућене технологије ослањају се на критичне минерале и племените метале. Климатска транзиција већ ствара конкуренцију за ове ресурсе, што може довести до раста цена и геополитичких ризика. Изазов је пројектовати материјале који су не само ефикасни, већ и ресурсно одрживи. У супротном, постоји ризик да технологије постану зависне од ограничених ланаца снабдевања, што успорава глобално усвајање и смањује климатски ефекат. Регулаторна неизвесност је често потцењен, али кључан фактор у комерцијализацији. У ЕУ, регулатива Европске уније о регистрацији, евалуацији, ауторизацији и ограничењу хемикалија је проширен тако да компаније морају да обезбеде додатне информације за нано-форме супстанци, са применом од 1. јануара 2020. године, а Европска агенција за хемикалије је издала ажурирана упутства за регистрацију и идентификацију нано-форма (European Chemicals Agency, 2022). Ово повећава трошкове усклађености, али такође уводи предвидљивост и повећава поверење.

ЗАКЉУЧАК

Нанотехнологија има потенцијал да убрза технолошки одговор на климатске промене кроз побољшање енергетских система, хватање угљеника и материјале са бољим перформансама, као и кроз ефикасније управљање водом и храном и напредни мониторинг животне средине. Међутим, реализација тог потенцијала зависи од тога да ли се решења развијају и примењују уз систематску процену ризика и квантификацију стварних климатских користи у целокупном животном

циклусу. Само тако нанотехнологија може постати поуздан део портфолија мера за ублажавање и адаптацију (Bose, S., Kumar, P., & Singh, R.2024).

Доказивање климатске користи захтева јасну метрику: енергетска ефикасност, трајност, емисије у животном циклусу и емисије током употребе. Зато је критично да се истраживања све више ослањају на стандарде карактеризације и извештавања, као и на отворене скупове података. Без овога, индустрија се суочава са ризиком да инвестира у материјале чији се учинак не може репродуковати, а регулатори са ризиком недовољне заштите или прекомерног оптерећења иновација (Khenkin et al., 2020; Mehdinia Lichaei & Thibault, 2024; European Chemicals Agency, 2019; International Organization for Standardization, 2011; Organisation for Economic Co-operation and Development).

Нанотехнологије могу бити значајан катализатор климатске транзиције, јер омогућавају нове режиме материјалних својстава који су тешко доступни класичним инжењерским приступима. Климатска корист нанотехнологија није аутоматска. Она захтева истовремено испуњавање више услова: нискоугљеничну производњу, довољну трајност и стабилност у реалним условима, доступне и одрживе ланце снабдевања, те регулаторну и друштвену прихватљивост засновану на доказима (Trickett et al., 2017). У том смислу, највећа вредност нанотехнологија може бити у томе што убрзавају учинак већ познатих стратегија (обновљиви извори, ефикасност, електрификација), а не у томе што обећавају „магично“ решење које одлаже тешке политичке и економске одлуке.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Akbari-Saatlu, M., Procek, M., Mattsson, C., Thungström, G., Nilsson, H. E., Xiong, W., ... Radamson, H. H. (2020). Silicon nanowires for gas sensing: A review. Nanomaterials, 10(11), 2215. doi:10.3390/nano10112215

[2] Arundhathi, A., Narayana, S. K., & Nair, S. S. (2024). Advancements in mixed-matrix membranes for separation applications. Membranes, 14(11), 224. doi:10.3390/membranes14110224

[3] Aschberger, K., Micheletti, C., Sokull-Klüttgen, B., & Christensen, F. M. (2011). Analysis of currently available data for characterising the risk of engineered nanomaterials to the environment and human health—Lessons learned from four case studies. Environment International, 37(6), 1143–1156. doi:10.1016/j.envint.2011.02.005

[4] Bose, S., Kumar, P., & Singh, R. (2024). Challenges and opportunities: Metal–organic frameworks for direct air capture. Advanced Functional Materials, 34(5), 2307478. doi:10.1002/adfm.202307478

