Co-funded by the European Union

IKY

BIOSHIELD

Inovativne biotehnološke rešitve za blažitev podnebnih sprememb

(Novel Biotechnological Solutions in Climate Change Mitigation)

2024-1-EL01-KA220-HED-000251373

Študijski priročnik za prihodnje scenarije razvoja biotehnologij

Sveučilište Sjever

University of Maribor

MELLIS

ŠTUDIJSKI PRIROČNIK

UREDNIK

Ioannis Kourkoutas, Democritus University of Thrace, Greece

AVTORJI

Maria Grigoriou, Democritus University of Thrace, Greece
George Skavdis, Democritus University of Thrace, Greece
Petros Kolovos, Democritus University of Thrace, Greece
Katerina Kedraka, Democritus University of Thrace, Greece
Katerina Paleologou, Democritus University of Thrace, Greece
Gregoria Mitropoulou, Democritus University of Thrace, Greece
Electra Stylianopoulou, Democritus University of Thrace, Greece
Kemal Melih Taşkın, Çanakkale Onsekiz Mart University, Türkiye
Çiğdem Şahin Taşkın, Çanakkale Onsekiz Mart University, Türkiye
Fatih Sezer, Çanakkale Onsekiz Mart University, Türkiye
Aslıhan Özbilen, Çanakkale Onsekiz Mart University, Türkiye
Nikolaos Kopsahelis, Ionian University, Greece
Vasiliki Kachrimanidou, Ionian University, Greece
Maria Alexandri, Ionian University, Greece
Aikaterini Natsia, Ionian University, Greece
Aikaterini Papadaki, Ionian University, Greece
Silva Grobelnik Mlakar, University of Maribor, Slovenia
Danijel Davidović, University of Maribor, Slovenia
Dunja Samec, University North, Croatia
Barbara Medvedec, University North, Croatia
Elif Anda, Mellis Educational Technologies, Türkiye
Caner Anda, Mellis Educational Technologies, Türkiye

GRAFIČNO OBLIKOVANJE

Elif Anda

LETO OBJAVE

2026

KOORDINATOR PROJEKTA

Democritus University of Thrace, Greece

PARTNERSKE ORGANIZACIJE

Çanakkale Onsekiz Mart University - Türkiye, University North – Croatia, University of Maribor - Slovenia, Ionian University - Greece, Mellis Eğitim Teknoloji Ticaret Limited Şirketi, Turkey

LICENCA IN ZAHVALE

Delo je objavljeno pod licenco Creative Commons: Priznanje avtorstva Nekomercialno 4.0 Mednarodno (CC-BY-NC-4.0).

BIOSHIELD – Inovativne biotehnološke rešitve za blažitev podnebnih sprememb (2024-1-EL01-KA220-HED-000251373) je Erasmus+ projekt, ki ga financira Evropska unija. Mnenja in stališča, izražena v publikaciji, so izključno mnenja avtorjev in ne odražajo nujno stališč Evropske unije ali Izvajalske agencije za izobraževanje in kulturo (EACEA). Evropska unija in EACEA ne odgovarjata za vsebino.

Kazalo vsebine

Kazalo vsebine 3

Kratice 6

Slovar 11

Uvod 17

Učna zasnova za inovacijsko usmerjeno izobraževanje na področju biotehnologije 18

Namen in obseg priročnika 18

Podnebne spremembe, tveganja naravnih nesreč in vloga biotehnologije 19

Izobraževalne tehnologije, ki podpirajo na inovacijah temelječe učenje 20

Kako priročnik spodbuja razmišljanje, usmerjeno v prihodnost 21

Poglavje 1: Inovacije na področju biološko osnovane hrane in mikrobioma za podnebno odpornost 23

1.1. Podnebne spremembe in potreba po trajnostnih prehranskih sistemih 23

1.2. Biotehnologija na osnovi mikrobioma 23

1.2.1. Mikrobna biognojila in zdravje tal 23

1.2.2. Upravljanje mikrobioma domačih živali 26

1.2.3. Proizvodnja hrane s fermentacijo 29

1.2.4. Mikrobna valorizacija odpadkov in krožna bioekonomija 31

1.3. Scenariji inovacij 33

1.4. Inovativno delo študentov 34

1.5. Zaključek 39

1.6. Napredek na področju v laboratoriju gojenega mesa: trajnostna rešitev za blaženje podnebnih sprememb 39

1.6.1. Zakaj potrebujemo alternative tradicionalni proizvodnji mesa? 39

1.6.2. Kaj je gojeno meso in kako ga proizvedemo? 40

1.6.3. Razvoj gojenega mesa 41

1.6.4. Glavni izzivi pri proizvodnji gojenega mesa 43

1.7. Inovativno delo študentov: Napredek na področju gojenega mesa – trajnostna rešitev za podnebne spremembe 51

1.8. Zaključek 55

Poglavje 2: Spodbujanje trajnostnega razvoja s krožno bioekonomijo in učinkovito rabo virov 56

2.1. Uvod: Biotehnologija pri trajnostnem upravljanju virov 56

2.1.1. Trenutni problemi in globalni izzivi 58

2.1.2. Vloga biotehnologije 58

2.2. Biorafinerije kot strateški vzvod bioekonomije 58

2.2.1. Razumevanje tipov in konfiguracij biorafinerij 59
2.2.2. Viri biomase in njihova vloga v bioprocesiranju 59
2.2.3. Predobdelava biomase 60
Glavne zelene metode predobdelave biomase 61
2.3. Nabor končnih proizvodov iz biorafinerij 63
2.4. Politični okvir Evropske unije za bioekonomijo in prehod v krožno gospodarstvo 64
2.5. Scenariji inovacij in prihodnje podnebne projekcije 72
2.6. Zaključek 73
Poglavje 3: Koriščenje talnega mikrobioma za podnebno pametno pridelavo rastlin in upravljanje krajine 74
3.1. Ozadje 74
3.2. Mikrobiomske rešitve v pridelavi rastlin 75
3.2.1. Rastlinski holobiont kot funkcionalna enota 75
3.2.2. Biognojila in biostimulanti 76
3.2.3. Formulacije biognojil in biostimulantov 80
3.2.4. GIS analiza okoljskih dejavnikov, ki vplivajo na talni mikrobiom v kontekstu podnebnih sprememb. 88
3.2.5. Vključevanje rešitev, ki temeljijo na talnem mikrobiomu za podnebno pametno kmetijstvo 92
3.3. Inovativno delo študentov 93
3.4. Zaključek 98
Poglavje 4: Biotehnologija za zajem in izrabo ogljika 99
4.1. Uvod: Strateška integracija bioloških znanosti pri blaženju podnebnih sprememb 99
4.2. Motor zajema: biokemijski mehanizmi fotosinteze 100
4.2.1. Svetlobna faza: zajem energije 100
4.2.2. Calvin-Bensonov cikel: motor vezave ogljika 100
4.2.3. Paradoks Rubisca: evolucijske omejitve in priložnosti 101
4.3. Biotehnološke strategije za blaženje podnebnih sprememb z zajemom in izrabo ogljika (CCU) 102
4.3.1. Napredna rastlinska biotehnologija za blaženje podnebnih sprememb 102
4.3.1.1. Pobuda Harnessing Plants (HPI) inštituta Salk 103
4.3.2. Mikrobni sistemi: alge in cianobakterije 104
4.3.3. Izraba ogljika v grajenem okolju (stavbe in infrastruktura) 105
4.3.4. Študije primerov namenjene analizi študentov 106
4.3.5. Navodila za raziskovalno delo študentov: metode in protokoli 108
4.3.6. Politični okvir in prihodnji razvoj 112
4.4. Scenariji inovacij in prihodnje podnebne projekcije 114
4.5. Zaključek 114
Poglavje 5: Biotehnologija za obnovo ekosistemov in blaženje podnebne krize 115

5.1. Na naravi temelječe rešitve za prilagajanje podnebnim spremembam ... 115
5.1.1. Biotehnološki pristopi za obnovo ekosistemov in blaženje podnebne krize ... 115
5.2. Scenariji inovacij in prihodnje podnebne projekcije ... 121
5.3. Študije primerov namenjene analizi študentov ... 127
5.4. Zaključek ... 129
Poglavje 6: Inovacije, podjetništvo in karierne poti v biotehnologiji, usmerjeni v blaženje podnebnih sprememb ... 130
6.1. Podnebne inovacije in biotehnološko podjetništvo ... 130
6.1.1. Kako se kmetijska biotehnologija obravnava v Grčiji, na Hrvaškem, v Sloveniji in Turčiji ... 130
6.2. Razvoj biotehnoloških zagonskih podjetij za reševanje podnebnih in okoljskih izzivov ... 131
6.2.1. Izvedljivost ... 132
6.2.2. Konkurenčnost ... 135
6.2.3. Razvoj produkta in interdisciplinarni pristop ... 136
6.2.4. Zakaj ravno sedaj? ... 137
6.2.5. Prenosljive kompetence ... 138
6.2.6. Človeška in sistemska perspektiva ... 139
6.2.7. Primeri uspešnih kmetijsko-biotehnoloških podjetniških pobud ... 140
6.3. Zaključek ... 143
Onkraj laboratorijske mize ... 143
Zadnji poziv k ukrepanju za biotehnologa prihodnosti v času podnebnih sprememb ... 143
Kaj je ta priročnik želel doseči? ... 144
Kmetijski biotehnolog kot soustvarjalec podnebnih rešitev ... 144
Nekaj besed o negotovosti – in zakaj je pomembna ... 145
Vaša vloga v evropskem zelenem prehodu ... 145
Viri ... 147

Kratice

Preglednica 1. Kratice

Kratica	Polni zapis
ACC	1-Aminociklopropan-1-karboksilat (deaminaza)
ACE	Action for Climate Empowerment (Ukrepanje za krepitev podnebne ozaveščenosti in usposobljenosti – pobuda OZN)
AD-bMSC	Adipose-Derived Bovine Mesenchymal Stem Cell (Goveje mezenhimske matične celice, pridobljena iz maščobnega tkiva)
AI	Umetna inteligenca
AMF	Arbuskularne mikorizne glive
ARSO	Agencija Republike Slovenije za okolje
ATP	Adenozin trifosfat
BIQ	Bio-inteligenčni količnik (označuje prvo zgradbo na svetu z bioreaktivno fasado, ki jo poganjajo alge)
Bio-CCU	Biotehnologija za zajem in uporabo ogljika
BNF	Biološka vezava dušika
bMSC	Goveja mezenhimska matična celica
CAM	Crassulacean Acid Metabolism (tip fotosinteze značilen nekatere na sušo bolj prilagojene rastline)
CAN	Kalcijev amonijev nitrat
CAP	Skupna kmetijska politika v EU
CBE JU	Skupno podjetje Krožna bioosnovana Evropa
CCM	Mehanizem koncentriranja ogljika (Carbon Concentrating Mechanism)
CCS	Zajemanje in shranjevanje ogljika (Carbon Capture and Storage)
CCU	Zajemanje in uporaba ogljika (Carbon Capture and Utilisation)
CDR	Odstranjevanje ogljikovega dioksida (Carbon Dioxide Removal)
CETCH	Cikel krotonil-CoA / etilmalonil-CoA / hidroksibutiril-CoA
CH_4	Metan
CMC 7	Kategorija sestavnih materialov 7, ki se nanaša na EU uredbo o gnojilih (mikroorganizmi)

Kratica	Polni zapis
CO_2	Ogljikov dioksid
CRISPR	Zbrane pravilno medsebojno razporejene kratke palindromske ponovitve – tehnika za gensko urejanje (Clustered Regularly Interspaced Palindromic Repeats)
DAC	Neposredno zajemanje CO_2 iz zraka (Direct Air Capture)
DHMZ	Hrvaški državni hidrometeorološki zavod
EACEA	Evropska izvajalska agencija za izobraževanje in kulturo (European Education and Culture Executive Agency)
ECM	Zunajcelični matriks (Extracellular Matrix)
ECR	Enoil-CoA karboksilaza/reduktaza
EM	Efektivni mikroorganizmi (Effective Microorganisms)
ESA	Evropska vesoljska agencija (European Space Agency)
ETC	Elektronska transportna veriga (Electron Transport Chain)
EU	Evropska unija
FAO	Organizacija Združenih narodov za prehrano in kmetijstvo (Food and Agriculture Organization of the United Nations)
FBS	Fetalni goveji serum (Fetal Bovine Serum)
FDA	Uprava za hrano in zdravila ZDA (Food and Drug Administration, United States)
G3P	Gliceraldehid-3-fosfat
GHG	Toplogredni plin
GIS	Geografski informacijski sistemi
GMO / GM	Genetsko spremenjen (modificiran) organizem
HBA	Akceptor vodikove vezi (Hydrogen Bonding Acceptor)
HBD	Donor vodikove vezi (Hydrogen Bonding Donor)
HNMS	Grška nacionalna meteorološka služba (Hellenic National Meteorological Service)
HPI	Pobuda za koriščanje potenciala rastlin (Harnessing Plants Initiative – Salk Institute)
IAA	Indol-3-ocetna kislina
IEA	Mednarodna agencija za energijo (International Energy Agency)

Kratica	Polni zapis
IoT	Internet stvari (Internet of Things)
IPBES	Medvladna platforma za biotsko raznovrstnost in ekosistemske storitve (Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services)
IPCC	Medvladni odbor za podnebne spremembe (Intergovernmental Panel on Climate Change)
LAB	Mlečnokislinske bakterije
LCA	Analiza življenjskega cikla (Life Cycle Assessment / Life Cycle Analysis)
LC	Lignoceluloza (Biomasa)
MeSH	Medicinske predmetne oznake (Medical Subject Headings)
MICP	Mikrobno povzročeno izločanje kalcita (Microbially Induced Calcite Precipitation)
N	Dušik
N_2O	Didušikov oksid
NADES	Naravna globoka evtektična topila (Natural Deep Eutectic Solvents)
NASA	Nacionalna uprava za aeronavtiko in vesolje v ZDA (National Aeronautics and Space Administration)
NADP+/NADPH	Nikotinamid adenin dinukleotid fosfat (oksidirana/reducirana oblika)
NCEI	Nacionalni centri za okoljske informacije (National Centres for Environmental Information)
NDVI	Normalizirani indeks razlik v vegetaciji (Normalised Difference Vegetation Index)
NEO	NASA opazovanja Zemlje (NASA Earth Observations)
NREL	Nacionalni laboratorij za obnovljivo energijo v ZDA (National Renewable Energy Laboratory)
NUE	Učinkovitost izrabe dušika (Nitrogen Use Efficiency)
OECD	Organizacija za gospodarsko sodelovanje in razvoj
P	Fosfor
PBL	Problemsko osnovano učenje (Problem-Based Learning)
PBR	Fotobioreaktor (Photobioreactor)
PEP	Fosfoenolpiruat (Posphoenolpyruvate)

Kratica	Polni zapis
PFC 6	Kategorija sestavnih materialov 6, ki se nanaša na EU uredbo o gnojilih (biostimulanti)
2-PG	2-fosfoglikolat
3-PGA	3-fosfoglicerat
PGPB	Bakterije, ki spodbujajo rast rastlin (Plant Growth-Promoting Bacteria)
PGPF	Glive, ki spodbujajo rast rastlin (Plant Growth-Promoting Fungi)
PGPR	Rizobakterije, ki spodbujajo rast rastlin (Plant Growth-Promoting Rhizobacteria)
PHA	Polihidrksialkanoat
PLA	Polimlečna kislina (Polylactic Acid)
PSI	Fotosistem I (Photosystem I)
PSII	Fotosistem II (Photosystem II)
R&D	Raziskave in razvoj (Research and Development)
Rubisco	Ribuloza-1,5-bisfosfat karboksilaza/oksidaza
RuBP	Ribuloza-1,5-bisfosfat
SC-CO_2	Superkritični ogljikov dioksid
SCF	Superkritična tekočina (Supercritical Fluid)
SCP	Beljakovine iz enoceličnih organizmov – mikroorganizmov (Single-Cell Protein)
SCFA	Kratkoverižne maščobne kisline (Short-Chain Fatty Acids)
SDG	Cilj trajnostnega razvoja (Sustainable Development Goal)
Smart-MIP	Integrirani precizni sistem na osnovi mikroorganizmov in senzorjev (Microbial- and Sensor-Based Integrated Precision, system)
SOC	Organski ogljik v tleh (Soil Organic Carbon)
SPAD	Indeks vsebnosti klorofila (Soil Plant Analysis Development – chlorophyll meter reading/index)
TEA	Tehno-ekonomska analiza (Techno-Economic Analysis)
TIBTEC	Trendi v biotehnologiji (Trends in Biotechnology)
TRL	Stopnja tehnološke razvitosti (Technological Readiness Level)
TÜİK	Turški statistični inštitut

Kratica	Polni zapis
UAV	Brezpilotni zrakoplov ali dron (Unmanned Aerial Vehicle)
UNFCCC	Okvirna konvencija Združenih narodov o spremembi podnebja (United Nations Framework Convention on Climate Change)
WUE	Učinkovitost izrabe vode (Water Use Efficiency)

Slovar

Preglednica 2. Glossary

MODULI	POJEM	RAZLAGA
POGLAVJE 1		
1	Mikrobiom (Microbiome)	Združba mikroorganizmov (bakterij, gliv, virusov in arhej) ter njihov genetski material, prisoten v določenem okolju, skupaj z medsebojnimi interakcijami in interakcijami z okoljem.
2	Biognojilo (Biofertilizer)	Pripravek, ki vsebuje žive mikroorganizme in ob nanosu na semena, rastline ali tla spodbuja rast rastlin s povečanjem dostopnosti hranil.
3	Fermentacija (Fermentation)	Presnovni proces, pri katerem mikroorganizmi v anaerobnih ali delno aerobnih razmerah pretvarjajo sladkorje in druge organske spojine v produkte, kot so alkoholi, kisline ali plini.
4	Sekvestracija ogljika (Carbon sequestration)	Proces zajema in dolgoročnega shranjevanja atmosferskega ogljikovega dioksida (CO_2) v rastlinah, tleh, geoloških formacijah ali oceanih z namenom blaženja podnebnih sprememb.
5	Beljakovine iz enoceličnih organizmov (Single-cell protein, SCP)	Beljakovine, pridobljene z gojenjem mikroorganizmov (bakterij, kvasovk ali mikroalg) na cenovno ugodnih substratih, ki predstavljajo alternativni vir beljakovin.
6	Vezava dušika (Nitrogen fixation)	Biološki proces, pri katerem se atmosferski dušik (N_2) pretvarja v amonijak ali sorodne spojine, dostopne rastlinam. Proces izvajajo predvsem določene bakterije in arheje.
7	Metanogene arheje (Methanogenic archaea)	Mikroorganizmi iz domene arhej, ki pri svoji presnovi proizvajajo metan. Pogosto jih najdemo v prebavilih prežvekovalcev in drugih anaerobnih okoljih.
8	Gojeno meso (Cultured meat)	Meso, proizvedeno z gojenjem živalskih celic v nadzorovanih laboratorijskih ali industrijskih pogojih brez reje in zakola živali.
9	Emisje toplogredih plinov (Greenhouse gas (GHG) emissions)	Izpusti plinov, kot so ogljikov dioksid (CO_2), metan (CH_4) in didušikov oksid (N_2O), v ozračje, kjer prispevajo k globalnemu segrevanju in podnebnim spremembam.
10	Anaerobna razgradnja (Anaerobic digestion)	Biološki proces razgradnje organske snovi brez prisotnosti kisika, pri katerem mikroorganizmi proizvajajo bioplin in s hranili bogat digestat.
11	Starter (začetna) kultura (Starter culture)	Pripravek z izbranimi mikroorganizmi, namenjen sprožitvi fermentacijskih procesov pri proizvodnji živil ter zagotavljanju enakomerne kakovosti in varnosti izdelkov.
12	Odpornost Sistema (Resilience)	Sposobnost sistema, da prenese okoljske motnje, se prilagaja dolgoročnim spremembam in ohranja svoje ključne funkcije kljub stresnim razmeram.
13	Bioplin (Biogas)	Obnovljivo gorivo, nastalo pri anaerobni razgradnji (digestiji) organske snovi, ki ga sestavljata predvsem metan in ogljikov dioksid.