[5] Chausali, N., Saxena, J., & Prasad, R. (2023). Nanotechnology as a sustainable approach for combating the environmental effects of climate change. Journal of Agriculture and Food Research, 12, 100541. doi:10.1016/j.jafr.2023.100541

[6] Colvin, V. L. (2003). The potential environmental impact of engineered nanomaterials. Nature Biotechnology, 21(10), 1166–1170. doi:10.1038/nbt875
[7] Cvetković, V. (2013). The impacts of climate changes on the risk of natural disasters. *International Yearbook of the Faculty of Security* (pp. 51–62). Skopje: Faculty of Security.
[8] Cvetković, V., & Grbić, L. (2021). Public Perception of Climate Change and Its Impact on Natural Disasters. *Journal of the Geographical Institute Jovan Cvijić, 71*(1), 43–58.
[9] Cvetković, V., Tomašević, K., & Milašinović, S. (2019). Security risks of climate change: Case study of Belgrade. *Sociological Review, 53*(2), 596–626.
[10] Data Bridge Market Research. (2022). Global nanotechnology market. Retrieved April 3, 2023, from https://www.databridgemarketresearch.com/reports/global-nanotechnology-market
[11] Donaldson, K., Poland, C. A., & Schins, R. P. F. (2010). Possible genotoxic mechanisms of nanoparticles: Criteria for improved test strategies. Nanotoxicology, 4, 414–420. doi:10.3109/17435390.2010.482751
[12] Drexler, E., Peterson, C., & Pergamit, G. (1993). Unbounding the future: The nanotechnology revolution. New York, NY: Quill Books.
[13] Dunphy Guzmán, K. A., Taylor, M. R., & Banfield, J. F. (2006). Environmental risks of nanotechnology: National Nanotechnology Initiative funding, 2000–2004. Environmental Science & Technology, 40(5), 1401–1407. doi:10.1021/es0515708
[14] European Chemicals Agency. (2019, October 8). Get ready for new requirements for nanomaterials under the European Union regulation on registration, evaluation, authorisation and restriction of chemicals. Retrieved from https://echa.europa.eu/-/get-ready-for-new-reach-requirements-for-nanomaterials
[15] European Chemicals Agency. (2022). Appendix for nanoforms applicable to the Guidance on Registration and Substance Identification (Version 2.0). Helsinki, Finland: Author. Retrieved from https://echa.europa.eu/documents/10162/17250/how_to_register_nano_en.pdf
[16] European Union Observatory for Nanomaterials. (2023). Definition of nanomaterial. Retrieved April 5, 2023, from https://euon.echa.europa.eu/definition-of-nanomaterial
[17] Gottschalk, F., Sun, T., & Nowack, B. (2013). Environmental concentrations of engineered nanomaterials: Review of modeling and measurement studies. Environmental Pollution, 181, 287–300. doi:10.1016/j.envpol.2013.06.003
[18] Hussein, A. K. (2015). Applications of nanotechnology in renewable energies—A comprehensive overview and understanding. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 42, 460–476. doi:10.1016/j.rser.2014.10.027
[19] Intergovernmental Panel on Climate Change. (2018). Global warming of 1.5°C: An IPCC special report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways. Geneva, Switzerland: Author. Retrieved from https://www.ipcc.ch/sr15/
[20] Intergovernmental Panel on Climate Change. (2022). Climate change 2022: Mitigation of climate change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report

of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom & New York, NY: Cambridge University Press. doi:10.1017/9781009157926

[21] Intergovernmental Panel on Climate Change. (2023). Climate change 2023: Synthesis report. Geneva, Switzerland: Intergovernmental Panel on Climate Change. Retrieved from https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/

[22] International Organization for Standardization. (2011). ISO/TR 13121:2011 Nanotechnologies—Nanomaterial risk evaluation. Geneva, Switzerland: Author.

[23] Karl, T. R., & Tremberth, K. E. (2003). Modern global climate change. Science, 302(5651), 1719–1723. doi:10.1126/science.1090228

[24] Karl, T. R., Melillo, J. M., & Peterson, T. C. (Eds.). (2009). Global climate change impacts in the United States. New York, NY: Cambridge University Press.

[25] Khenkin, M. V., Katz, E. A., Abate, A., Bardizza, G., Berry, J. J., Brabec, C., ... Graetzel, M. (2020). Consensus statement for stability assessment and reporting for perovskite photovoltaics based on ISOS procedures. Nature Energy, 5, 35–49. doi:10.1038/s41560-019-0529-5

[26] Khullar, B. (2017). Researchers look to nanomaterials to clean air, water and land. Ensia. Retrieved April 1, 2023, from https://ensia.com/articles/nanomaterials-environment/

[27] Klaine, S. J., Alvarez, P. J. J., Batley, G. E., Fernandes, T. F., Handy, R. D., Lyon, D. Y., ... Lead, J. R. (2008). Nanomaterials in the environment: Behavior, fate, bioavailability, and effects. Environmental Toxicology and Chemistry, 27(9), 1825–1851. doi:10.1897/08-090.1

[28] Lead, J. R., Batley, G. E., Alvarez, P. J. J., Croteau, M.-N., Handy, R. D., McLaughlin, M. J., ... Schirmer, K. (2018). Nanomaterials in the environment: Behavior, fate, bioavailability, and effects—An updated review. Environmental Toxicology and Chemistry, 37(8), 2029–2063. doi:10.1002/etc.4147

[29] Malik, S., Muhammad, K., & Waheed, Y. (2023). Nanotechnology: A revolution in modern industry. Molecules, 28(2), 661. doi:10.3390/molecules28020661

[30] Mamalis, A. G., Ramsden, J. J., Holt, G. C., Vortselas, A. K., & Mamali, A. A. (2011). The effect of nanotechnology on mitigation and adaptation strategies in response to climate change. Nanotechnology Perceptions, 7(3), 159–179. doi:10.4024/N08MA11A.ntp.07.03

[31] Maynard, A. D. (2006). Nanotechnology: Assessing the risks. Nano Today, 1(2), 22–33. doi:10.1016/S1748-0132(06)70045-7

[32] Mazzola, L. (2003). Commercializing nanotechnology. Nature Biotechnology, 21(10), 1137–1143. doi:10.1038/nbt1003-1137

[33] Mehdinia Lichaei, M., & Thibault, Y. (2024). Carbon capture and storage using nanomaterials: Advances and challenges. Process Safety and Environmental Protection, 179, 495–509. doi:10.1016/j.psep.2024.01.069

[34] Meskher, H., Thakur, A. K., Hazra, S. K., Ahamed, M. S., Saleque, A. M., Alsalhy, Q. F., ... & Lynch, I. (2025). Recent advances in applications of MXenes for desalination, water purification and as an antibacterial: a review. Environmental Science: Nano, 12(2), 1012-1036. doi: 10.1039/D4EN00427B.