14	Nosilec za rast celic (Scaffold)	Tridimenzionalna struktura, ki v tkivnem inženirstvu omogoča pritrjevanje, rast in diferenciacijo celic ter je ključna pri proizvodnji gojenega mesa.
15	Polihidroksialkanoati (PHA) (Polyhydroxyalkanoates)	Biorazgradljive bioplastike, ki jih mikroorganizmi proizvajajo kot zalogo energije in predstavljajo trajnostno alternativo plastiki na osnovi fosilnih virov.
POGLAVJE 2		
1	Biorafinerija (Biorefinery)	Obrat, ki združuje različne procese in tehnologije za pretvorbo biomase v goriva, energijo ter kemikalije in druge proizvode z dodano vrednostjo iz obnovljivih bioloških virov.
2	Krožno biogospodarstvo (Circular bioeconomy)	Gospodarski model, ki povezuje načela krožnega gospodarstva in biogospodarstva ter temelji na trajnostni rabi obnovljivih bioloških virov in pretvarjanju odpadkov v nove vire.
3	Biomasa (Biomass)	Organska snov rastlinskega, živalskega ali mikrobnega izvora, ki se lahko uporablja kot obnovljiv vir energije ali kot surovina za proizvodnjo bioloških proizvodov.
4	Lignocelulozna biomasa (Lignocellulosic biomass)	Rastlinski material, sestavljen predvsem iz celuloze, hemiceluloze in lignina, kot so les, kmetijski ostanki in energetske rastline.
5	Encimska hidroliza (Enzymatic hydrolysis)	Proces razgradnje kompleksnih molekul v enostavnejše spojine s pomočjo specifičnih encimov; pogosto se uporablja za pretvorbo celuloze v fermentabilne sladkorje.
6	Valorizacija (Valorization)	Proces pretvarjanja odpadkov ali stranskih produktov v koristne proizvode z dodano vrednostjo, pri čemer se hkrati zmanjšuje vpliv na okolje.
7	Analiza življenjskega cikla (Life Cycle Assessment, LCA)	Sistematična metoda za vrednotenje vplivov proizvoda, procesa ali storitve na okolje skozi celoten življenjski cikel – od pridobivanja surovin do končne odstranitve.
8	Tehno-ekonomska analiza (Techno-economic analysis)	Metoda vrednotenja, ki združuje analizo tehnične učinkovitosti in ekonomsko oceno za določanje izvedljivosti in gospodarnosti procesa ali tehnologije.
9	Predobdelava (Pretreatment)	Fizikalni, kemijski ali biološki postopki, s katerimi se razgradi kompleksna struktura biomase in poveča dostopnost njenih sestavin za nadaljnjo pretvorbo.
10	Bioplastika (Bioplastics)	Plastika, pridobljena iz obnovljivih bioloških virov ali zasnovana tako, da je biorazgradljiva, ter predstavlja trajnostnejšo alternativo plastiki na osnovi fosilnih virov
11	Kaskadna predelava biomase (Cascade processing)	Strategija, pri kateri se biomasa zaporedno predeluje v več različnih proizvodov, pri čemer imajo prednost uporabe z višjo dodano vrednostjo pred energijsko izrabo.
12	Evropski zeleni dogovor (European Green Deal)	Celovita strategija Evropske unije, katere cilj je doseči podnebno nevtralnost Evrope do leta 2050 s trajnostnim gospodarskim razvojem in zmanjševanjem vplivov na okolje.
13	Strategija »od vil do vilic« (Farm to Fork Strategy)	Politika Evropske unije, usmerjena v trajnostno kmetijstvo, zmanjševanje izgub in odpadne hrane ter oblikovanje trajnostnega prehranskega sistema kot dela Evropskega zelenega dogovora.
14	Polimlečna kislina (PLA)	Biorazgradljiv polimer, pridobljen iz obnovljivih virov, kot je koruzni škrob,

	(Polylactic acid)	ki se uporablja pri proizvodnji embalaže, tekstila in v biomedicinskih aplikacijah.
15	Industrijska simbioza (Industrial symbiosis)	Sodelovalni pristop, pri katerem odpadki ali stranski produkti enega industrijskega procesa služijo kot surovina za drugi proces, s čimer nastajajo krožni proizvodni sistemi.
POGLAVJE 3		
1	Rastlinski holobiont (Plant holobiont)	Rastlina skupaj z vsemi povezanimi mikrobnimi združbami, obravnavana kot ena funkcionalna ekološka enota.
2	Rastlinski mikrobiom (Plant microbiome)	Združba mikroorganizmov, povezanih z rastlino, vključno z bakterijami, glivami, arhejami, virusi in drugimi mikroskopskimi organizmi, ki naseljujejo korenine, nadzemne dele in notranja tkiva rastline.
3	Talni mikrobiom (Soil microbiome)	Raznolika združba mikroorganizmov v tleh, ki sodeluje pri kroženju hranil, ohranjanju rodovitnosti tal, rasti rastlin in delovanju ekosistemov.
4	Rizosfera (Rhizosphere)	Območje tal pod neposrednim vplivom korenin, kjer potekajo intenzivne interakcije med koreninami, mikroorganizmi in talnimi sestavinami.
5	Rizoplan (Rhizoplane)	Površina korenine, ki predstavlja neposredno stičišče med rastlino in okoliškimi tlemi.
6	Filosfera (Phyllosphere)	Nadzemni deli rastline, zlasti listi in stebla, ki predstavljajo življenjski prostor za mikrobne združbe.
7	Endofit (Endophyte)	Mikroorganizem, ki živi znotraj rastlinskih tkiv, ne da bi pri tem nujno povzročal bolezen.
8	Diazotrof (Diazotroph)	Mikroorganizem, sposoben vezave atmosferskega dušika v rastlinam dostopne oblike.
9	Biološka vezava dušika (Biological nitrogen fixation)	Mikrobni proces, pri katerem se atmosferski dušik (N_2) pretvarja v amonijak in druge rastlinam dostopne oblike dušika.
10	Biognojilo (Biofertiliser)	Proizvod, ki vsebuje žive mikroorganizme in izboljšuje dostopnost ali privzem hranil pri rastlinah.
11	Biostimulant (Biostimulant)	Snov ali mikroorganizem, ki se uporablja za izboljšanje učinkovitosti rabe hranil, odpornosti na stres, kakovosti pridelka ali dostopnosti hranil, ne glede na vsebnost hranil.
12	Mikrobni konzorciji (Microbial consortia)	Mešanice več mikroorganizmov s komplementarnimi funkcijami, ki podpirajo rast rastlin, delovanje tal ali odpornost na stres.
13	Efektivni mikroorganizmi (Effective Microorganisms, EM)	Komercialni koncept mešanih mikrobnih inokulantov, ki običajno vključujejo mlečnokislinske bakterije, fotosintetske bakterije, kvasovke in druge koristne mikroorganizme.
14	Arbuskul (Arbuscule)	Močno razvejana glivna struktura, ki jo arbuskularne mikorizne glive tvorijo v kortikalnih celicah korenin in predstavlja glavno mesto izmenjave hranil med rastlino in glivo.
15	Vezikel (Vesicle)	Založna struktura, ki jo nekatere arbuskularne mikorizne glive tvorijo znotraj ali med celicami korenin.
POGLAVJE 4		
1	Antropogeni (Anthropogenic)	Onesnaževanje okolja in emisije toplogrednih plinov, ki neposredno izvirajo iz človekovih dejavnosti.

2	Biobeton (Bio-Concrete)	Trajnostni gradbeni material, ki nastane z biološkim izločanjem kalcita s pomočjo ureolitičnih bakterij in lahko deluje kot ponor ogljika.
3	Biopolimer (Biopolymer)	Naravno prisotna kompleksna makromolekula, ki jo proizvajajo živi organizmi, na primer suberin, in je pogosto zelo odporna proti razgradnji.
4	Calvin-Bensonov cikel (Calvin-Benson Cycle)	Od svetlobe neodvisni del fotosinteze, pri katerem se energija ATP in NADPH uporablja za vezavo atmosferskega CO_2 v organske sladkorje.
5	Odstranjevanje ogljikovega dioksida (Carbon Dioxide Removal, CDR)	Namerno in obsežno odstranjevanje ogljikovega dioksida iz ozračja za doseganje "negativnih" emisij.
6	Karboksisomi (Carboxysomes)	Specializirani beljakovinski predelki v cianobakterijah, ki vsebujejo encim Rubisco in ustvarjajo okolje z visoko koncentracijo CO_2 za učinkovitejšo vezavo ogljika.
7	Neposredno zajemanje CO_2 iz zraka (Direct Air Capture, DAC)	Tehnološki postopki za zajemanje ogljikovega dioksida neposredno iz ozračja, pogosto z namenom njegovega dolgoročnega shranjevanja.
8	Evapotranspiracija	Skupni proces izhlapevanja vode s tal in drugih površin ter transpiracije rastlin, ki prispeva k hlajenju okolja.
9	Analiza življenjskega cikla (Life Cycle Assessment, LCA)	Celovita metoda za vrednotenje vplivov proizvoda, procesa ali storitve na okolje skozi celoten življenjski cikel.
10	Mikrobno povzročeno izločanje kalcita (Microbially Induced Calcite Precipitation, MICP)	Biokemijski proces, pri katerem bakterije povzročijo izločanje kalcijevega karbonata zaradi razgradnje sečnine in zvišanja pH.
11	Negativne emisije (Negative Emissions)	Stanje, ko količina toplogrednih plinov, odstranjenih iz ozračja, presega količino izpuščenih plinov v določenem obdobju.
12	Fotobioreaktor (Photobioreactor, PBR)	Nadzorovan sistem za gojenje mikroalg ali cianobakterij, v katerem so optimirani svetloba, hranila in dovod CO_2.
13	Fotorespiracija (Photorespiration)	Presnovni proces pri rastlinah, ki nastane, ko encim Rubisco veže kisik namesto CO_2, kar povzroči izgubo že vezanega ogljika in energije.
14	Odpornost proti razgradnji (Recalcitrance)	Kemijska in fizikalna odpornost biološke spojine na encimsko ali mikrobno razgradnjo.
15	Rizosfera (Rhizosphere)	Ozko območje tal v neposredni bližini korenin, na katerega močno vplivajo koreninski izločki in v katerem živijo številne mikrobne združbe
16	Rubisco	Ključni encim za vezavo ogljika v biosferi, ki katalizira vezavo CO_2 na ribuloza-1,5-bisfosfat.
17	Suberin	Kompleksen hidrofoben in proti razgradnji odporen biopolimer v celičnih stenah rastlin, pomemben za dolgoročno skladiščenje ogljika v tleh.
18	Sintzna biologija (Synthetic Biology)	Interdisciplinarno področje, ki vključuje načrtovanje in preoblikovanje organizmov za pridobitev novih lastnosti ali funkcij.
19	Tehno-ekonomska analiza (Techno-Economic Analysis, TEA)	Metodološki pristop za vrednotenje tehnične izvedljivosti in ekonomske upravičenosti procesov ali tehnologij.

POGLAVJE 5		
1	Fitoremediacija (Phytoremediation)	Uporaba rastlin za odstranjevanje, stabilizacijo ali pretvorbo onesnaževal v tleh, vodi ali zraku.
2	Bioremediacija (Bioremediation)	Uporaba živih organizmov za razgradnjo ali nevtralizacijo onesnaževal in obnovo onesnaženih okolij.
3	Na naravi temelječe rešitve (Nature-based solutions)	Ukrepi za zaščito, trajnostno upravljanje ali obnovo ekosistemov ob hkratnem reševanju družbenih izzivov.
4	Predsetvena obdelava semen (Seed priming)	Obdelava semen pred setvijo s fizikalnimi, kemijskimi ali biološkimi dejavniki za izboljšanje kalitve, vitalnosti in odpornosti na stres.
5	Fitoekstrakcija (Phytoextraction)	Fitoremediacijska tehnika, pri kateri rastline privzemajo in kopičijo onesnaževala v nadzemnih delih.
6	In vitro kultura	Gojenje rastlinskih celic, tkiv ali organov v sterilnih in nadzorovanih laboratorijskih razmerah.
7	Mikropropagacija	Tehnika tkivnih kultur za hitro pridobivanje velikega števila genetsko enakih rastlin.
8	Somatska embriogeneza (Somatic embryogenesis)	Tvorba zarodkov iz somatskih rastlinskih celic za množično razmnoževanje rastlin.
9	Hiperakumulator (Hyperaccumulator)	Rastlinska vrsta, ki lahko kopiči izjemno visoke koncentracije kovin ali drugih onesnaževal brez znakov toksičnosti.
10	Krioprezervacija (Cryopreservation)	Dolgoročno shranjevanje biološkega materiala pri ultra nizkih temperaturah.
11	Biopriming	Obdelava semen s koristnimi mikroorganizmi za izboljšanje kalitve, rasti in odpornosti rastlin.
12	ACC deaminaza	Encim, ki zmanjšuje koncentracijo etilena, povezanega s stresom, in tako podpira rast rastlin v neugodnih razmerah.
13	Fitostabilizacija (Phytostabilization)	Fitoremediacijski pristop, pri katerem rastline zmanjšujejo mobilnost in dostopnost onesnaževal v tleh.
14	Rizofiltracija (Rhizofiltration)	Uporaba korenin rastlin za privzemanje in odstranjevanje onesnaževal iz vodnih raztopin.
15	Zunajcelični polimeri (Extracellular polymers)	Snovi, ki jih mikroorganizmi izločajo izven svojih celic in prispevajo k stabilnosti talnih agregatov ter zadrževanju vode.
POGLAVJE 6		
1	Podnebne inovacije (Climate innovation)	Razvoj in uvajanje novih tehnologij, proizvodov ali pristopov za reševanje izzivov podnebnih sprememb.
2	Izvedljivost (Feasibility)	Ocena, ali je idejo ali tehnologijo mogoče praktično uresničiti glede na časovne, tehnične in finančne omejitve.
3	Razširljivost (Scalability)	Sposobnost procesa, tehnologije ali poslovnega modela, da se zanj poveča obseg delovanja ob ohranjanju učinkovitosti in ekonomske upravičenosti.
4	Vrednostna veriga (Value chain)	Celoten niz dejavnosti od zasnove proizvoda do njegove dostave končnemu uporabniku.
5	Zagonsko podjetje (Startup)	Novo podjetje, običajno usmerjeno v razvoj inovativnih in razširljivih proizvodov ali storitev.

6	Prečne kompetence / prenosljive spretnosti (Transversal skills)	Prenosljive spretnosti, uporabne na različnih področjih dela, kot so kritično razmišljanje, komunikacija, sodelovanje in prilagodljivost.
7	Snovalsko razmišljanje (Design thinking)	Metodologija reševanja problemov, ki temelji na razumevanju uporabnika, opredelitvi problema, oblikovanju idej, prototipiranju in testiranju.
8	Kombinirano učenje (Blended learning)	Učni pristop, ki združuje neposredno poučevanje in spletne učne aktivnosti.
9	Regulativni okvir (Regulatory framework)	Sistem zakonodaje, smernic in standardov, ki urejajo razvoj, odobritev in trženje proizvodov.
10	Zeleno biogospodarstvo (Green bioeconomy)	Gospodarski sistem, ki temelji na trajnostni proizvodnji in uporabi bioloških virov ter spodbuja kroženje snovi in varovanje okolja.
11	Dokaz koncepta (Proof of concept)	Začetna potrditev, da ima ideja ali tehnologija praktičen potencial za nadaljnji razvoj.
12	Pilotno merilo (Pilot scale)	Vmesna stopnja med laboratorijskimi raziskavami in industrijsko proizvodnjo.
13	Interdisciplinarno sodelovanje (Interdisciplinary collaboration)	Sodelovanje med različnimi strokovnimi področji pri reševanju kompleksnih problemov.
14	Zaposljivost (Employability)	Skupek znanj, spretnosti in osebnostnih lastnosti, ki posamezniku omogočajo pridobitev in ohranjanje zaposlitve
15	Prototip (Prototype)	Zgodnji model ali različica proizvoda, namenjena preizkušanju idej pred končnim razvojem.

Uvod

Podnebne spremembe niso več zgolj tema razprav svetovne skupnosti – živimo jih vsak dan. V zadnjih letih so ekstremni vremenski pojavi postali nekaj običajnega, od dolgotrajnih suš v delih Afrike in Evrope do poplav, ki presegajo zmogljivosti nekoč odporne infrastrukture. Ti pojavi niso več oddaljene možnosti, temveč vsakodnevna resničnost, ki ogroža pridelavo hrane, gospodarstvo in dobrobit ljudi (Brummer in sod., 2011; poskusi pridelave jare pšenice v sušnih razmerah jasno kažejo na nujnost ukrepanja). Sočasno delovanje okoljskih pritiskov, dvigovanja morske gladine, degradacije ekosistemov in nepredvidljivih vremenskih vzorcev zahteva rešitve, ki presegajo meje posameznih disciplin in tradicionalnih znanstvenih pristopov.

Sodobne biotehnološke metode raziskovalcem omogočajo razvoj rastlin, ki tudi v sušnih razmerah ohranjajo pridelek zaradi izboljšanega koreninskega sistema in učinkovitejših mehanizmov odziva na stres (Tenorio Berrío in sod., 2022). Hkrati je znano, da lahko nekateri mikroorganizmi pomembno izboljšajo privzem vode in odpornost rastlin v sušnih razmerah (Santander in sod., 2024). Gre za oprijemljive in merljive inovacije, ki dokazujejo, da je mogoče biološke sisteme uporabiti za praktično in trajnostno blaženje posledic podnebnih sprememb. Takšni pristopi so skladni s širšim znanstvenim soglasjem, da ima biotehnologija ključno vlogo pri prilagajanju na podnebne spremembe (Leiva in sod., 2025).

Ta študentski priročnik je bil zasnovan prav z mislijo na tovrstne aplikacije in je namenjen predvsem študentom višjih letnikov biotehnologije. Nagovarja vas kot bodoče strokovnjake, ki želite akademsko znanje pretvoriti v konkretne ukrepe za blaženje podnebnih sprememb ter krepitev odpornosti družbe. Namesto da bi biotehnologijo obravnaval kot izolirano znanstveno področje, jo umešča na stičišče okoljskih ved, politik, inovacij in podjetništva – tja, kjer nastajajo rešitve z največjim družbenim učinkom. Cilj priročnika je spodbuditi razvoj generacije biotehnologov, ki razmišljajo sistemsko, inovirajo odgovorno in delujejo z jasnim namenom, bodisi v laboratorijskih raziskavah, oblikovanju politik ali podjetniških pobudah.

To poslanstvo odraža tudi projekt BIOSHIELD, financiran v okviru programa Erasmus+ Evropske unije, ki povezuje visokošolske ustanove in organizacijo s področja izobraževalnih tehnologij iz Evrope in Turčije z namenom premostitve vrzeli med tradicionalnim izobraževanjem na področju biotehnologije in dejanskimi podnebnimi izzivi. Eden ključnih dosežkov projekta BIOSHIELD je razvoj visokošolskega učnega načrta, ki študentom omogoča razumevanje in praktično uporabo podnebno usmerjenih biotehnoloških inovacij. Učni načrt vključuje module, ki neposredno obravnavajo trajnost in odpornost pridelovalnih sistemov ter predstavljajo primer sistemskega učenja, povezanega z resničnimi izzivi sodobnega sveta.

V priročniku boste našli študije primerov, ki temeljijo na aktualnih raziskavah in industrijski praksi, inovacijske scenarije, namenjene spodbujanju ustvarjalnega razmišljanja, ter refleksivne naloge za krepitev kritičnega razmišljanja in sposobnosti reševanja problemov. Vsako poglavje je zasnovano tako, da podpira samostojno in skupinsko učenje, saj se zavedamo, da lahko biotska raznovrstnost, podnebne politike in trajnostna biotehnologija uspevajo le ob upoštevanju različnih pogledov ter interdisciplinarnem sodelovanju.

Med prebiranjem priročnika imejte v mislih, da najpomembnejše inovacije pogosto nastanejo prav na stičiščih – tam, kjer se biologija sreča z inženirstvom, znanost z družbo in znanje z empatijo. Prav to je duh, ki ga želi spodbujati projekt BIOSHIELD: ne le izobraževati študente, temveč oblikovati nosilce sprememb, pripravljene na dejavno soustvarjanje zelenega biogospodarstva prihodnosti.

Učna zasnova za inovacijsko usmerjeno izobraževanje na področju biotehnologije

Učinkovito izobraževanje na področju biotehnologije za podnebno ukrepanje zahteva več kot zgolj poučevanje ustreznih pojmov, metod in laboratorijskih tehnik. Zahteva tudi učne izkušnje, ki študentom pomagajo razmišljati kot reševalcev problemov, povezovati različna znanja, delovati v razmerah negotovosti in oblikovati rešitve, ki imajo pomen tudi zunaj predavalnice. Zato priročnik temelji na nizu medsebojno dopolnjujočih se učnih načel, katerih cilj je krepitev inovativnosti, sistemskega razmišljanja in prilagodljivega odločanja.

V središču našega pristopa je učenje na osnovi problemov (Problem-Based Learning – PBL). Vsako poglavje predstavlja resnične izzive, navdihnjene s podnebnimi spremembami in tveganji naravnih nesreč, ter študente spodbuja k reševanju kompleksnih problemov, ki le redko ponujajo en sam »pravilen« odgovor. Namesto že pripravljenih rešitev vas bo priročnik spodbujal, da prepoznate, česa še ne veste, poiščete ustrezne dokaze, preverite svoje predpostavke in postopoma izboljšujete svoje zamisli. Takšen pristop odraža način dela v praksi, kjer napredek temelji na ponavljajočem se procesu izboljšav, sodelovanju in učenju skozi izkušnje.

Poleg tega vključuje priročnik v prihodnost usmerjeno razmišljanje (Future-Oriented Thinking), ki spodbuja radovednost glede prihodnjih izzivov in priložnosti. Podnebne spremembe niso statičen problem s stalnim naborom rešitev; nenehno se spreminjajo, enako pa velja za tehnologije in strategije, namenjene njihovemu reševanju. V posameznih poglavjih boste zato usmerjeni k razmišljanju o prihodnjih tveganjih, novih trendih in možnostih razvoja biotehnologije ter o tem, kako lahko te novosti prispevajo k učinkovitim podnebnim rešitvam.

Učne aktivnosti so zasnovane tudi z vidika inovacijskega in prototipnega razmišljanja (Innovation and Prototyping Mindset). Spodbujajo vas k prehodu od idej do zgodnjih razvojnih rešitev skozi oblikovanje zamisli, razvoja konceptov in presoje njihove izvedljivosti. Pri tem se rešitve ne vrednotijo zgolj glede na njihovo tehnično ustreznost, temveč tudi z vidika stroškov, zakonodajnih zahtev, pogojev izvedbe in družbene sprejemljivosti. Inovacija je tako razumljena kot nekaj, kar mora delovati v praksi in ne zgolj na papirju.

Priročnik daje velik poudarek tudi razvoju prečnih kompetenc (Transversal Skills Development), saj učinkovito podnebno ukrepanje zahteva več kot le strokovno znanje. Aktivnosti so zasnovane tako, da razvijajo kritično razmišljanje, trajnostno naravnanost, sodelovalne spretnosti, komunikacijo in podjetniški način razmišljanja. Te kompetence pomagajo pri delovanju v resničnem okolju deležnikov, kjer na znanstvene odločitve vplivajo institucije, skupnosti, politični okviri in interdisciplinarno sodelovanje.

Namen in obseg priročnika

Osnovni namen tega priročnika je predstaviti vlogo biotehnologije pri soočanju s podnebnimi spremembami in zmanjševanju tveganj, povezanih z naravnimi nesrečami. Priročnik vam pomaga pridobiti jasno in poglobljeno razumevanje, kako lahko vaše strokovno področje dejavno prispeva k reševanju pomembnih globalnih izzivov. Pri tem obravnava znanstvena izhodišča, praktične aplikacije in nove priložnosti na področju podnebno usmerjene biotehnologije.

Poleg pridobivanja znanja namenja priročnik velik poudarek razvoju ključnih kompetenc, ki jih boste kot prihodnji strokovnjaki s področja biotehnologije potrebovali pri svojem delu. S pomočjo vsebin boste razvijali način razmišljanja in strateški pogled, ki vam bo omogočil analizo kompleksnih okoljskih izzivov z različnih vidikov, oblikovanje ustvarjalnih biotehnoloških rešitev, presojo njihove izvedljivosti in potencialnega vpliva ter učinkovito predstavitev teh idej različnim deležnikom. Priročnik spodbuja tudi podjetniški način razmišljanja, ki

omogoča pretvorbo raziskovalnih idej v praktične proizvode in storitve, namenjene razvoju trajnostnega zelenega biogospodarstva.

Vsebina je organizirana v šest tematskih poglavij, pri čemer se vsako osredotoča na specifično področje, kjer ima biotehnologija pomembno vlogo pri podnebnem ukrepanju. Prvo poglavje obravnava razvoj bioosnovanih materialov za trajnostne in na nesreče odporne sisteme ter prikazuje, kako lahko biotehnologija ponudi alternative materialom izdelanih na osnovi fosilnih virov in hkrati prispeva k večji odpornosti infrastrukture. Drugo poglavje se posveča krožnemu biogospodarstvu in zmanjševanju odpadkov ter prikazuje, kako je mogoče odpadne tokove s pomočjo biotehnoloških procesov pretvoriti v koristne vire.

Tretje poglavje obravnava podnebno odporno kmetijstvo in prehransko varnost skozi proučevanje interakcij med rastlinami in mikrobiomom. Predstavlja koncept rastlinskega holobionta, pojasnjuje vpliv mikrobnih združb na uspešnost rastlin v različnih okoljskih in krajinskih razmerah ter povezuje rešitve, ki temeljijo na mikrobiomu, z enostavnimi poskusi in prostorsko analizo na osnovi geografskih informacijskih sistemov (GIS). Četrto poglavje predstavlja biotehnološke pristope za zajemanje in uporabo ogljika ter raziskuje, kako je mogoče biološke sisteme uporabiti za odstranjevanje ogljikovega dioksida iz ozračja in njegovo pretvorbo v koristne proizvode. Peto poglavje je posvečeno obnovi ekosistemov in predstavlja na naravi temelječe rešitve, podprte z dosežki sodobne biotehnologije.

Zadnje – šesto poglavje v priročniku, se osredotoča na inovacije, podjetništvo in karierne poti na področju podnebno usmerjene biotehnologije. Študentom ponuja orodja in poglede, potrebne za pretvorbo strokovnega znanja v uspešno poklicno pot ter družbeno koristne inovacije. V vseh poglavjih so dosledno vključene teme trajnosti, etike in družbene odgovornosti, s čimer priročnik spodbuja celovito in družbeno odgovorno

Podnebne spremembe, tveganja naravnih nesreč in vloga biotehnologije

Podnebne spremembe predstavljajo enega najkompleksnejših in najpomembnejših izzivov, s katerimi se sooča človeštvo v 21. stoletju. Po ugotovitvah Medvladnega odbora za podnebne spremembe (IPCC) obstajajo nedvoumni dokazi, da se Zemljino podnebje segreva ter da so človekove dejavnosti, zlasti emisije toplogrednih plinov, glavni vzrok opaženih sprememb od sredine 20. stoletja dalje (De Abreu in sod., 2022). Segrevanje podnebja se ne kaže zgolj v naraščanju povprečnih temperatur, temveč tudi v spremembah padavinskih vzorcev, pogostejših in intenzivnejših ekstremnih vremenskih pojavih, pospešenem dvigovanju morske gladine, zakisanju oceanov ter številnih vplivih na ekosisteme in biotsko raznovrstnost po vsem svetu (Wang in sod., 2023).

Ti podnebni odmiki ne povzročajo zgolj naraščanja povprečnih temperatur. Hkrati povečujejo že obstoječa tveganja naravnih nesreč in ustvarjajo nove ranljivosti. Obalne skupnosti so na primer zaradi dvigovanja morske gladine vse bolj izpostavljene nevihtnim valovom in poplavam, kar potrjujejo meritve plimovanja in satelitska opazovanja. Kmetijska območja se soočajo z večjim tveganjem za zmanjšanje ali izgubo pridelka zaradi dolgotrajnih suš, vročinskih valov in sprememb v razširjenosti škodljivcev. Višje temperature in spremenjeni padavinski vzorci povečujejo tudi občutljivost gozdov za požare, medtem ko se urbana območja spopadajo z učinki toplotnih otokov, obremenitvijo infrastrukture in večjo nevarnostjo poplav (Trenberth, 2010). Medsebojna povezanost teh tveganj pomeni, da lahko motnje v enem sistemu sprožijo posledice v drugih sistemih ter tako še povečajo družbene in okoljske vplive.

Biotehnologija ponuja zmogljiv in raznolik nabor orodij za obravnavanje tako vzrokov kot posledic podnebnih sprememb. Na področju blaženja podnebnih sprememb biotehnološki pristopi prispevajo k zmanjševanju emisij toplogrednih plinov in odstranjevanju ogljikovega dioksida iz ozračja (Edelenbosch in sod., 2024). Gensko

prilagojeni mikroorganizmi lahko na primer pretvarjajo CO_2 v biogoriva, biokemikalije in biomateriale ter tako odpadne tokove spreminjajo v koristne vire (Raza in sod., 2022). Izboljšani fotosintetski organizmi, kot so nekatere vrste alg in cianobakterij, lahko vežejo ogljik učinkoviteje kot njihovi naravni sorodniki, pri tem pa proizvajajo proizvode, kot so biogoriva in bioplastika (Sadvakasova, 2023).

Poleg blaženja podnebnih sprememb ima biotehnologija pomembno vlogo tudi pri prilagajanju nanje in zmanjševanju tveganj naravnih nesreč. Napredek na področju žlahtnjenja in genskega izboljševanja rastlin je omogočil razvoj sort z večjo odpornostjo na sušo, vročinski stres in škodljivce, kar je ključno za zagotavljanje prehranske varnosti v spreminjajočih se podnebnih razmerah (Kolur in sod., 2024). Orodja, kot je CRISPR/Cas9, omogočajo natančno urejanje genoma za razvoj takšnih odpornih rastlin. Podobno bioremediacijske tehnologije izkoriščajo specializirane mikroorganizme za obnovo ekosistemov, degradiranih zaradi onesnaženja ali ekstremnih dogodkov, s čimer pospešujejo njihovo obnovo in izboljšujejo ekosistemske storitve. Na področju materialov pa bioosnovani materiali, vključno z biokompoziti in biopolimeri, predstavljajo trajnostne alternative materialom fosilnega izvora ter lahko prispevajo k večji odpornosti sistemov v ekstremnih razmerah.

Pomembno je poudariti, da se vloga biotehnologije pri podnebnem ukrepanju ne omejuje zgolj na neposredne posege v okolje, temveč vključuje tudi spremljanje okolja, zgodnje opozarjanje in ocenjevanje stanja. Biosenzorji, ki lahko z visoko natančnostjo zaznavajo spremembe v okolju, omogočajo zgodnje odkrivanje onesnaženj, izbruhov bolezni ali stresa v ekosistemih. Molekularni označevalci in genomska orodja predstavljajo učinkovite metode za spremljanje razširjenosti vrst, ocenjevanje zdravja ekosistemov in načrtovanje naravovarstvenih ukrepov v času podnebnih sprememb. Genomski nadzor se na primer uporablja za hitro prepoznavanje podnebno pogojenih sprememb v populacijah povzročiteljev bolezni in škodljivcev, kar omogoča pravočasno in učinkovito ukrepanje (Brzozowski in Mazourek, 2018; Kumar in sod., 2024; Williams in sod., 2024).

Razumevanje kompleksnih povezav med podnebnimi spremembami, tveganji naravnih nesreč in biotehnologijo zahteva sistemski pristop, ki upošteva medsebojne povezave med okoljskimi, družbenimi in tehnološkimi dejavniki. Posledice podnebnih sprememb se ne pojavljajo ločeno, temveč se prepletajo z gospodarskimi strukturami, zmogljivostjo upravljanja in družbenimi neenakostmi, kar vpliva na dejanske posledice naravnih nesreč. Prav tako morajo biti biotehnološke rešitve načrtovane in izvajane ob upoštevanju njihovih širših družbenih, etičnih in okoljskih učinkov, da lahko dolgoročno prispevajo k odpornosti in trajnostnemu razvoju.

Izobraževalne tehnologije, ki podpirajo na inovacijah temelječe učenje

Na inovacijah temelječe učenje predstavlja pomemben premik v sodobnem izobraževanju, saj poudarja ustvarjalnost, reševanje problemov in praktično uporabo znanja za razvoj novih rešitev. Izobraževalne tehnologije imajo pri tem ključno vlogo, saj zagotavljajo orodja, ki študente vključujejo v aktivno raziskovanje, eksperimentiranje in sodelovanje. Med številnimi tehnološkimi orodji, ki so danes na voljo, so se animirani videoposnetki izkazali kot posebej učinkovito sredstvo za podporo inovacijskemu učenju. Če jih premišljeno vključimo v kombinirano učenje, lahko pomembno obogatijo tradicionalne učne procese ter študente bolje pripravijo na zahteve inovacijsko usmerjenega gospodarstva.

Animirani videoposnetki imajo v primerjavi s statičnimi slikami ali zgolj besedilnimi gradivi pomembno prednost, saj omogočajo prikaz procesov, ponazarjanje vzročno-posledičnih povezav in vizualizacijo pojavov, ki jih v resničnem okolju ni mogoče ali pa jih je zelo težko prikazati. To je še posebej pomembno pri inovacijskem učenju, kjer morajo študenti razumeti kompleksne sisteme, obravnavati različne perspektive in si predstavljati alternativne možnosti razvoja. Animacije lahko na primer nazorno prikažejo znanstvene procese na molekularni ravni ali pojave v zelo velikih prostorskih razsežnostih. Poleg tega kakovostno zasnovane izobraževalne animacije

upoštevajo načela teorije kognitivne obremenitve, saj informacije razdelijo v smiselne vsebinske enote in združujejo vizualne ter zvočne elemente za boljše razumevanje in pomnjenje.

Vključevanje animiranih videoposnetkov v kombinirano učenje ustvarja sinergijske učinke, ki izboljšajo tako spletne kot tudi neposredne oblike poučevanja. V modelih kombiniranega učenja lahko animacije služijo kot gradivo za pripravo pred srečanjem v živo v okviru pristopa obrnjene učilnice, kar študentom omogoča, da temeljne vsebine spoznajo v lastnem tempu še pred sodelovanjem pri aktivnostih, usmerjenih v uporabo znanja in razvoj inovacij. Med asinhronim spletnim učenjem imajo študenti dostop do knjižnic animacij, ki predstavljajo študije primerov, prikazujejo raziskovalne metode ali pojasnjujejo teoretične koncepte, povezane z njihovimi projekti. Takšne vsebine jih pripravijo na bolj aktivno sodelovanje pri sinhronih dejavnostih, bodisi na daljavo bodisi v živo, kjer lahko razvijajo inovativne rešitve, pridobivajo povratne informacije o prototipih ali sodelujejo v snovalskih izzivih.

Animirani videoposnetki imajo v projektu BIOSHIELD posebno vlogo, saj omogočajo pretvorbo zahtevnih biotehnoloških konceptov, kot so gensko urejanje s sistemom CRISPR, delovanje gensko spremenjenih mikroorganizmov ali biološki pristopi za zmanjševanje posledic naravnih nesreč, v vizualno razumljive učne vsebine. Ker je projekt osredotočen na reševanje podnebnih izzivov z biotehnologijo, animacije učinkovito prikazujejo nevidne molekularne procese, pojasnjujejo delovanje biotehnoloških rešitev v ekosistemih ter vizualizirajo posledice podnebnih sprememb in možne biološke rešitve. V okviru kombiniranega učnega pristopa projekta BIOSHIELD služijo animacije kot pomembna priprava na aktivnosti v okviru obrnjene učilnice, saj študentom omogočajo razumevanje temeljnih konceptov pred vključevanjem v raziskovalno delo, praktične aktivnosti in skupinsko reševanje problemov. Na ta način premoščajo vrzel med abstraktno znanstveno teorijo in praktično uporabo, povečujejo zanimanje za zahtevne vsebine, podpirajo različne učne stile ter opolnomočijo prihodnje strokovnjake s področja biotehnologije za razvoj inovativnih in na dokazih temelječih rešitev okoljskih izzivov.

Kako priročnik spodbuja razmišljanje, usmerjeno v prihodnost

Študentski priročnik BIOSHIELD je zasnovan tako, da študente biotehnologije pripravlja ne le na današnje izzive, temveč tudi na negotovosti v prihodnosti, ki jo bodo zaznamovale podnebne spremembe in nove poslovne priložnosti. S svojo zasnovo in učnim pristopom vas študente spodbuja k razmišljanju o prihodnosti, prilagajanju spremembam ter iskanju načinov, kako lahko današnje znanje odgovarja na potrebe jutrišnjega sveta.

Namesto da bi podnebne spremembe obravnaval kot statičen problem, jih priročnik predstavlja kot dinamičen proces, ki se razvija skupaj s tehnologijo in znanstvenim napredkom. Študentom omogoča, da presežejo zgolj pomnjenje informacij in začnejo razmišljati o tem, kako se bodo biotehnološke rešitve razvijale skozi čas ter kako jih bo mogoče uporabiti v novih okoliščinah.

Vsako tematsko poglavje vključuje v prihodnost usmerjene scenarije, ki spodbujajo uporabo obstoječega znanja v novih ali hipotetičnih situacijah. Študenti lahko tako razvijajo zamisli o tem, kako bi inovacije, kot so podnebno odporni materiali ali razširljivi sistemi za zajemanje ogljika, delovale v prihodnjih okoljskih in industrijskih razmerah.

Tehnološke inovacije so predstavljene tudi v okviru dejanskih političnih in tržnih okolij. S povezovanjem znanstvenih rešitev z evropskimi pobudami, kot je Evropski zeleni dogovor, ter s konkretnimi projekti iz prakse študenti pridobijo vpogled v to, kako raziskovalne ideje prehajajo iz laboratorija v družbo s pomočjo politik, podjetništva in sodelovanja z gospodarstvom.

Priročnik študente spodbuja, da postanejo dejavni soustvarjalci prihodnjih rešitev in ne zgolj pasivni prejemniki znanja. S poudarjanjem opolnomočenja, aktivnega sodelovanja in odgovornosti podpira razvoj strokovnjakov, ki bodo pripravljeni soustvarjati prihodnost biotehnologije ter pomembno prispevati k zelenemu prehodu.

Poglavje 1: Inovacije na področju biološko osnovane hrane in mikrobioma za podnebno odpornost

1.1. Podnebne spremembe in potreba po trajnostnih prehranskih sistemih

Podnebne spremembe predstavljajo enega največjih izzivov za svetovno prehransko varnost in stabilnost ekosistemov v 21. stoletju. Naraščajoče globalne temperature, spremenjeni vzorci padavin, vse pogostejši ekstremni vremenski dogodki, degradacija tal, zakisovanje oceanov in izguba biotske raznovrstnosti pomembno vplivajo na kmetijsko produktivnost ter prehransko verigo. Hkrati konvencionalni prehranski sistemi bistveno prispevajo k emisijam toplogrednih plinov (TGP) preko proizvodnje gnojil, emisij metana iz živinoreje, sprememb rabe zemljišč, intenzivnega namakanja ter energetsko zahtevne predelave in distribucije hrane. Prehranski sistemi so tako hkrati povzročitelji in žrtve podnebnih sprememb. Ta dvojna vloga poudarja nujno potrebo po strukturni preobrazbi v bolj trajnostne, krožne in odporne sisteme. Odpornost prehranskih sistemov pomeni sposobnost prenašanja okoljskih motenj, prilagajanja dolgoročnim podnebnim spremembam ter ohranjanja razpoložljivosti, dostopnosti in prehranske kakovosti hrane tudi v stresnih razmerah. Biološko osnovani prehranski sistemi so postali tako osrednji steber trajnostnega razvoja in strategij bioekonomije po svetu. Ti sistemi temeljijo na obnovljivih bioloških virih – rastlinah, mikroorganizmih, kmetijskih ostankih in organskih odpadkih – za proizvodnjo hrane, krme, energije in biološko osnovanih materialov. Z vključevanjem ekoloških procesov in kroženja virov zmanjšujejo odvisnost od fosilnih inputov, povečujejo biotsko raznovrstnost in spodbujajo dolgoročno okoljsko stabilnost. Pri tem imajo mikrobiomi temeljno vlogo. Mikrobiom predstavlja skupnost mikroorganizmov in njihovih genomov v določenem okolju ter interakcije med mikrobi in njihovim okoljem.