[35] Nanografi Advanced Materials. (2022, May 16). How does nanotechnology combat global warming and climate change? Retrieved April 9, 2023, from https://shop.nanografi.com/blog/how-does-nanotechnology-combat-global-warming-and-climate-change/
[36] National Nanotechnology Initiative. (2007). Nanotechnology and the environment: Report of a National Nanotechnology Initiative workshop (May 8–9, 2003, Arlington, VA). Washington, DC: National Nanotechnology Coordination Office. Retrieved from https://www.nano.gov/sites/default/files/pub_resource/nanotechnology_and_the_environment_app_imp.pdf
[37] Nizam, N. U. M., Hanafiah, M. M., & Woon, K. S. (2021). A content review of life cycle assessment of nanomaterials: Current practices, challenges and future prospects. Nanomaterials, 11(12), 3324. doi:10.3390/nano11123324
[38] Organisation for Economic Co-operation and Development. (n.d.). Nanomaterial safety (manufactured nanomaterials): Working Party on Manufactured Nanomaterials. Retrieved from https://www.oecd.org/chemicalsafety/nanosafety/
[39] Port, J. A., Cullen, A. C., Wallace, J. C., Smith, M. N., & Faustman, E. M. (2014). Metagenomic frameworks for monitoring antibiotic resistance in aquatic environments. Environmental Health Perspectives. doi:10.1289/ehp.1307009
[40] Qi, W., Shapter, J. G., Wu, Q., Yin, T., Gao, G., & Cui, D. (2017). Nanostructured anode materials for lithium-ion batteries: Principle, recent progress and future perspectives. Journal of Materials Chemistry A, 5, 19521–19540. doi:10.1039/C7TA05283A
[41] Raman, A. P., Anoma, M. A., Zhu, L., Rephaeli, E., & Fan, S. (2014). Passive radiative cooling below ambient air temperature under direct sunlight. Nature, 515(7528), 540–544. doi:10.1038/nature13883
[42] Roco, M. C., Mirkin, C. A., & Hersam, M. C. (Eds.). (2010). Nanotechnology research directions for societal needs in 2020: Retrospective and outlook. Dordrecht, Netherlands: Springer. doi:10.1007/978-94-007-1168-6
[43] Shukla, P. R., Skea, J., & Reisinger, A. (Eds.). (2022). Climate change 2022: Mitigation of climate change. Cambridge, United Kingdom & New York, NY: Cambridge University Press. doi:10.1017/9781009157926
[44] Simari, C. (2025). Nanomaterials for carbon dioxide capture and utilization: Recent advances. Molecules, 30(14), 3048. doi:10.3390/molecules30143048
[45] Som, C., Wick, P., Krug, H. F., & Nowack, B. (2013). Environmental and health effects of nanomaterials in consumer products. Environmental Science & Technology, 47(19), 10692–10700. doi:10.1021/es4011292
[46] Song, M.-S., Yun, K. S., & Jeon, J.-W. (2011). Nanostructured electrodes for lithium-ion and lithium-air batteries: The latest developments, challenges, and perspectives. Materials Science and Engineering: R: Reports, 72(2), 73–99. doi:10.1016/j.mser.2011.06.001
[47] Stannard, F. (2017, June 29). 7 ways nanotechnology could combat climate change. Nano Magazine. Retrieved April 6, 2023, from https://nano-magazine.com/news/2017/6/29/7-ways-nanotechnology-could-combat-climate-change

[48] Thongam, D., & Chaturvedi, H. (2021). Nanomaterials for climate change and water pollution mitigation. In Water conservation in the era of global climate change (pp. 277–314). Chennai, India: Elsevier.
[49] Trickett, C. A., Helal, A., Al-Maythalony, B. A., Yamani, Z. H., Cordova, K. E., & Yaghi, O. M. (2017). The chemistry of metal–organic frameworks for carbon capture and conversion. Nature Reviews Materials, 2, 17045. doi:10.1038/natrevmats.2017.45
[50] United Nations. (n.d.). What is climate change? Retrieved April 1, 2023, from https://www.un.org/en/climatechange/what-is-climate-change
[51] Weir, N. A., Sierra, D. P., & Jones, J. F. (2005). A review of research in the field of nanorobotics. Albuquerque, NM: Sandia National Laboratories.
[52] Yang, C., Hu, W., Liu, J., Han, C., Gao, Q., Mei, A., ... & Han, H. (2024). Achievements, challenges, and future prospects for industrialization of perovskite solar cells. Light: Science & Applications, 13(1), 227. doi: 10.1038/s41377-024-01461-x.
[53] Zhai, L., Sun, M., & Li, Q. (2022). Graphene-based fiber supercapacitors: Progress and perspectives. Accounts of Materials Research, 3(10), 901–915. doi:10.1021/accountsmr.2c00087
[54] Zhou, F., Zhou, Y., Liu, G., & Wang, C.-T. (2021). Recent advances in nanostructured electrocatalysts for hydrogen evolution reaction. Rare Metals, 40(12), 3375–3405. doi:10.1007/s12598-021-01735-y.