Mikrobne združbe uravnavajo ključne ekosistemske storitve, vključno s kroženjem hranil, vezavo ogljika, vezavo dušika, razgradnjo organske snovi in zatiranjem bolezni. Napredek na področju genomike, metagenomike in sistemske biologije danes omogoča znanstvenikom razumevanje in namerno upravljanje mikrobiomov ter razvoj inovativnih rešitev za prilagajanje podnebnim spremembam in njihovo blaženje. Izkoriščanje funkcij mikrobiomov ponuja izjemne možnosti za izboljšanje odpornosti kmetijstva, zmanjšanje emisij toplogrednih plinov, regeneracijo tal, razvoj alternativnih beljakovin in vzpostavitev krožnih prehranskih sistemov.

1.2. Biotehnologija na osnovi mikrobioma

V zadnjih letih je napredek v biotehnologiji in znanosti o mikrobiomih omogočil razvoj praktičnih aplikacij za bolj trajnostno kmetijsko in proizvodnjo hrane. Te inovacije uporabljajo koristne mikroorganizme za izboljšanje rodovitnosti tal, učinkovitosti živinoreje, alternativne proizvodnje hrane in krožnega gospodarjenja z viri.

1.2.1. Mikrobna biognojila in zdravje tal

Tla so temeljna komponenta vseh kopenskih ekosistemov in glavni medij za rast rastlin. Običajno so sestavljena iz treh plasti: zgornje plasti tal, podtalja in matične podlage (Itelima in sod., 2018). Zgornja plast vsebuje mešanico mineralov, zraka, vode, organske snovi in živih organizmov, kot so rastlinske korenine, mikroorganizmi, žuželke in deževniki, ki so ključni za razvoj rastlin (Jangir in sod., 2019). Tla običajno vsebujejo okoli 45 % mineralov, medtem ko voda in zrak predstavljata vsak približno 25 % prostornine. Organska snov predstavlja manjši delež, običajno med 2 % in 5 %.

Kljub razmeroma majhnemu deležu organske snovi v tleh ta podpira izjemno gosto poseljeno in raznoliko

mikrobno skupnost. En gram tal lahko vsebuje od več sto milijonov do milijard mikroorganizmov (Devi, 2022), vključno z bakterijami, glivami, aktinomicetami, algami in praživalmi. Bakterije so najštevilčnejša skupina s populacijami 10^8–10^9 celic na gram tal, sledijo aktinomiceti, glive in alge (Putrie in sod., 2020; Javed in sod., 2021). Ti mikroorganizmi imajo ključno vlogo pri delovanju ekosistemov, saj razgrajujejo organsko snov in jo pretvarjajo v hranila, dostopna rastlinam, ter tako prispevajo k rodovitnosti tal in produktivnosti rastlin (Griffiths in sod., 2021).

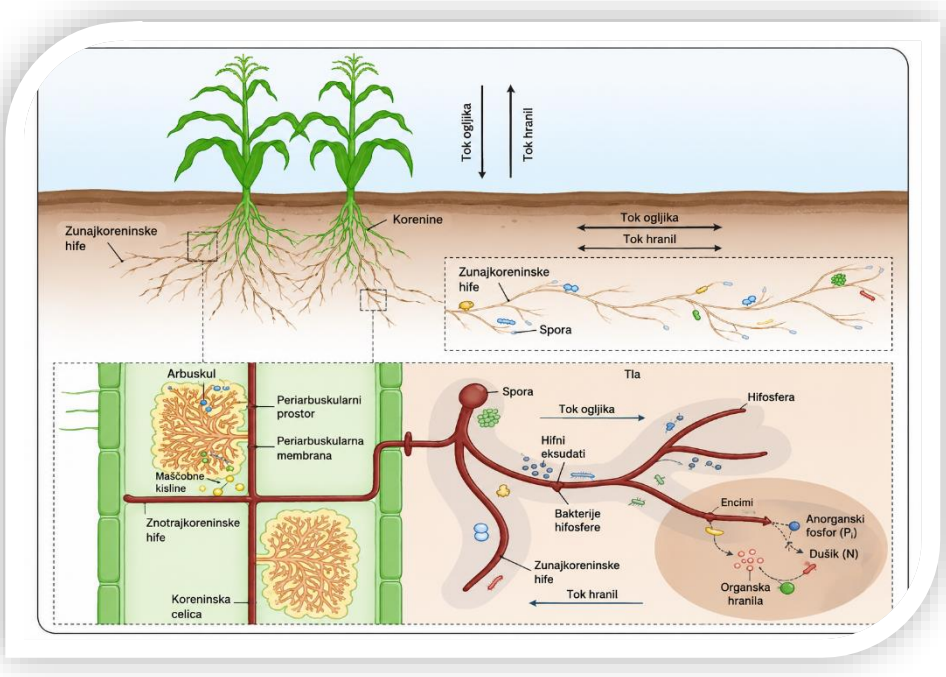
Koristni talni mikroorganizmi se v kmetijstvu vse pogosteje uporabljajo v obliki biognojil. Biognojila so biološki pripravki, ki vsebujejo žive ali dormantne mikroorganizme, ki naseljujejo rizosfero ali notranja rastlinska tkiva. Ti mikrobni inokulanti – pogosto sestavljeni iz bakterijskih, glivnih ali algnih sevov – izboljšujejo rast rastlin s povečanjem dostopnosti hranil ter vplivajo na mikrobno aktivnost tal in njihove fizikalno-kemijske lastnosti (Allouzi in sod., 2022).

Mikroorganizmi v biognojilih spodbujajo rast rastlin preko več mehanizmov, vključno z biološko vezavo dušika, mobilizacijo fosforja in topnostjo kalija. Številne vrste proizvajajo tudi fitohormone, kot so avksini, giberelini in citokinini, ki uravnavajo rast rastlin (Singh in sod., 2021). Poleg tega nekateri mikrobi zavirajo rastlinske patogene, povečujejo toleranco rastlin na abiotski stres, kot so suša, slanost, vročina in poplave, ter prispevajo k odpornosti proti škodljivcem in boleznim. Nekateri mikroorganizmi lahko tudi razstrupljajo onesnažila v tleh (Mącik in sod., 2020).

Mikroorganizmi, ki spodbujajo rast rastlin, se pogosto imenujejo "rast rastlin spodbujajoče rizobakterije (PGPR)", koristne glive s podobno funkcijo pa "rast rastlin spodbujajoče glive (PGPF)". Obe skupini lahko pomembno izboljšata pridelek in fiziološko stanje rastlin.

Gnojila so ključni kmetijski inputi za povečanje pridelka in zadovoljevanje svetovnih prehranskih potreb (Kour in sod., 2020). Medtem ko kemična gnojila omogočajo hitro dostopnost hranil in takojšnje povečanje pridelka (Timsina, 2018), lahko njihova pretirana uporaba povzroči degradacijo tal, onesnaženje voda in izčrpavanje podzemne vode (Lal, 2009; Atieno in sod., 2020). Zato se biognojila vse bolj promovirajo kot trajnostna alternativa. Z uporabo koristnih mikroorganizmov izboljšujejo zdravje tal, podpirajo kroženje hranil ter predstavljajo okolju prijazen in stroškovno učinkovit pristop k trajnostnemu kmetijstvu (Mącik in sod., 2020).

Študija primera 1: Mikorizne glive za odpornost na sušo



Slika 1. Mikorizne glive povečujejo absorpcijsko površino korenin ter izboljšujejo privzem vode in fosforja (povezeto po Duan in sod. 2024)

Arbuskularne mikorizne glive (Arbuscular mycorrhizal fungi, AMF) tvorijo simbiotske povezave s koreninami rastlin ter razvijajo mrežo hif, ki izboljša sprejem vode in hranil. Raziskave kažejo, da rastline, inokulirane s temi glivami, bolje prenašajo sušo, učinkoviteje sprejemajo fosfor in tvorijo več biomase v stresnih razmerah. Komercialni mikorizni inokulanti se že uporabljajo v vrtnarstvu, ekološkem kmetijstvu in projektih pogozdovanja. Njihova uporaba zmanjšuje potrebo po gnojilih ter povečuje skladiščenje ogljika v tleh in zadrževanje vode – ključna dejavnika podnebne odpornosti.

AMF pri pšenici (simulacija suše v Sredozemlju)

- **Tehnologija:** inokulacija z glivo *Rhizophagus irregularis* (prej *Glomus intraradices*).
- **Izziv:** uspešno pridelavo pšenice v Sredozemlju vse pogosteje ovirajo obdobja suše ("flash droughts"), ki nastopijo v času nalivanja zrnja.
- **Inovacija:** AMF proizvajajo viskozno beljakovino **glomalin**, ki deluje kot »lepilo za tla«, izboljšuje strukturo tal in tvori mikro prostorčke v katerih se zadrževanje vode kot v spužvi.
- Rezultati (poljskih) poskusovs:
  - **Water Use Efficiency (WUE):** z AMF inokulirana pšenica ima kar za **25 % boljšo učinkovitost rabe vode (WUE)** v primerjavi z neinnokulranimi kontrolami.
  - **Stomatalna regulacija:** gliva rastlini signalizira zaprtje listnih rež učinkoviteje, kar prispeva k zmanjšanju izgub vode, a hkrati ne zmanjša rasti rastlin.
  - **Nezmanjšan pridelek:** tudi v razmerah močnega vodnega stresa ima z AMF koloniziran posevek za **15–20 % večji pridelek biomase** v primerjavi z netretiranimi rastlinami.

1.2.1.1. Mikrobni inokulanti za vezavo dušika

Dušik predstavlja približno 78 % Zemljine atmosfere in je glavni naravni vir dušika za talne ekosisteme. Gre za esencialen element za vse žive organizme, saj je ključna sestavina številnih bioloških molekul, vključno z beljakovinami, nukleinskimi kislinami, klorofilom, koencimi, fitohormoni in sekundarnimi metaboliti (Hawkesford in sod., 2023). Vendar večina rastlin atmosferskega dušika (N_2) ne more neposredno uporabiti, saj nimajo biokemičnih mehanizmov za pretvorbo v biološko dostopno obliko, kot je amonijak.

To omejitev premagujejo mikroorganizmi, sposobni vezave dušika. Različni prostoživeči, simbiotski in asociativni mikrobi sodelujejo v procesu biološke vezave dušika (BNF) (Mukherjee in Sen, 2021). BNF pomeni encimsko pretvorbo atmosferskega dušika v amonijak, ki jo katalizira encimski kompleks nitrogenaza (Barney in Plunkett, 2022). Proces izvajajo aerobne in anaerobne bakterije ter cianobakterije. Te organizme skupno imenujemo diazotrofi (Harding in sod., 2022).

Danes predstavlja biološka vezava dušika pomemben delež vhoda dušikovih v kmetijstvu – približno 65 % dušika za rastlinsko pridelavo izvira iz tega procesa (Bello in sod., 2021). Ker ima BNF ključno vlogo pri kroženju hranil in rodovitnosti tal, velja za enega najpomembnejših elementov trajnostnega kmetijstva.

Študija primera 2: Biološko povečanje dušika pri žitih

Najnovejše inovacije skušajo razširiti biološko vezavo dušika tudi na žita, kot sta koruza in pšenica. Mikrobni inokulanti z gensko izboljšanimi ali naravno učinkovitimi bakterijami za vezavo dušika lahko kolonizirajo korenine rastlin in pokrijejo del njihovih potreb po dušiku. Poskusi na polju so pokazali zmanjšano uporabo sintetičnih gnojil ob ohranjanju stabilnega pridelka. Tak pristop zmanjšuje emisije ogljika, stroške pridelave in povečuje mikrobno pestrost tal. Primer so gensko-urejeni diatotrofi (Gene-Edited Diazotrophs) v pridelavi koruze v ZDA (Pivot Bio) (https://www.pivotbio.com).

- **Tehnologija:** komercialni pripravek **PROVEN 40** z gensko urejeno bakterijo *Kosakonia sacchari*.
- **Izziv:** v naravi prisotne bakterije običajno prenehajo delovati ob prisotnosti sintetičnih gnojil.
- **Inovacija:** bakterijo so gensko uredili na način, da kljub prisotnosti mineralnih gnojil še naprej vežejo atmosferski dušik N_2 v NH_3.
- Rezultati poljskega poskusa (Univerza Illinois, 2025): * Povečanje pridelka v povprečju za 2–4 mernika na aker (2-4 bushels per acre) oziroma 135–269 kg na hektar.
    - **Vrednost nadomestka N:** bakterija je v zgodnjih fazah rasti koruze zagotovila količino dušika primerljivo s 35 funtov na aker (lbs/acre) oziroma 39 kg na hektar.
    - **Zaključek:** deluje kot nekakšno »zavarovanje z dušikom«, saj nadomešča izgube dušika, do katerih pride zaradi izpiranja ob padavinah ali zaradi visokih temperatur.

1.2.2. Upravljanje mikrobioma domačih živali

Emisije metana (CH_4) iz vampa prežvekovalcev predstavljajo pomemben izziv za svetovno kmetijstvo in pomembno prispevajo k emisijam toplogrednih plinov (greenhouse gas (GHG). Kmetijstvo povzroči približno 62 % antropogenih emisij metana, pri čemer prežvekovalci prispevajo 58 % tega deleža (Qi, 2025). V živinorejskem sektorju te živali ustvarijo približno 81 % vseh emisij toplogrednih plinov predvsem zaradi mikrobne aktivnosti v vampu (Harmsen in sod., 2019).

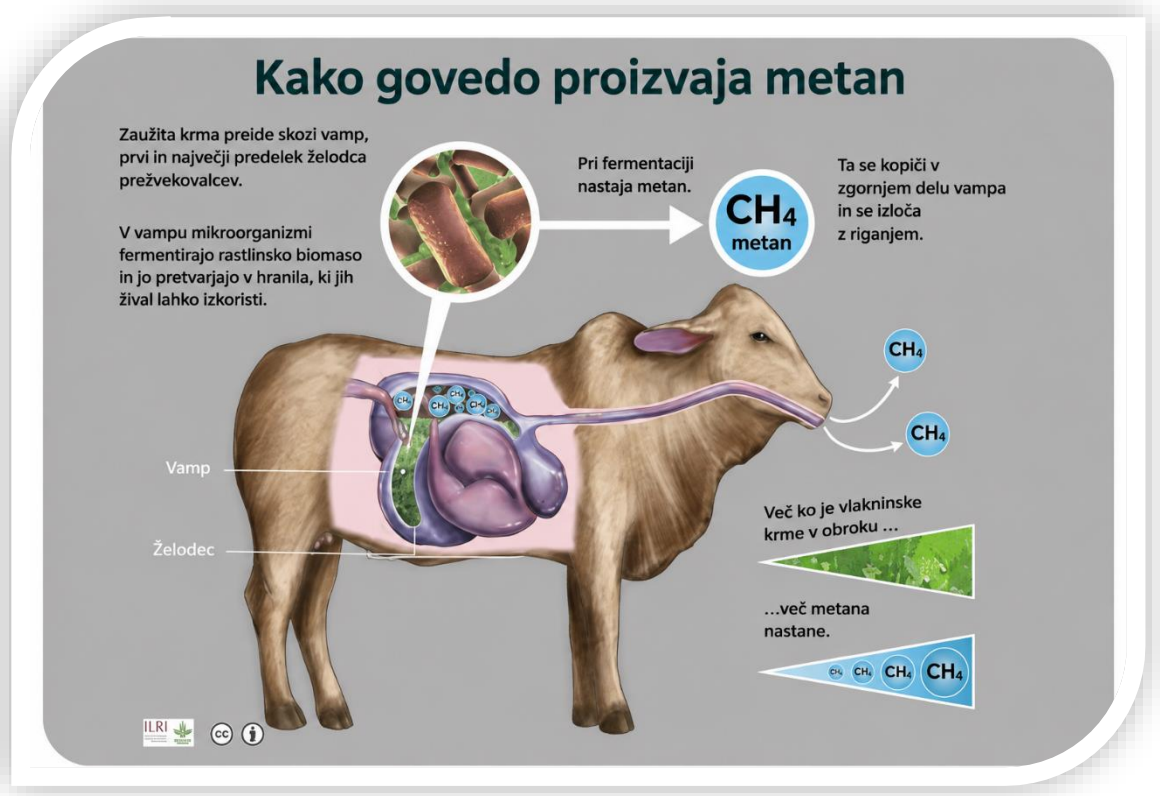
Čeprav je ta proces naravna posledica evolucije prežvekovalcev, je njegov obseg v sodobni živinorejski proizvodnji postal pomemben globalni okoljski problem. Projekcije namreč kažejo, da bi lahko reja prežvekovalcev do leta 2100 prispevala kar 40–78 % vseh svetovnih emisij metana (Harmsen in sod., 2019). Reševanje tega problema ni pomembno le z okoljskega vidika, temveč prinaša tudi gospodarske koristi, saj nastajanje metana predstavlja znatno izgubo energije. Pri tem se izgubi med 2 % in 12 % energije, ki jo žival zaužije s krmo. Zmanjševanje teh emisij je zato ključnega pomena tako za povečanje produktivnosti živinoreje kot za blaženje podnebnih sprememb. V živinorejski proizvodnji predstavlja enterična fermentacija približno 44 % vseh emisij toplogrednih plinov. Ta proces poteka v vampu, ki predstavlja kompleksno fermentacijsko okolje, v katerem raznolik mikrobiom razgrajuje rastlinske polisaharide v hranila, dostopna gostitelju (Gharechahi in sod., 2023).

Med procesom v vampu živali metanogene arheje izkoriščajo vodik (H_2) in ogljikov dioksid (CO_2), ki nastajata kot stranska produkta drugih mikrobnih fermentacijskih procesov, za tvorbo metana (CH_4). Ta presnovna pot je funkcionalno pomembna za vzdrževanje okolja z nizkim redukcijskim potencialom, kar podpira splošno presnovno stabilnost mikrobne združbe. Poleg tega je delovanje vampnega mikrobioma tesno povezano s fiziologijo gostitelja, saj lahko preko kratkoverižnih maščobnih kislin (Short-chain fatty acids, SCFA) vpliva na izražanje genov gostitelja. Zaradi tega raziskovalci veliko pozornosti namenjajo proučevanju pestrosti in strukture združb metanogenov, da bi našli načine za izboljšanje učinkovitosti izrabe krme ob hkratnem zmanjševanju emisij. Ker na nastajanje metana vpliva preplet genetike gostitelja, njegove fiziologije, prehrane ter interakcij med mikroorganizmi, je za učinkovito zmanjševanje emisij potrebno poglobljeno razumevanje presnovne raznolikosti metanogenov.

Med novejšimi pristopi za zmanjševanje emisij CH_4 so:

- **Genomska selekcija:** selekcija rejnih živali z lastnostmi, povezanimi z nižjimi emisijami metana (González-Recio in sod., 2020).
- **Imunološki pristop:** razvoj cepiv proti metanogenim mikroorganizmom (Baca-González in sod., 2020).
- **Prehrana:** prilagajanje prehrane ter uporaba specializiranih krmnih dodatkov (Haque, 2018).

Čeprav navedeni pristopi kažejo obetavne rezultate, je njihova učinkovitost različna, nekateri pa lahko negativno vplivajo na zdravje živali ali njihovo rast. Novejše raziskave, ki primerjajo govedo z visokimi in nizkimi emisijami metana, nakazujejo, da se dolgoročne rešitve skrivajo v ciljno usmerjenem oblikovanju oziroma uravnavanju vampnega mikrobioma. V zadnjih petih desetletjih so bile obsežno proučevane različne intervencije, kot so spremembe reje, prilagajanje sestave obrokov ter uporaba protimetanogenih učinkovin. Kljub temu napredku še vedno primanjkuje celovitih raziskav, ki bi podrobno pojasnile delovanje teh spojin na molekularni ravni znotraj metanogenih arhej.



Slika 2. Nastajanje metana v vampu s pomočjo metanogenih arhej med mikrobno fermentacijo (Prirejeno po American Society for Microbiology)

Metan v vampu proizvajajo metanogene arheje (slika 2). Krmni dodatki, probiotiki in ciljno usmerjeni posegi v mikrobiom lahko spremenijo sestavo vampne mikrobne združbe ter tako zmanjšajo nastajanje metana, ne da bi pri tem ogrozili zdravje ali proizvodnost živali. Obetavne rezultate so na primer pokazali krmni dodatki na osnovi morskih alg, ki zmanjšujejo emisije metana z zaviranjem delovanja metanogenih mikroorganizmov. Takšni pristopi, usmerjeni v mikrobiom, predstavljajo praktične strategije za zmanjševanje emisij, ki jih že preizkušajo v komercialni živinorejski praksi.

Rešitev z »rdečimi algami« (*Asparagopsis taxiformis*) (Roque in sod., 2021)

- **Tehnologija:** Dodajanje manjše količine (manj kot 1 %) posušenih rdečih alg v krmni obrok goveda.
- **Mehanizem:** Alge vsebujejo **Bromoform**, ki zavira od kobalamina odvisne encimske sisteme v metanogenih arhejah.
- Rezultati poskusov na živalih (UC Davis in CSIRO Avstralia):
  - **Zmanjšanje emisij metana:** doseženi so bili izjemni rezultati, saj se je enterična emisija metana pri pitovnem govedu **zmanjšala za kar 80%–90%**.
  - **Produktivnost:** Živali so dosegle značilno večje priraste telesne mase v primerjavi s kontrolno skupino, kar potrjuje, da je zmanjševanje emisij metana smiselno tudi z ekonomskega vidika, saj se zmanjša izguba energije.
  - **Varnost:** obsežna testiranja so potrdila, da v mesu in mleku ni bilo zaznanih ostankov bromoforma, zato je uporaba takšnega dodatka varna za potrošnike.

1.2.3. Proizvodnja hrane s fermentacijo

Fermentacija predstavlja z vidika rabe virov učinkovit in monetarno nezahteven biotehnološki proces, ki poleg osnovnih fermentacijskih posod in surovin zahteva le minimalno infrastrukturo. Medtem ko velike industrijske panoge, kot sta mlekarstvo in pivovarstvo, za zagotavljanje enakomerne kakovosti uporabljajo standardizirane starterske kulture, tradicionalni in domači fermentacijski postopki pogosto potekajo spontano pod vplivom naravno prisotnih mikroorganizmov.

Uporaba fermentacije pri proizvodnji rastlinskih alternativ mesu in mlečnim izdelkom predstavlja pomembno pot za zmanjševanje okoljskega odtisa prehranskih sistemov. Prehod od živinorejske proizvodnje, zlasti reje prežvekovalcev, ki pomembno prispeva k spremembam rabe zemljišč, veliki porabi vode in emisijam toplogrednih plinov (TGP), omogoča pridobivanje bolj trajnostnih virov beljakovin (Poore in sod., 2018).

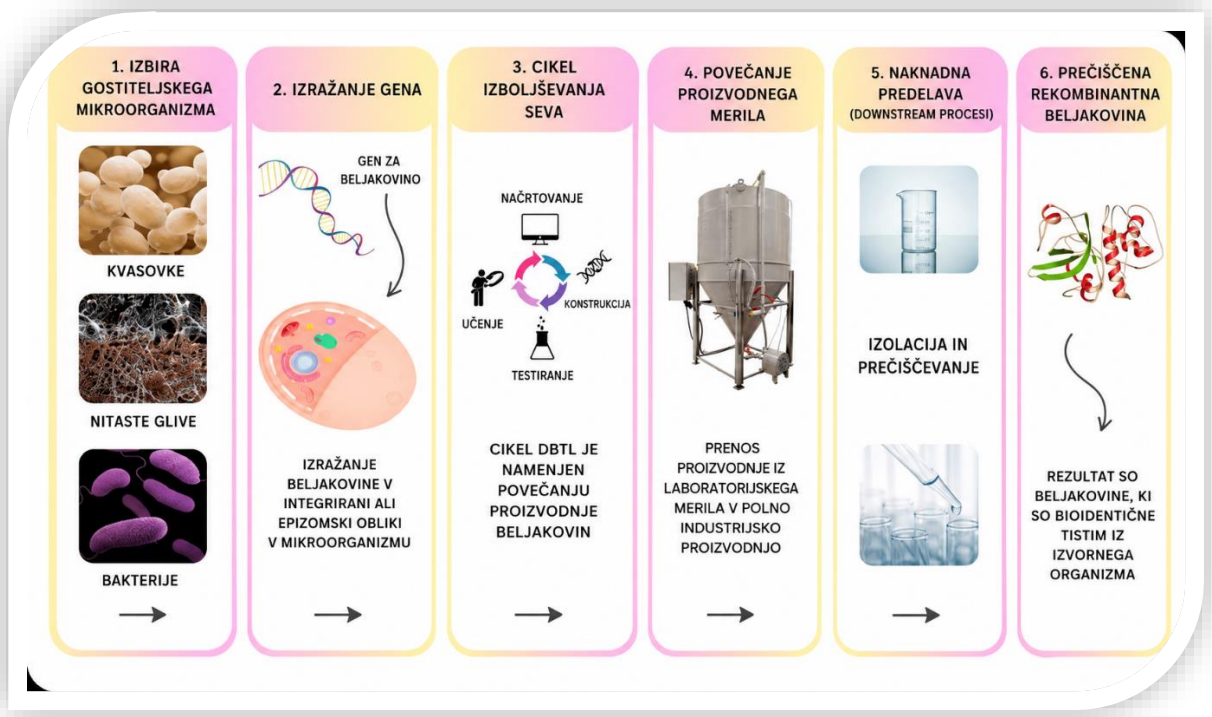
Rastlinske alternative živilom živalskega izvora so lahko pripravljene iz prečiščenih sestavin ali pa nastajajo s fermentacijo celih rastlinskih surovin. Čeprav je bilo opravljenih več analiz življenjskega cikla, ki primerjajo okoljske vplive fermentiranih mlečnih izdelkov in njihovih rastlinskih alternativ, primerjav med izdelki, proizvedenimi iz fermentiranih celih rastlinskih surovin, in tistimi, izdelanimi iz prečiščenih sestavin, za zdaj še ni na voljo. V ta namen razvijajo znanstveniki starterske kulture, primerne za pretvorbo rastlinskih surovin v alternative fermentiranim mlečnim izdelkom s privlačno teksturo, okusom in videzom.

Število znanstvenih raziskav, ki ocenjujejo primernost starterskih kultur za proizvodnjo rastlinskih alternativ fermentiranim mlečnim izdelkom, hitro narašča. Nizka senzorična kakovost številnih trenutno dostopnih rastlinskih alternativ mlečnim izdelkom namreč omejuje njihovo sprejemljivost med potrošniki. Uporaba ustreznih fermentacijskih mikroorganizmov lahko izboljša senzorične lastnosti teh izdelkov, poveča njihovo porabo in tako prispeva k preusmerjanju vnosa beljakovin z živil živalskega izvora na pretežno rastlinske vire, kar priporočajo številne prehranske in zdravstvene organizacije (Willett in sod., 2019).



Slika 3. Fermentirana hrana

Študija primera 4: Precizna fermentacija za proizvodnjo alternativnih beljakovin



Slika 4. Precizna fermentacija uporablja gensko spremenjene oziroma optimizirane mikroorganizme za proizvodnjo specifičnih živilskih sestavin, kot so mlečne ali jajčne beljakovine (Knychala in sod., 2024)

Precizna fermentacija uporablja gensko optimizirane mikroorganizme za proizvodnjo specifičnih beljakovin, encimov ali maščob, ki jih tradicionalno pridobivamo iz živinskih produktov (slika 4). Podjetja danes s pomočjo mikrobne fermentacije v fermentorjih proizvajajo mlečne beljakovine, jajčne beljakovine in spojine z lastnostmi mesa. V primerjavi z živinorejsko proizvodnjo takšni sistemi zahtevajo manj zemljišč, vode in krme ter povzročajo manj emisij toplogrednih plinov. Beljakovine, proizvedene s fermentacijo, zato predstavljajo obetavno in razširljivo strategijo za blaženje podnebnih sprememb.

Rekombinantne mlečne beljakovine (Perfect Day) (https://perfectday.com)

- **Tehnologija:** uporaba glive *Trichoderma reesei* za proizvodnjo beljakovin sirotke.
- **Inovacija:** znanstveniki so v glivo vnesli zapis DNK za tvorbo beljakovine kravjega mleka (beljakovino sirotke). Ko gliva raste v fermentorjih na gojišču s sladkorjem, izraža to beljakovino, ki jo nato iz fermentacijske brozge izolirajo in prečistijo.
- Vpliv na trajnostnost:
  - **Emisije toplogrednih plinov:** zmanjšanje emisij za 91–97 % v primerjavi s tradicionalno mlečno proizvodnjo.
  - **Poraba vode in zemljišč:** poraba vode je manjša za 99 % in poraba energije za 60 %.
- **Zaključek:** ta tehnologija omogoča proizvodnjo sladoleda, sira in drugih mlečnih izdelkov, ki so po okusu, teksturi in lastnostih taljenja primerljivi s klasičnimi mlečnimi izdelki, hkrati pa ne vsebujejo laktoze in so primerni za vegane.

1.2.4. Mikrobna valorizacija odpadkov in krožna bioekonomija

Mikroorganizmi imajo raznolike presnovne sposobnosti, ki jim omogočajo razgradnjo organske snovi s pomočjo fermentacijskih procesov. Ker živilski odpadki vsebujejo veliko organskih spojin, kot so ogljikovi hidrati, beljakovine in maščobe, predstavlja fermentacija učinkovit način njihove pretvorbe v dragocene proizvode. Takšen pristop prispeva k zmanjševanju kopičenja živilskih odpadkov, zmanjšuje odvisnost od njihovega odlaganja na odlagališčih ter omogoča ponovno pridobivanje koristnih virov.

Uporaba v živilstvu

Na podlagi teh pristopov za ponovno pridobivanje virov je mogoče ostanke iz kmetijske pridelave in stranske proizvode živilsko-predelovalne industrije valorizirati za proizvodnjo mikrobnih starterskih in funkcionalnih kultur, ki se uporabljajo pri fermentaciji živil. Številni stranski proizvodi živilske industrije, kot so sirotka, tropine sadja in zelenjave, melasa ter ostanki pri predelavi žit, vsebujejo znatne količine sladkorjev, beljakovin, mineralov in drugih hranil, ki podpirajo rast mikroorganizmov (Gervasi in Mandalari, 2024). Zato se lahko ti uporabljajo kot alternativna in cenovno ugodna fermentacijska gojišča za gojenje koristnih mikroorganizmov, vključno z mlečnokislinskimi bakterijami (Lactic acid bacteria, LAB) in probiotičnimi sevi. Nastala mikrobna biomasa se lahko nadalje uporablja kot starterska kultura pri proizvodnji fermentiranih živil ali kot funkcionalna kultura pri razvoju funkcionalnih živil. Takšen pristop uresničuje načela krožne bioekonomije, saj nizkovredne tokove odpadkov pretvarja v visokovredne mikrobne sestavine za živilsko industrijo.

Študija primera 5: Proizvodnja starterskih kultur iz sirotke

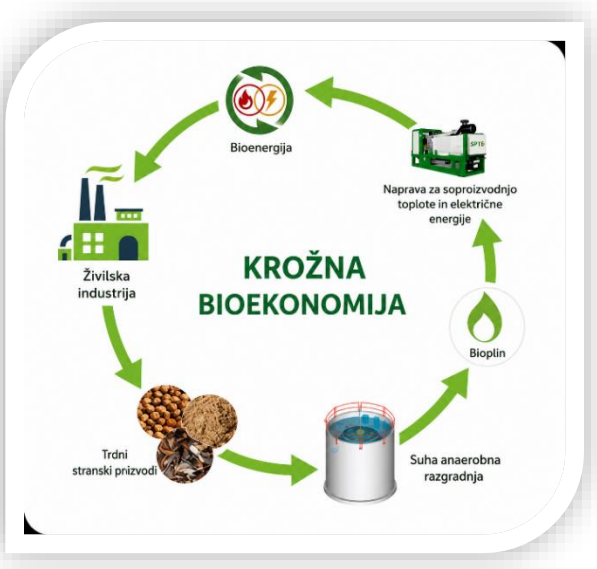
Sirotka, stranski proizvod pri proizvodnji sira, je bogat vir laktoze, beljakovin in mineralov ter lahko predstavlja učinkovito gojišče za rast koristnih mikroorganizmov. Več raziskav je pokazalo, da je mogoče mlečnokislinske bakterije, kot so *Lactiplantibacillus plantarum*, *Lacticaseibacillus rhamnosus* in *Lacticaseibacillus paracasei*, uspešno gojiti na gojiščih na osnovi sirotke. Tako pridobljena mikrobna biomasa se lahko nato uporablja kot starterska ali probiotična kultura pri proizvodnji fermentiranih mlečnih izdelkov in rastlinskih fermentiranih živil. Takšen pristop hkrati zmanjšuje količino stranskih tokov in odpadkov v živilski industriji ter podpira trajnostno proizvodnjo mikrobnih kultur za fermentacijo živil v skladu z načeli krožne bioekonomije.

Napredni biopolimeri

Kmetijski in ostanki živilsko-predelovalne industrije, ki po svetu nastajajo v velikih količinah, predstavljajo pomemben okoljski in gospodarski izziv, če z njimi ne ravnamo ustrezno. Mikrobna valorizacija teh ostankov se je uveljavila kot trajnosten pristop njihove izrabe, pri čemer je bakterijska celuloza prepoznana kot visokovreden biopolimer zaradi svoje visoke čistosti, odličnih mehanskih lastnosti, biokompatibilnosti in biorazgradljivosti (Sharma in sod., 2024). Različne vrste kmetijskih odpadkov, vključno z olupki sadja, bagaso sladkornega trsa (vlaknat ostanek, ki ostane po iztiskanju soka sladkornega trsa), žitno slamo in koruznimi ostanki, lahko služijo kot cenovno ugodni viri ogljika za mikrobno fermentacijo. S tem se bistveno zmanjšajo proizvodni stroški, hkrati pa se podpirajo načela krožne bioekonomije (Belkozhayev in sod., 2025; Hasanin in sod., 2023). V zadnjih letih so napredki na področju inženiringa sevov, sintezne biologije ter optimizacije presnove na podlagi omičnih tehnologij pomembno povečali izkoristke proizvodnje bakterijske celuloze in omogočili prilagajanje njenih strukturnih ter funkcionalnih lastnosti. Zaradi tega so se razširile možnosti njene uporabe na področjih, kot so embalaža za živila, biomedicinski materiali, kozmetika in napredni biokompoziti (Turganova in sod., 2025). K izboljšani razširljivosti proizvodnje in višji kakovosti izdelkov so prispevale tudi izboljšave procesov, kot so optimizirani postopki predobdelave surovin, prilagoditvena evolucija mikroorganizmov in uporaba

specializiranih bioreaktorskih sistemov. Vključevanje proizvodnje bakterijske celuloze v modele krožne bioekonomije omogoča preusmerjanje biomase iz odlagališč v koristne proizvodne procese ter ponuja trajnostne alternative materialom na osnovi fosilnih virov. S tem prispeva k varovanju okolja in učinkovitejši rabi virov (Belkozhayev in sod., 2025).

Študija primera 6: Anaerobna razgradnja



Slika 5. Microbni konzorcij, ki pretvarja organske odpadke v bioplin in s hranili bogat digestat (Sganzerla in sod., 2022)

Anaerobna razgradnja uporablja združbe mikroorganizmov za razgradnjo organskih odpadkov v okolju brez prisotnosti kisika, pri čemer nastajata bioplin (metan) in s hranili bogat digestat (slika 5). Bioplin lahko nadomešča fosilna goriva, digestat pa se uporablja kot biognojilo. Ta proces zmanjšuje emisije z odlagališč, omogoča kroženje hranil in prispeva k proizvodnji obnovljive energije.

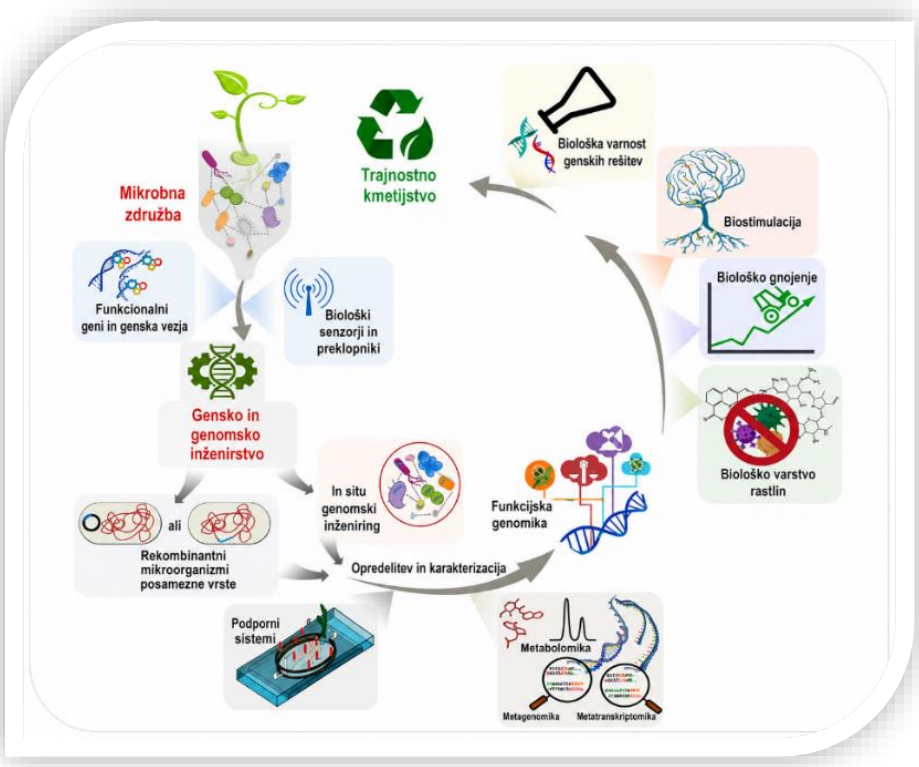
Model "Krožnega mesta – Circular City" (Magic Dirt, Cenergy ZDA) (https://cenergy.us/index.html)

- **Tehnologija:** večstopenjski anaerobni digestorji, ki uporabljajo specializirano mikrobno združbo, sestavljeno iz acidogenih, acetogenih in metanogenih mikroorganizmov.
- **Izziv:** organski odpadki na odlagališčih povzročajo nenadzorovano nastajanje metana (CH_4), ki ima kot toplogredni plin približno 25-krat večji učinek segrevanja ozračja kot ogljikov dioksid (CO_2). Hkrati pa kmetijstvo potrebuje trajnostne vire gnojil.
- **Inovacija:** namesto da bi organski odpadki nekontrolirano razpadali na odlagališčih, jih usmerijo v zaprt anaerobni digestor. Proces optimizirajo s **sočasno anaerobno razgradnjo (ko-digestijo)** različnih vrst odpadkov, na primer ostankov hrane in govejega gnoja, s čimer uravnavajo razmerje med ogljikom in dušikom (C : N).
- **Rezultati poskusov:**
  - **Proizvodnja energije:** ena tona živilskih odpadkov lahko proizvede približno 300–400 kWh električne energije, kar zadostuje za oskrbo povprečnega gospodinjstva za skoraj dva tedna.
  - **Dodatna vrednost digestata:** preostanek, ki nastane po fermentaciji – digestat, je bogato organsko gnojilo z visoko vsebnostjo hranil. Primeri iz ZDA (npr. Magic Dirt) kažejo, da lahko digestat v vrtnarstvu nadomesti šoto, hkrati pa prispeva k večji sekvestraciji ogljika v tleh.
  - **Zaključek:** takšen pristop omogoča vzpostavitev zaprtega krožnega sistema: **živilski odpadki → bioplin (energija) + digestat (gnojilo) → pridelava novih rastlin.**

Zapišite svoje razmišljanje:

1.3. Scenariji inovacij

Nastajajoče tehnologije in nove raziskovalne usmeritve nakazujejo preobrazbene poti inovacij za razvoj podnebno odpornih prehranskih sistemov.



Slika 6. Pristopi mikrobnega inženiringa za razvoj podnebno odpornih kmetijskih sistemov (Ke in sod., 2021).

Napredek na področju raziskav mikrobiomov, sintezne biologije in sistemske biotehnologije omogoča razvoj bioloških rešitev, ki lahko stabilizirajo pridelavo hrane v vse bolj nepredvidljivih okoljskih razmerah (slika 6). Ena najbolj obetavnih smeri je razvoj sintetičnih oziroma »oblikovanih« mikrobiomov (*designer microbiomes*). Takšne mikrobne združbe so načrtno sestavljene z namenom izboljšanja rasti in razvoja rastlin, saj združujejo seve, ki spodbujajo privzem hranil, povečujejo odpornost na abiotski stres ter izboljšujejo odpornost proti boleznim. Z uporabo pristopov genskega urejanja in sistemske biologije znanstveniki vse uspešneje oblikujejo mikrobne združbe, ki rastlinam pomagajo prenašati ekstremne razmere, kot so vročinski stres, suša, slanost tal in poplave. S tem se povečuje odpornost kmetijskih sistemov v regijah, ki jih vse bolj prizadenejo podnebne spremembe.

Drugo pomembno področje razvoja predstavlja vloga talnih mikrobiomov pri dolgoročnem sekvestriranju ogljika. S spodbujanjem mikrobnih presnovnih poti, ki omogočajo stabilizacijo ogljika v talnih agregatih, lahko kmetijski sistemi delujejo ne le kot sistemi za pridelavo hrane, temveč tudi kot učinkoviti ponori ogljika. Takšni pristopi izboljšujejo strukturo tal, povečujejo njihovo sposobnost zadrževanja vode ter hkrati prispevajo k blaženju podnebnih sprememb in prilagajanju nanje. Zato predstavlja upravljanje tal na osnovi mikrobioma obetavno strategijo za izboljšanje stabilnosti ekosistemov in povečanje kmetijske produktivnosti.

Vzporedno z navedenim mikrobna biotehnologija odpira nove možnosti za trajnostno proizvodnjo beljakovin. Sistemi alternativnih beljakovin, ki temeljijo na mikrobni biomasi in jih pogosto označujemo kot enocelične beljakovine (SCP – *single-cell protein*), omogočajo gojenje bakterij, kvasovk ali mikroalg na nizkovrednih substratih oziroma industrijskih stranskih proizvodih. V primerjavi s konvencionalno živinorejsko proizvodnjo takšni sistemi zahtevajo bistveno manj zemljišč, vode in krme ter povzročajo znatno manj emisij toplogrednih plinov. Ker svetovno povpraševanje po beljakovinah še naprej narašča, bi lahko mikrobna biomasa predstavljala razširljivo in z vidika virov učinkovito rešitev.

Pomembne podnebno prilagodljive rešitve za konzerviranje in proizvodnjo hrane ponujajo tudi fermentacijski prehranski sistemi, zlasti v regijah z nestabilno energetsko infrastrukturo ali visokimi temperaturami okolja. Fermentacija je energijsko varčen proces, ki podaljšuje obstojnost živil ter hkrati izboljšuje njihove prehranske in senzorične lastnosti. Prihodnje inovacije na področju starterskih kultur, prilagojenih višjim temperaturam in spremenljivim okoljskim razmeram, bi lahko okrepile prehransko varnost v regijah, ki so posebej ranljive zaradi podnebnih sprememb, obenem pa zmanjšale odvisnost od hlajenja in energijsko intenzivnih postopkov predelave hrane.

1.4. Inovativno delo študentov

Predstavitev študentske inovacije: projektni okvir

Uporabite spodnjo predlogo za opredelitev svoje vizije in tehničnega pristopa pri razvoju projekta, usmerjenega v odpornost na podnebne spremembe.

PROJEKT BIOSHIELD

Predstavitev inovativnih idej študentov

Naslov projekta in področje inovacije

Predlagani naslov: (npr. *Rhizo-Shield: Mikrobne združbe za pridelavo pšenice v sušnih razmerah*)

Izbrano področje: (npr. *Podnebju prilagojena biognojila*)

Opredelitev problema

Opredelite konkreten izziv, povezan s podnebnimi spremembami, ki ga naslavljate.

Primer: *"Obstoječa biognojila z mikroorganizmi, ki vežejo dušik, pri temperaturah tal nad 35 °C izgubijo učinkovitost, kar med vročinskimi valovi v sredozemskem podnebju povzroča zmanjšano rast rastlin in izgubo pridelka."*

Vaša opredelitev problema:

Mikrobna strategija (“Kako?”)

Pojasnite biološki mehanizem ali tehnološki postopek.

Mikroorganizmi/substrati:

- Katere mikrobne seve, mikrobne združbe ali surovine boste uporabili?

Proces:

Primer: *fermentacija na trdnem substratu (solid-state fermentation) ali spontana mešana kultura (spontaneous co-culture)*

Vaša strategija:

Kazalniki trajnosti in krožnosti

Kako vaš projekt prispeva k varovanju planeta?

Vpliv na emisije ogljika:

- Ali projekt prispeva k zmanjšanju emisij CO_2 ali CH_4?

Zmanjšanje odpadkov:

- Ali predvidevate uporabo določenega industrijskega stranskega proizvoda?

Razmislek o življenjskem ciklu:

- Kaj se zgodi z izdelkom po koncu njegove življenjske dobe? Ga je mogoče ponovno uporabiti, reciklirati, kompostirati ali varno razgraditi?

Zakaj je vaš projekt pomemben:

Tehnični izzivi in raziskovalni cilji

Katera »ozka grla« morate rešiti v laboratoriju?

- ***Cilj 1:*** *izolirati toplotno stabilen sev bakterije Azotobacter.*
- ***Cilj 2:*** *preveriti natezno trdnost biopolimera pri 80-% relativni zračni vlagi.*

Vaši raziskovalni cilji:

Cilj 1:

Cilj 2:

Cilj 3:

Predstavitev vpliva projekta (Impact Pitch)

V dveh povedih pojasnite, zakaj bi moralo podnebno-tehnološko podjetje ali univerza financirati vaš projekt.

V predstavitvi poudarite: **inovativnost** in **pričakovani učinek**

Primer: *do leta 2030 bi lahko naš sistem biološkega konzerviranja, v regijah brez zanesljive oskrbe z električno energijo, zmanjšal kvarjenje hrane za 30 %. S tem bi preprečili izpuste x ton ekvivalenta CO_2 ter hkrati izboljšali prehransko varnost in kakovost prehrane lokalnega prebivalstva.*

Vaša predstavitev projekta:

Pri oblikovanju predstavitve si pomagajte z zapisanim v preglednici 3.

Preglednica 3. Področja dela, problemi in predlagane rešitve

Področje dela	Problem	Rešitev (predstavitev ideje)
Obnova tal	Degradirana tla izgubljajo sposobnost pridelave hrane in skladiščenja ogljika.	"Razvijamo mikrobne združbe, ki degradirana tla spreminjajo v učinkovit ponor ogljika ter izboljšujejo njihovo rodovitnost."
Biognojila	Sintetična gnojila so pri visokih temperaturah manj učinkovita in negativno vplivajo na biotsko raznovrstnost.	"Naša podnebno prilagojena biognojila uporabljajo lokalne ekstremofilne mikroorganizme, ki omogočajo uspešno rast rastlin tudi pri temperaturah okoli 40 °C."
Konzerviranje hrane	V vročih podnebjih se zaradi pomanjkanja električne energije izgubi približno 30 % hrane.	"Razvijamo fermentacijske metode konzerviranja, ki ohranjajo varnost in kakovost hrane brez potrebe po hlajenju."
Bioembalaža	Onesnaževanje s plastiko je trajna okoljska težava, zaloge fosilnih virov pa se zmanjšujejo.	"Razvijamo embalažo na osnovi polihidroksialkanoatov (PHA), ki ščiti živila v pogojih visoke zračne vlage in se po uporabi razgradi v tleh."
Pretvorba odpadkov v proizvode z dodano vrednostjo	Živilski odpadki na odlagališčih predstavljajo pomemben vir emisij metana (CH_4).	"Naš sistem uporablja mikrobno biokonverzijo za pretvorbo odpadkov v visokovredno krmo za živali in bioenergijo."

1.5. Zaključek

Prehranski sistemi, ki temeljijo na bioloških virih in jih podpirajo inovacije na področju mikrobiomov, predstavljajo preobrazben pristop k doseganju odpornosti na podnebne spremembe. Mikrobne združbe so temelj številnih ključnih ekosistemskih storitev, od kroženja hranil in obnove tal do fermentacije in valorizacije odpadkov. Napredek na področju biotehnologije danes omogoča načrtno oblikovanje, usmerjanje in upravljanje teh mikrobnih procesov. Z zmanjševanjem emisij toplogrednih plinov, povečevanjem vezave ogljika, stabilizacijo pridelkov v razmerah podnebnega stresa ter spodbujanjem krožnega pretoka virov prispevajo rešitve, ki temeljijo na mikrobiomih, tako k blaženju podnebnih sprememb kot tudi k prilagajanju nanje. Njihovo uspešno uvajanje pa zahteva interdisciplinarno raziskovanje, podporne upravljavske in regulativne okvire, odgovorne inovacijske prakse ter aktivno vključevanje družbe. Ker se vplivi podnebnih sprememb vse bolj stopnjujejo, bosta povezovanje strategij, ki temeljijo na bioloških virih, in napredek na področju znanosti o mikrobiomih igrala ključno vlogo pri oblikovanju trajnostnih, odpornih in pravičnih prehranskih sistemov prihodnosti.

1.6. Napredek na področju v laboratoriju gojenega mesa: trajnostna rešitev za blaženje podnebnih sprememb

1.6.1. Zakaj potrebujemo alternative tradicionalni proizvodnji mesa?

V zadnjih desetletjih se je svetovno povpraševanje po živilih živalskega izvora, vključno z mesom, mlekom in jajci, stalno povečevalo zaradi rasti prebivalstva, urbanizacije in naraščajočih dohodkov v številnih delih sveta (Godfray in sod., 2018; Poore in Nemecek, 2018). Živila živalskega izvora ostajajo pomemben vir beljakovin in mikrohranil v prehrani ljudi, vendar so konvencionalni sistemi živinorejske proizvodnje povezani z velikimi okoljskimi obremenitvami. Mednje sodijo emisije toplogrednih plinov (TGP), spremembe rabe zemljišč, poraba vode in zmanjševanje biotske raznovrstnosti, kar prispeva k globalnim okoljskim spremembam in podnebni nestabilnosti (FAO, 2013; Herrero in sod., 2016; IPCC, 2022). Strokovnjaki ocenjujejo, da konvencionalna živinorejska proizvodnja prispeva približno 0,5 °C k svetovnemu zvišanju temperature v 21. stoletju, medtem ko naj bi se povpraševanje po mesu do leta 2050 povečalo za 76 % (Godfray in sod., 2018).

Eden najpomembnejših vplivov konvencionalne živinoreje na okolje so emisije toplogrednih plinov. Prežvekovalci, kot so govedo in drobnica, med prebavo proizvajajo metan (CH_4), ki nastaja kot posledica mikrobne fermentacije v vampu. Metan je močan toplogredni plin, katerega potencial globalnega segrevanja je kratkoročno bistveno večji od potenciala ogljikovega dioksida (IPCC, 2006; FAO, 2013). Dodatne emisije nastajajo pri ravnanju z živinskimi gnojili, kjer se glede na način skladiščenja in obdelave sproščata metan in didušikov oksid (N_2O) (IPCC, 2006). Didušikov oksid nastaja tudi pri pridelavi krmnih rastlin ter ob uporabi živinskih gnojil na kmetijskih zemljiščih.

Drugi pomemben okoljski vpliv živinorejske proizvodnje predstavljajo spremembe rabe zemljišč. Sprememba gozdov in drugih naravnih ekosistemov v pašnike ali obdelovalne površine za pridelavo krme povzroča sproščanje ogljikovega dioksida (CO_2), ki je bil predhodno vezan v vegetaciji in tleh (Pendrill in sod., 2019). Krčenje gozdov za kmetijsko rabo ne povzroča le emisij ogljika v ozračje, temveč predvsem zmanjšuje sposobnost ekosistemov za vezavo ogljikovega dioksida s fotosintezo (Curtis in sod., 2018). Primerjalne analize prehranskih sistemov so pokazale, da ima meso prežvekovalcev, zlasti govedina, največji odtis rabe zemljišč na enoto proizvedenih beljakovin (Poore in Nemecek, 2018). Širjenje pašnikov za pašo goveda in pridelava soje za živalsko krmo pomembno prispevata k krčenju gozdov v tropih, zlasti na območjih, kot je amazonski bazen (Curtis in sod., 2018; Pendrill in sod., 2019).

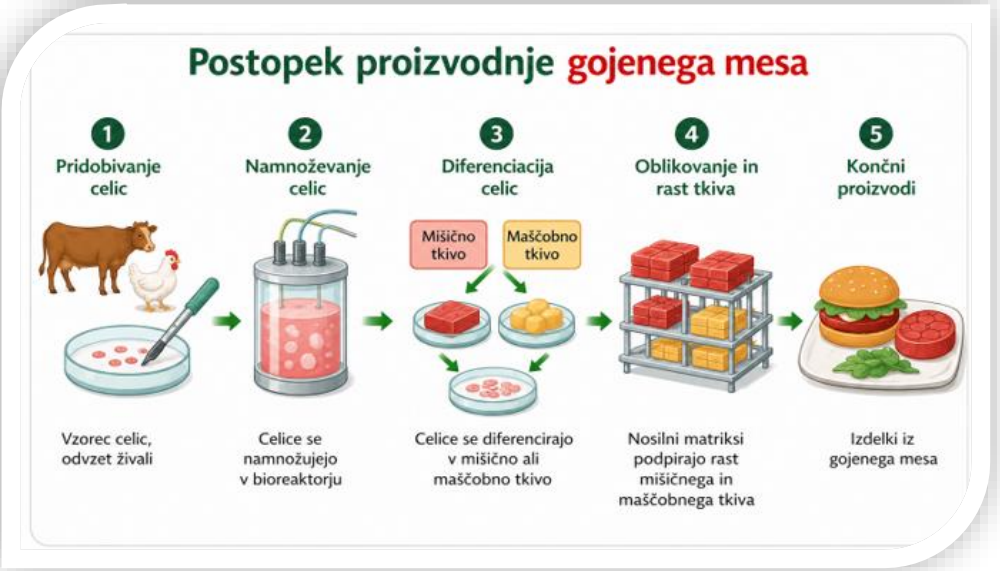
Živinorejska proizvodnja pomembno vpliva tudi na vodne vire in biotsko raznovrstnost. Medvladna platforma za biotsko raznovrstnost in ekosistemske storitve (Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services, IPBES) je spremembe rabe zemljišč, povezane s kmetijstvom, opredelila kot enega glavnih vzrokov za zmanjševanje biotske raznovrstnosti na svetovni ravni (IPBES, 2019). V živinorejskih sistemih se voda porablja neposredno za napajanje živali in izvajanje kmetijskih opravil ter posredno za namakanje krmnih rastlin (Poore in Nemecek, 2018). Izpiranje hranil iz živinskih in mineralnih gnojil lahko poslabša kakovost voda ter povzroči degradacijo rečnih in obalnih ekosistemov. Zaradi navedenih izzivov se vse bolj uveljavlja spoznanje, da bo za zadovoljevanje naraščajočega svetovnega povpraševanja po mesu potrebna ne le učinkovitejša, temveč predvsem bolj trajnostna proizvodnja hrane. Predlagani so bili različni pristopi za reševanje tega izziva, med drugim izboljšanje praks reje, večja učinkovitost izrabe krme, naprednejši sistemi obdelave živinskih gnojil ter prehod na prehrano z večjim deležem rastlinskih živil oziroma razvoj rastlinskih alternativ mesu (Godfray in sod., 2018).

Še bolj revolucionaren pristop predstavlja v laboratoriju gojeno meso (*cultured meat*), imenovano tudi kultivirano meso ali meso iz celičnih kultur, ki v zadnjih letih vzbuja vse več pozornosti kot inovacija, ki omogoča proizvodnjo mesa brez reje in zakola živali. Z ločitvijo proizvodnje mesa od konvencionalne živinoreje naj bi tehnologije gojenega mesa bistveno zmanjšale okoljski odtis mesne proizvodnje. Nedavna raziskava je pokazala, da bi lahko ta pristop zmanjšal emisije toplogrednih plinov za približno 90 % in rabo zemljišč za do 86 % (Rana in sod., 2026), pri tem pa ohranil organoleptične in prehranske lastnosti, ki jih potrošniki povezujejo z mesnimi izdelki (Khan in sod., 2025; Martins in sod., 2024; Stout in sod., 2024; Tuomisto in Teixeira de Mattos, 2011; Chriki in Hocquette, 2020).

1.6.2. Kaj je gojeno meso in kako ga proizvedemo?

Gojeno meso spada v del novega znanstvenega in industrijskega področja, znanega kot celično kmetijstvo (*cellular agriculture*), ki zajema biotehnološke pristope za proizvodnjo izdelkov živalskega izvora neposredno iz celičnih kultur, brez potrebe po reji in zakolu živali (Stephens in sod., 2018). Tehnologije celičnega kmetijstva omogočajo proizvodnjo izdelkov, kot so meso, mlečne beljakovine, jajca in usnje, z uporabo sistemov celičnih kultur, podobnih tistim, ki se uporabljajo v biomedicinskih raziskavah in farmacevtski industriji (Specht in sod., 2018).

Proizvodnja gojenega mesa (slika 7) se začne z odvzemom mišičnih ali matičnih celic živi živali z minimalno invazivnim postopkom biopsije (Post, 2012; Bhat in sod., 2019; Khan in sod., 2025; Martins in sod., 2024; Stout in sod., 2024). Pridobljene celice nato opredelijo, karakterizirajo in kriokonzervirajo za nadaljnjo uporabo. Uporabljena celična populacija lahko vključuje mišične satelitske celice, embrionalne matične celice, inducirane pluripotentne matične celice ali t. i. nesmrtne tkivno specifične celične linije – immortalised tissue-specific cell lines (Soice in Johnston, 2021; Khan in sod., 2025; Martins in sod., 2024; Stout in sod., 2024). Celice nato gojijo v ustreznem gojišču, ki vsebuje ključna hranila, kot so aminokisline, glukoza, vitamini, minerali in rastni dejavniki, ki spodbujajo njihovo proliferacijo. V skrbno nadzorovanih okoljskih razmerah se celice hitro delijo in namnožujejo (Khan in sod., 2025; Martins in sod., 2024; Stout in sod., 2024). Proizvodnja celic v večjem obsegu zahteva uporabo specializirane opreme, imenovane bioreaktorji, ki zagotavlja optimalne pogoje za rast celic, kot so ustrezna temperatura, koncentracija kisika, oskrba s hranili in odstranjevanje presnovnih produktov (Humbird, 2021; Wang in sod., 2025). Bioreaktorji omogočajo učinkovito gojenje velikih količin živalskih celic ob hkratnem zagotavljanju sterilnih in natančno nadzorovanih pogojev.



Slika 7. Glavni koraki proizvodnje gojenega mesa: pridobivanje celic iz živalskega tkiva, namnoževanje celic v gojišču, diferenciacija tkiva, rast na užitnih nosilnih matriksih ter pridobivanje in predelava končnega živila

Gojišča za celične kulture posnemajo biokemijsko okolje, ki ga najdemo v živalskih tkivih, in zagotavljajo signale, potrebne za rast in diferenciacijo celic (Humbird, 2021; Khan in sod., 2025; Martins in sod., 2024; Stout in sod., 2024). V preteklosti se je kot pomembna sestavina gojišč pogosto uporabljal fetalni goveji serum (fetal bovine serum, FBS), saj vsebuje rastne dejavnike in hormone, potrebne za proliferacijo celic. Vendar uporaba FBS, podobno kot na področju biomedicine, odpira etična vprašanja, hkrati pa predstavlja tudi ekonomsko omejitev zaradi visokih stroškov. Dodatno težavo predstavlja variabilnost med posameznimi serijami, ki vpliva na ponovljivost postopkov gojenja celic (Bhat in sod., 2019; Garbin in sod., 2025; Martins in sod., 2024).

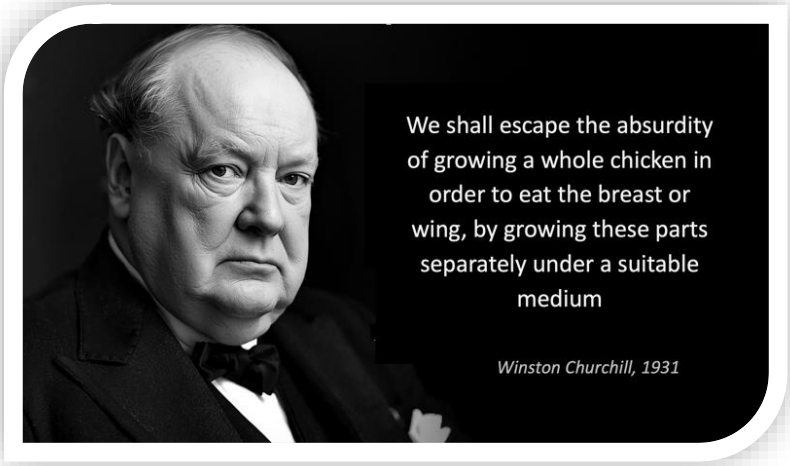
Ko je doseženo zadostno število celic, se s spremembo sestave gojišča ali z uporabo mehanskih dražljajev sproži njihova diferenciacija v za meso pomembne tipe celic, kot so mišična vlakna ali maščobne celice (Khan in sod., 2025; Martins in sod., 2024; Stout in sod., 2024). Celice rastejo na tridimenzionalnih nosilnih matriksih, ki jim zagotavljajo strukturno oporo, spodbujajo diferenciacijo ter usmerjajo organizacijo tkiva (Seibert in sod., 2025; Khan in sod., 2025; Martins in sod., 2024; Mariano in sod., 2024; Stout in sod., 2024). Nosilni matriksi so lahko izdelani iz užitnih biomaterialov, kot so alginat, celuloza, rastlinske beljakovine ali drugi biopolimeri, ki omogočajo pritrjanje celic in tvorbo tkiva (Ben-Arye in sod., 2020; Bomkamp in sod., 2022; Seibert in sod., 2025).

Po tem, ko gojeno tkivo dozori, ga poberemo in predelamo v živilske izdelke. Prvi izdelki iz gojenega mesa so po obliki in strukturi večinoma podobni predelanim mesnim izdelkom, kot so burgerji ali piščančji medaljoni (*nuggets*). Napredek na področju tkivnega inženirstva pa bi lahko v prihodnosti omogočil tudi proizvodnjo kompleksnejših struktur, kot so zrezki ali piščančji fileji (Risner in sod., 2024). Kljub temu velikost takšnih tkiv za zdaj omejuje pomanjkanje aktivnega transporta plinov in hranil v notranjost tkiva.

1.6.3. Razvoj gojenega mesa

Čeprav gojeno meso pogosto dojemamo kot sodobno tehnološko inovacijo, ima ta zamisel presenetljivo zgodnje intelektualne korenine. Leta 1931 je Winston Churchill v reviji The Strand Magazine objavil esej z naslovom "Fifty Years Hence", v katerem je razmišljal o prihodnjih znanstvenih dosežkih, ki bi lahko spremenili način proizvodnje hrane. Churchill je predvidel, da bo tehnološki napredek nekoč omogočil neposredno gojenje užitnih živalskih tkiv, ne da bi bilo treba vzrejati celotne živali (slika 8). Čeprav je bila njegova vizija zgolj

špekulativna, predstavlja eno najzgodnejših omemb koncepta, na katerem temeljijo sodobne tehnologije gojenega mesa.



Slika 8. Churchill je zapisal: »Izognili se bomo nesmislu vzreje cele kokoši zgolj zato, da bi pojedli njene prsi ali peruti, saj bomo te dele lahko gojili ločeno v ustreznem gojišču.«

Praktični razvoj gojenega mesa se je začel precej kasneje. Prvi pomemben mejnik je bil dosežen leta 2013, ko je raziskovalec Mark Post s sodelavci z Maastricht University na novinarski konferenci predstavil prvi burger iz gojenega govejega mesa na svetu, ki ga je ocenila skupina kuharskih mojstrov (slika 9; Post, 2012). Ta prototipni burger je bil izdelan z gojenjem mišičnih vlaken, pridobljenih iz govejih satelitskih celic, ki so jih nato združili v polpet. Čeprav je proizvodnja prvega burgerja iz gojenega mesa stala približno 300.000 ameriških dolarjev, je poskus dokazal, da je proizvodnja užitnega mesa iz živalskih celic tehnično izvedljiva. Od takrat je področje doživelo hiter razvoj, predvsem zaradi napredka pri razvoju gojišč za celične kulture, nosilnih matriksov ter bioreaktorskih tehnologij.



Slika 9. Prvi prototip burgerja iz gojenega mesa, predstavljen leta 2013 v Londonu (BBC News)

Začetek dvajsetih let 21. stoletja je zaznamoval začetek formalnega pravnega urejanja tehnologij gojenega mesa. Leta 2020 je Singapur postal prva država, ki je odobrila izdelek iz gojenega mesa za komercialno prodajo, kar predstavlja pomemben mejnik v razvoju celičnega kmetijstva. Leta 2022 je Ameriška uprava za hrano in zdravila (FDA) zaključila prvo predhodno oceno živila, proizvedenega s tehnologijo gojenja živalskih celic (FDA, 2022). Več podjetij trenutno razvija izdelke iz gojenega mesa z uporabo različnih tehnoloških pristopov. Podjetje GOOD Meat je razvilo gojeno piščančje meso, ki je leta 2020 prejelo pravno odobritev za prodajo v Singapurju, medtem ko je podjetje UPSIDE Foods leta 2023 v ZDA pridobilo dovoljenje za proizvodnjo gojenega piščančjega mesa (Good Food Institute, 2025). Podjetje Mosa Meat medtem nadaljuje razvoj tehnologij gojenega govejega mesa, ki temeljijo na prvotnih raziskavah Univerze v Maastrichtu (Good Food Institute, 2025). Tako danes vse več

podjetij po svetu razvija tehnologije za povečanje obsega proizvodnje, zmanjševanje proizvodnih stroškov in izboljšanje kakovosti izdelkov, kar še vedno predstavlja ključne izzive (glej spodaj) pri komercializaciji gojenega mesa (Wang, 2025; Good Food Institute, 2025).

Gojeni mesni izdelki bodo ob vstopu na trg verjetno deležni precejšnje pozornosti, pa tudi zadržanosti in skepticizma potrošnikov (Garcez de Oliveira Padilha, 2022; Verbeke, 2014; Verbeke, 2015). Eden od razlogov je, da nekateri ljudje takšne izdelke dojemajo kot etično sporne, saj vključujejo poseganje v naravne biološke procese, kar se včasih opisuje tudi kot »igranje Boga« (Verbeke, 2014). Pogosto se pojavljajo tudi primerjave med gojenim mesom in gensko spremenjenimi (GS) živili, ki kljub znanstvenim dokazom o njihovi varnosti in morebitnih okoljskih koristih še vedno naletijo na odpor dela javnosti. Pomembna ovira pri sprejemanju gojenega mesa so tudi njegove organoleptične oziroma senzorične lastnosti, predvsem okus in tekstura (Bryant, 2020; Garcez de Oliveira Padilha, 2022). Čeprav podjetji Mosa Meat in Aleph Farms poročata o uspešni proizvodnji užitnih izdelkov iz gojenega govejega mesa, vključno z burgerji in zrezki, so za popolno posnemanje lastnosti konvencionalnega mesa potrebne nadaljnje izboljšave (Garcez de Oliveira Padilha, 2022; Verbeke, 2015). Poleg tega so izdelki iz gojenega mesa pogosto označeni kot »umetni«, »sintetični« ali celo »ponarejeni«, kar lahko zmanjšuje njihovo sprejemljivost med potrošniki. Raziskave kažejo, da so prvi odzivi potrošnikov pogosto povezani z občutki odpora ali z dojemanjem takšnih izdelkov kot nečesa nenaravnega (Garcez de Oliveira Padilha, 2022; Verbeke, 2014). Vendar pa se odnos potrošnikov praviloma izboljša, kadar prejmejo podrobnejše informacije o postopkih proizvodnje in morebitnih koristih gojenega mesa. V takšnih primerih se njihova skrb pogosto preusmeri na vprašanja regulativnega nadzora, zagotavljanja varnosti ter ustreznega označevanja izdelkov (Bryant, 2020; Garcez de Oliveira Padilha, 2022).

1.6.4. Glavni izzivi pri proizvodnji gojenega mesa

Kljub napredku, doseženemu v zadnjem desetletju, se proizvodnja gojenega mesa še vedno sooča s številnimi pomembnimi izzivi (slika 10). Eden ključnih izzivov je izbira in vzdrževanje ustreznih celičnih virov. Celice morajo izkazovati visoko sposobnost proliferacije, genetsko stabilnost ter sposobnost diferenciacije v mišično in maščobno tkivo, kar je nujno za učinkovito tvorbo mesa (Wang, 2025). Pomemben korak, ki zahteva nadaljnje izboljšave, je tudi prilagajanje celic na gojenje v bioreaktorjih, kjer rastejo v suspenziji in ne pritrjene na podlago, kot je običajno pri laboratorijskem gojenju celic. Drug pomemben izziv predstavlja razvoj gojišč brez seruma, ki bi bila hkrati cenovno dostopna, saj so pogosto uporabljene sestavine, kot je fetalni goveji serum, drage, etično sporne in zaradi svoje nestalne sestave manj primerne za proizvodnjo hrane v velikem obsegu (Wang, 2025). Ključnega pomena je tudi razvoj užitnih nosilnih matriksov ali mikronosilcev, ki omogočajo tridimenzionalno rast in organizacijo tkiva ter s tem posnemanje teksture in strukture konvencionalnih mesnih izdelkov (Wang, 2025). Povezovanje procesov proliferacije celic, njihove diferenciacije, oblikovanja tkiva in pobiranja končnega produkta v razširljiv ter ekonomsko vzdržen proizvodni sistem še vedno predstavlja eno največjih ovir za komercializacijo tehnologij gojenega mesa (Wang, 2025).



Slika 10. Ključne tehnologije in glavni izzivi pri proizvodnji gojenega mesa

1.6.4.1. Izbira izvornih celic: gensko inženirstvo matičnih celic za izboljšanje razširjenosti proizvodnje gojenega mesa

Pomemben tehnološki izziv pri proizvodnji gojenega mesa predstavlja omejena sposobnost proliferacije živalskih matičnih celic, ki omejuje pridobivanje velikih količin celične biomase, potrebne za industrijsko proizvodnjo (Post, 2012; Zirman in sod., 2025). Proizvodnja gojenega mesa temelji na namnoževanju živalskih celic *in vitro* do zelo visokih gostot, preden se sproži njihova diferenciacija v tkiva, kot sta mišično in maščobno. Zato je učinkovita proliferacija celic eden ključnih pogojev za proizvodne procese v večjem obsegu (Stephens in sod., 2018; Zirman in sod., 2025). Vendar pa številne primarne živalske celice v kulturi izkazujejo omejeno replikativno življenjsko dobo, kar pomeni, da je njihova sposobnost ponavljajoče se celične delitve omejena in lahko pomembno vpliva na skupni izplen gojene biomase (Ben-Arye in Levenberg, 2019).

Goveje mezenhimske matične celice (Bovine mesenchymal stem cells, bMSC), ki se pogosto uporabljajo v raziskavah gojenega mesa, predstavljajo pomemben celični vir, saj se lahko diferencirajo v različna tkiva mezodermalnega izvora, vključno z miociti in adipociti, ki sta glavni sestavini mesnega tkiva (Zirman in sod., 2025). Te celice je mogoče izolirati iz odraslih tkiv in jih namnoževati v ustaljenih pogojih celičnih kultur, zaradi česar so primerne tako za laboratorijske kot industrijske aplikacije (Post, 2012; Zirman in sod., 2025). Kljub tem prednostim pa goveje mezenhimske matične celice običajno rastejo razmeroma počasi. Njihov čas podvojitve je daljši kot pri pluripotentnih matičnih celicah, kar zmanjšuje učinkovitost namnoževanja celic med gojenjem v večjem obsegu (Stephens in sod., 2018; Zirman in sod., 2025).

Poleg počasnejše proliferacije so goveje mezenhimske matične celice po daljšem obdobju gojenja nagnjene tudi k replikativni senescenci, kar dodatno omejuje njihov potencial za proizvodnjo v večjem obsegu (Zirman in sod., 2025). Za celično senescenco je značilna nepovratna zaustavitev celične rasti, pri čemer celice ostanejo presnovno aktivne. Do nje lahko pride zaradi krajšanja telomer, kopičenja poškodb DNA, oksidativnega stresa

ali aktivacije tumorskih supresorskih poti (Campisi in d'Adda di Fagagna, 2007; Zirman in sod., 2025). Ko celice preidejo v senescentno stanje, izgubijo sposobnost delitve in sodelovanja pri tvorbi tkiva, kar bistveno zmanjša učinkovitost dolgoročnega namnoževanja celičnih kultur.

Pojav senescence tako predstavlja eno glavnih ozkih grl pri proizvodnji gojenega mesa. Ko se celične populacije prezgodaj prenehajo deliti, se zmanjša skupna količina biomase, ki jo je mogoče pridobiti iz kulture, kar zahteva pogostejše nadomeščanje celic ali ponavljajoče se postopke njihove izolacije. To povečuje kompleksnost proizvodnje in njene stroške (Stephens in sod., 2018; Ben-Arye in Levenberg, 2019). Zaradi tega sta izboljšanje proliferacijske sposobnosti matičnih celic in upočasnitev pojava senescence med ključnimi cilji raziskav na področju gojenega mesa, saj bi lahko pomembno prispevala k večji razširljivosti in ekonomski upravičenosti proizvodnje mesa na osnovi celičnih kultur (Zirman in sod., 2025).

Zapišite svoje razmišljanje:

Študija primera 7: Združeno izločitveno CRISPR presejanje kaže na ključne regulatorje razmnoževanja govejih matičnih celic za proizvodnjo gojenega mesa (Zirman in sod., 2025)

Strategija

Da bi identificirali genetske dejavnike, ki uravnavajo proliferacijo celic, so raziskovalci uporabili pristop združenega izločitvenega presejanja (*pooled knockout screening*) s sistemom CRISPR-Cas9, usmerjen na več sto genov, povezanih s celično rastjo in transkripcijsko regulacijo. Z vnosom knjižnice genskih izločitev v matične celice so omogočili, da so celice z ugodnimi mutacijami v kulturi postopoma prevladale nad drugimi.

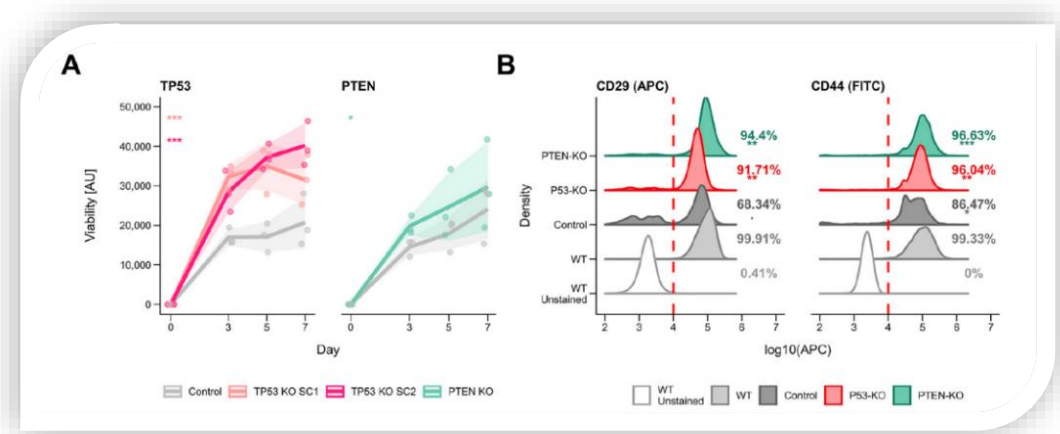
S spremljanjem sprememb v zastopanosti vodilnih RNA (guide RNA) skozi čas so lahko določili gene, katerih izključitev izboljša razmnoževanje matičnih celic.

Rezultati

S presejalnim poskusom CRISPR so raziskovalci prepoznali gena TP53 in PTEN kot ključna regulatorja proliferacije matičnih celic. Izključitev teh genov je pomembno povečala hitrost rasti govejih mezenhimskih matičnih celic ter upočasnila pojav celične senescence. Gensko spremenjene celice so se razmnoževale hitreje in ohranile sposobnost rasti dlje časa kot nespremenjene celice. Transkriptomske analize so dodatno pokazale povečano izražanje genov, povezanih z napredovanjem celičnega cikla in replikacijo DNA, kar kaže na izboljšano proliferacijsko sposobnost. Raziskava pa je hkrati pokazala zmanjšano sposobnost diferenciacije v maščobne celice, kar nakazuje na kompromis med proliferacijo in diferenciacijo.

Pomen raziskave

Raziskava je pokazala, kako je mogoče z uporabo genskega inženirstva in funkcijske genomike optimizirati celične linije za proizvodnjo gojenega mesa. Izboljšanje proliferacijske sposobnosti in podaljšanje življenjske dobe gojenih celic bi lahko povečala proizvodnjo biomase ter zmanjšala proizvodne stroške. Vendar uporaba gensko spremenjenih celic v prehranskih sistemih odpira tudi pomembna regulativna in varnostna vprašanja, ki jih bo treba ustrezno nasloviti pred komercialno uporabo takšnih tehnologij.



Slika 11. Potrditev pomena izključitve genov TP53 in PTEN v AD-bMSCs (Adipose-derived bovine mesenchymal stem cells – goveje mezenhimske matične celice, pridobljene iz maščobnega tkiva)

Opombe k sliki 11:

A: AD-bMSC so bile spremenjene s sistemom Cas9 in sgRNA, usmerjeno bodisi na gen TP53 (rdeče), PTEN (zeleno) ali na kontrolno sgRNA, usmerjeno v nekodirajoče območje genoma (sivo) (n = 3 za vsako skupino). Viabilnost celic so določili z uporabo testa Alamar Blue 3., 5. in 7. dan po nacepljanju celic. Celice z izključenima genoma TP53 in PTEN so izkazovale značilno večjo viabilnost v primerjavi s kontrolnimi celicami divjega tipa (WT). Osenčena območja predstavljajo 95-% interval zaupanja.

B: Analiza površinskih označevalcev CD29 (APC) in CD44 (FITC) v govejih mezenhimskih matičnih celicah (bMSC) s pretočno citometrijo. Celice z izključenima genoma TP53 in PTEN so ohranile raven izražanja površinskih označevalcev, primerljivo s celicami divjega tipa (WT), medtem ko je bila v kontrolni skupini opažena manjša stopnja zmanjšanja njihovega izražanja.

1.6.4.2 Gojišča za celične kulture: gojišča brez seruma

Proizvodnja gojenega mesa temelji na namnoževanju živalskih mišičnih celic *in vitro* v nadzorovanih razmerah, kjer imajo celice na voljo vsa hranila in signale, potrebne za rast, diferenciacijo in tvorbo tkiva (Post in sod., 2020). Eden najpomembnejših elementov teh sistemov je gojišče za celične kulture, ki zagotavlja ključna hranila, aminokisline, vitamine, rastne dejavnike in signalne molekule, ki uravnavajo preživetje, proliferacijo in diferenciacijo celic (Kolkmann in sod., 2022). Sestava gojišča ima osrednjo vlogo pri določanju učinkovitosti rasti celic in neposredno vpliva na razširljivost ter ekonomsko upravičenost proizvodnje gojenega mesa (Stephens in sod., 2018).

Tradicionalna gojišča za celične kulture pogosto vsebujejo fetalni goveji serum (FBS), ki je široko uporabljan dodatek in vsebuje kompleksno mešanico beljakovin, hormonov, adhezijskih ter rastnih dejavnikov, ki podpirajo pritrjanje celic in njihovo proliferacijo (Gstraunthaler, 2003). FBS že dolgo velja za standardno sestavino gojišč za celične kulture sesalcev, saj učinkovito spodbuja rast celic in ohranja njihovo viabilnost pri različnih tipih celic (Allen in sod., 1985).

Kljub svoji učinkovitosti pa uporaba FBS predstavlja pomemben izziv za proizvodnjo gojenega mesa in eno glavnih ovir za njegovo komercializacijo v velikem obsegu. Prvič, FBS pridobivajo iz krvi plodov med zakolom brejih krav, kar odpira pomembna etična vprašanja in je v nasprotju z osnovnim ciljem proizvodnje mesa brez zakola živali. Drugič, FBS je slabo opredeljen biološki material, saj se njegova sestava razlikuje med posameznimi serijami in dobavitelji, kar lahko povzroča neenakomerno uspešnost celičnih kultur in otežuje standardizacijo proizvodnega procesa. Tretjič, variabilnost sestave predstavlja velik problem tudi za proizvodnjo v industrijskem merilu, kjer sta ponovljivost postopkov in strogo zagotavljanje kakovosti ključnega pomena (Gstraunthaler, 2003; Kolkmann in sod., 2022; Post in sod., 2020; Stephens in sod., 2018).

Poleg tega je FBS ena najdražjih sestavin celičnih gojišč, zato pomembno prispeva k skupnim stroškom proizvodnje gojenega mesa (Specht in sod., 2018). Dolgoročna odvisnost od fetalnega govejega seruma bi lahko postala tudi nevzdržna, če bi se proizvodnja gojenega mesa močno povečala, hkrati pa bi se zmanjšal obseg konvencionalne živinoreje, kar bi lahko povzročilo pomanjkanje vira te sestavine gojišč (Kolkmann in sod., 2022). Zaradi tega je postal razvoj gojišč brez seruma in kemično definiranih gojišč ena ključnih raziskovalnih prioritet na področju gojenega mesa, saj lahko prispeva k večji etični sprejemljivosti, nižjim proizvodnim stroškom in razvoju proizvodnih procesov v večjem obsegu (Messmer in sod., 2022).

Zapišite svoje razmišljanje:

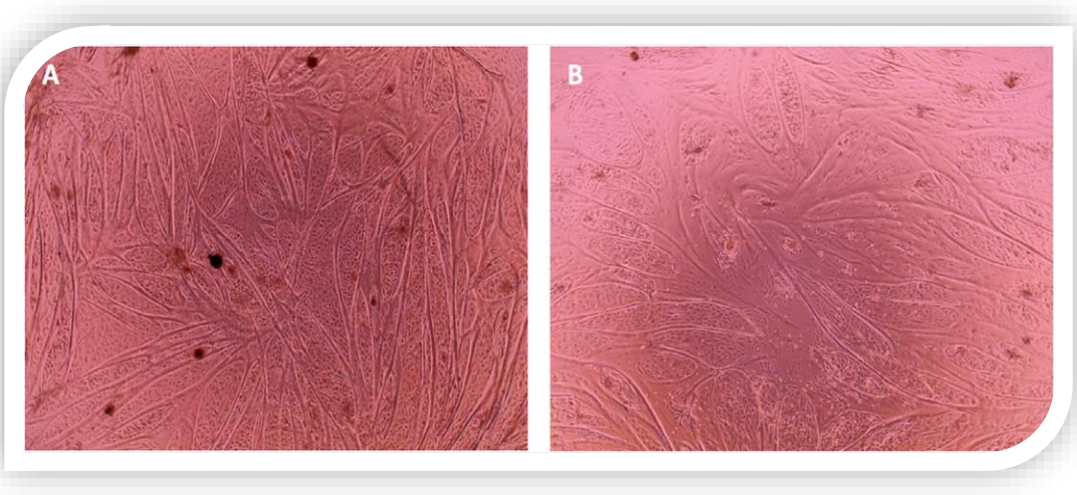
Študija primera 8: Razvoj definiranih gojišč za in vitro namnoževanje primarnih govejih satelitskih celic (Kolkmann in sod., 2022)

Strategija

Raziskovalci so se osredotočili na razvoj gojišč za celične kulture brez sestavin živalskega izvora, v katerih serum nadomeščajo natančno opredeljene mešanice rastlinskih beljakovin, rekombinantnih rastnih dejavnikov in sintetičnih hranil. Namen takšnih formulacij je zagotoviti vse biokemijske signale, potrebne za proliferacijo in diferenciacijo celic, pri tem pa popolnoma izločiti sestavine živalskega izvora. Z razvojem kemično definiranih gojišč lahko raziskovalci izboljšajo tudi konsistentnost proizvodnega procesa ter dosežejo boljši nadzor nad celično presnovo in rastjo.

Rezultati

Eksperimentalne raziskave so pokazale, da lahko formulacije brez seruma uspešno podpirajo proliferacijo mišičnih in matičnih celic, ki se uporabljajo pri proizvodnji gojenega mesa. V nekaterih sistemih so optimizirane sestave gojišč dosegle primerljive stopnje rasti kot gojišča, ki vsebujejo serum, hkrati pa so zagotovile večjo ponovljivost rezultatov med posameznimi serijami. Poleg tega sistemi brez seruma raziskovalcem omogočajo boljše razumevanje vpliva posameznih rastnih dejavnikov in hranil na vedenje celic, kar odpira možnosti za nadaljnjo optimizacijo namnoževanja in diferenciacije celic.



Slika 12. Mikroskopske slike celičnih kultur v faznem kontrastu sedmi dan diferenciacije. Celice dveh različnih živali (A in B), ki so rasle v gojišču brez seruma (SFM), so bile pri 16 podvojitvah populacije prenesene v pogoje za diferenciacijo. Po 24 urah gojenja v SFM, ko so celice dosegle 90-% konfluentnost (delež površine, ki jo v posodi pokrivajo celice, oziroma stopnja, ko se celice med seboj staknejo) je bila sprožena diferenciacija

Pomen raziskave

Razvoj gojišč **brez sestavin živalskega izvora in brez seruma** je ključnega pomena za komercializacijo gojenega mesa. Z zmanjšanjem odvisnosti od surovin živalskega izvora takšna gojišča izboljšujejo etično sprejemljivost proizvodnje, znižujejo proizvodne stroške ter olajšujejo izpolnjevanje regulativnih zahtev za proizvodnjo hrane v velikem obsegu.

1.6.4.3. Oblikovanje tkiva: razvoj ustreznih nosilnih matriksov

Razvoj ustreznih nosilnih matriksov, ki omogočajo oblikovanje in organizacijo mišičnega tkiva, predstavlja enega največjih izzivov pri razvoju gojenega mesa. Kljub potencialnim okoljskim in etičnim prednostim v primerjavi s konvencionalno živinorejsko proizvodnjo ta izziv še vedno omejuje njegovo komercializacijo v večjem obsegu (Post in sod., 2020; Stephens in sod., 2018; Seah in sod., 2022). Nosilni matriksi imajo pri tem ključno vlogo, saj posnemajo zunajcelični matriks (Extracellular matrix, ECM) in zagotavljajo strukturno oporo za tridimenzionalni razvoj tkiva (Seah in sod., 2022).

V konvencionalnem mesu so mišična vlakna razporejena v visoko organizirane in usmerjene strukture, ki določajo teksturo in mehanske lastnosti mesnih izdelkov (Ben-Arye in sod., 2020). Zaradi tega proizvodnja gojenega mesa zahteva biomateriale, ki spodbujajo pritrjanje celic, njihovo proliferacijo, usmerjeno rast in diferenciacijo v funkcionalna mišična vlakna (Post in sod., 2020).

Biomateriali, ki se trenutno uporabljajo za izdelavo nosilnih matriksov, imajo številne omejitve (Seah in sod., 2022). Številni nosilni matriksi, razviti za tkivno inženirstvo, temeljijo na beljakovinah živalskega izvora, kot sta kolagen in želatina, saj izkazujejo visoko biokompatibilnost in učinkovito podpirajo pritrjanje celic (Post in sod., 2020). Vendar pa so takšni materiali v nasprotju s trajnostnimi in etičnimi cilji proizvodnje gojenega mesa, ker izvirajo iz živalskih virov (Stephens in sod., 2018). Raziskovalci zato preučujejo uporabo rastlinskih beljakovin in drugih naravnih biomaterialov kot alternativ za izdelavo nosilnih matriksov (Xiang in sod., 2022). Kljub temu ostaja iskanje užitnih, cenovno dostopnih in za proizvodnjo v velikem merilu primernih biomaterialov, ki učinkovito podpirajo rast mišičnih celic, eden glavnih izzivov na področju gojenega mesa (Seah in sod., 2022).

Poleg izbire materialov predstavljata dodatni izziv tudi strukturna kompleksnost in organizacija tkiva (Ben-Arye in sod., 2020). Naravno mišično tkivo sestavljajo usmerjena mišična vlakna, ki jih podpirajo vezivno tkivo in maščobne celice, skupaj pa določajo senzorične lastnosti mesa (Post in sod., 2020). Za posnemanje teh lastnosti morajo imeti nosilni matriksi ustrezne mehanske lastnosti, poroznost in površinske značilnosti, ki spodbujajo usmerjeno rast celic ter tvorbo mišičnih vlaken (Singh in sod., 2022). Brez takšnih strukturnih signalov lahko izdelki iz gojenega mesa izgubijo vlaknasto teksturo, značilno za konvencionalno meso, še posebej pri izdelkih iz celih kosov mesa, kot so zrezki ali piščančji fileji (Ben-Arye in sod., 2020).

Drug pomemben inženirski izziv predstavljajo omejitve prenosa snovi v debelejših tkivnih strukturah (Karande in sod., 2004). Med rastjo mišičnega tkiva v nosilnih matriksih morata kisik in hranila učinkovito prehajati skozi celotno strukturo, da se ohrani viabilnost celic (Karande in sod., 2004). Debelejši nosilni matriksi pogosto omejujejo difuzijo hranil, kar lahko povzroči zmanjšano rast celic ali nastanek nekrotičnih območij znotraj tkiva (Post in sod., 2020). Zato ostaja načrtovanje nosilnih matriksov, ki omogočajo zadosten transport hranil in hkrati zagotavljajo mehansko stabilnost, pomemben izziv pri proizvodnji gojenega mesa (Seah in sod., 2022).

Nosilni matriksi za gojeno meso morajo poleg tega izpolnjevati tudi zahteve glede varnosti živil, ekonomičnosti in možnosti proizvodnje v velikem obsegu (Stephens in sod., 2018). Za razliko od biomedicinskih nosilnih matriksov, ki jih pred vsaditvijo odstranijo, lahko nosilni matriksi pri gojenem mesu ostanejo del končnega živila (Seah in sod., 2022). Zato morajo biti užitni, netoksični, cenovno dostopni in primerni za industrijsko proizvodnjo hrane (Xiang in sod., 2022). Razvoj nosilnih matriksov, ki hkrati izpolnjujejo biološke, inženirske in živilsko-varnostne zahteve, ostaja tako eden največjih izzivov pri komercializaciji tehnologij gojenega mesa (Post in sod., 2020).

Študija primera 9: Užitni filmi (edible films) za proizvodnjo gojenega mesa (Xiang in sod., 2022)

Strategija

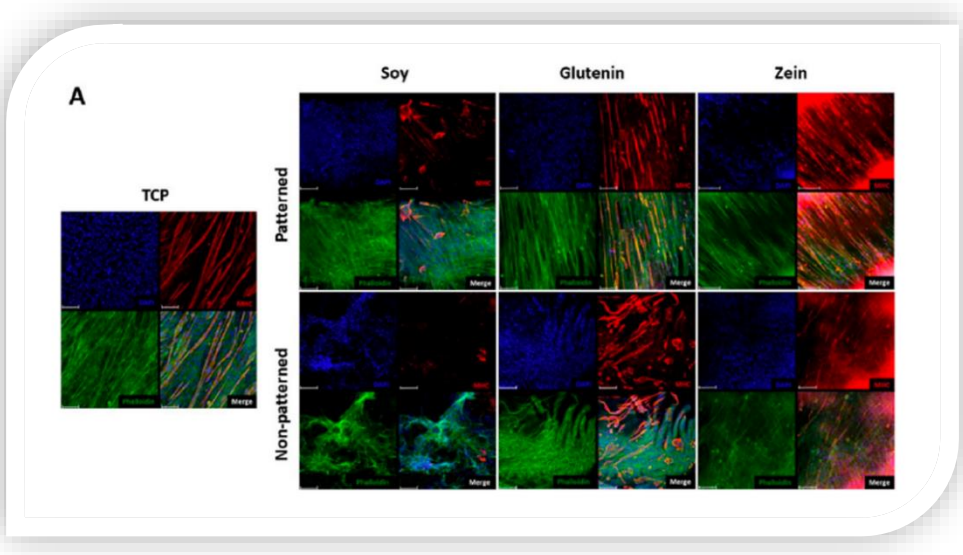
Za reševanje tega izziva so raziskovalci razvili **užitne biomateriale – filme iz rastlinskih beljakovin in polisaharidov**, ki lahko služijo kot nosilni matriksi za rast mišičnih celic. Iz različnih materialov, med drugim iz sojinih beljakovin, glutenina, zeina, alginata, hitozana, celuloznih nanovlaken in konjaka (*konjac*), so s postopki, primernimi za živilsko uporabo, izdelali tanke filme. Z uporabo **kalupov iz polidimetilsiloksana olydimethylsiloxane (PDMS)** so oblikovali strukturirane površine z mikrožlebovi, namenjenimi usmerjanju rasti celic in posnemanju organizacije mišičnih vlaken.

Rezultati

Analize z vrstično elektronsko mikroskopijo so potrdile, da so biomaterialni filmi uspešno posnemali mikrostrukturirane vzorce kalupov in oblikovali poravnane žlebove, ki lahko usmerjajo orientacijo celic. Poskusi s celičnimi kulturami so pokazali, da **filmi na osnovo beljakovin, zlasti glutenina in zeina**, omogočajo boljše pritrjanje celic kot materiali na osnovi polisaharidov. Mišične celice, gojene na teh substratih, so ostale viabilne, se sčasoma razmnoževale in razvile podolgovato obliko, značilno za mišična vlakna. Pomembno je tudi, da so strukturirani beljakovinski filmi spodbujali nastanek **nastanek poravnanih miotubov**, kar predstavlja ključen korak pri posnemanju vlaknaste strukture naravnega mišičnega tkiva.

Pomen raziskave

Raziskava kaže, da lahko **užitni nosilni matriksi rastlinskega izvora učinkoviti podpirajo rast, usmerjeno razporeditev in diferenciacijo mišičnih celic**, kar predstavlja obetavno strategijo za proizvodnjo strukturno oblikovanih izdelkov iz gojenega mesa. Ker so uporabljeni materiali primerni za prehrano ljudi in omogočajo proizvodnjo v večjem obsegu, predstavljajo praktično rešitev za izboljšanje teksture in strukturnih lastnosti gojenega mesa.



Slika 13. Diferenciacija celic C2C12 na različnih filmih z vzorčeno površino in brez nje. Diferencirani miotubi so označeni z imunskim barvanjem za težko verigo miozina (MHC), jedra pa obarvana z barvilom DAPI.
Barvne oznake: modra – DAPI; rdeča – težka veriga miozina (MHC); zelena – faloidin. TCP: plošča za gojenje tkivnih kultur (*tissue culture plate*). Merilo = 100 µm

1.7. Inovativno delo študentov: Napredek na področju gojenega mesa – trajnostna rešitev za podnebne spremembe

Za opredelitev vizije in tehničnega pristopa pri razvoju svojega projekta uporabite spodnjo predlogo.

Inovativne ideje študentov

Naslov projekta in področje inovacije

Predlagani naslov: (npr. *Rastlinski izvlečki kot nadomestilo za serum in druge proizvode živalskega izvora*)

Izbrano področje: (npr. *Proliferacija celic in diferenciacija*)

Opredelitev problema

Opredelite konkretni izziv, ki ga želite nasloviti.

Primer: *"Naraščajoče svetovno povpraševanje po beljakovinah je pospešilo iskanje trajnostnih alternativ konvencionalnim proizvodom živalskega izvora. Kljub temu zaradi nadaljnje uporabe sestavin živalskega izvora v proizvodnih procesih ostajajo prisotni etični, tehnološki in ekonomski izzivi, kar spodbuja razvoj sistemov brez sestavin živalskega izvora in brez seruma, ki zagotavljajo večjo konsistentnost proizvodnje ter lažje izpolnjevanje pravnih zahtev."*

Ključna vprašanja za razmislek:

- Kateri problem obstaja pri trenutni tehnologiji?
- Zakaj je pomembno rešiti ta problem?
- Koga ta izziv prizadene oziroma na koga vpliva?

Vaša predelitev problema:

Strategija (“Kako?”)

Pojasnite znanstveni pristop ali tehnološki proces, ki ga boste uporabili.

Materiali ali biološki inputi:

- Katere komponente boste testirali ali razvili?

Primer: *izvlečki mikroalg (npr. Chlorella vulgaris) kot potencialni dodatki za spodbujanje rasti.*

- Nosilni matriksi: Katere materiale boste uporabili??

Eksperimentalni postopek:

Opišite korake, ki jih nameravate izvesti.

- Ekstrakcija in karakterizacija bioaktivnih spojin,
- Formulacija gojišč brez seruma,
- Testiranje učinkov na proliferacijo ali diferenciacijo celic.

Vaša strategija:

Pomen

Pojasnite, zakaj je vaš projekt pomemben za proizvodnjo gojenega mesa ali za biotehnologijo.

Razmislite:

- Ali vaš projekt prispeva k zmanjšanju proizvodnih stroškov?
- Ali omogoča odpravo sestavin živalskega izvora?
- Ali izboljšuje razširljivost proizvodnje ali njeno trajnost?

Primer: *projekt bi lahko prispeval k razvoju gojišč brez sestavin živalskega izvora, kar bi zmanjšalo proizvodne stroške ter izboljšalo etično sprejemljivost in regulativno skladnost tehnologij gojenega mesa.*

Zakaj je vaš projekt pomemben:

Tehnični izzivi in raziskovalni cilji

Opredelite ključne znanstvene izzive (»ozka grla«), ki jih morate premagati, in določite svoje raziskovalne cilje.

Primeri ciljev:

- ***Cilj 1:*** *identificirati spojine rastlinskega ali algnega izvora, ki podpirajo proliferacijo mišičnih celic.*
- ***Cilj 2:*** *ovrednotiti učinkovitost teh izvlečkov v primerjavi s konvencionalnimi gojišči na osnovi seruma.*
- ***Cilj 3:*** *Optimizirati koncentracijo in formulacijo, ki bo omogočila rast in diferenciacijo celic.*

Vaši raziskovalni cilji:

Cilj 1:

Cilj 2:

Cilj 3:

Predstavitev vpliva projekta (Impact Pitch)

V dveh povedih pojasnite, zakaj bi moralo biotehnološko podjetje ali univerza financirati vaš projekt?
V predstavitvi poudarite: **inovativnost** rešitve in **pričakovani učinek.**

Primer: *razvoj cenovno dostopnih gojišč brez sestavin živalskega izvora bi lahko pomembno zmanjšal stroške proizvodnje gojenega mesa ter odpravil številne etične pomisleke, povezane z uporabo živalskih surovin. Takšen pristop bi lahko pospešil prehod k trajnostni proizvodnji beljakovin ter izboljšal razširljivost proizvodnje in regulativno sprejemljivost tehnologij gojenega mesa.*

Vaša predstavitev projekta:

1.8. Zaključek

V študijah ocene življenjskega cikla (Life Cycle Assessment – LCA) so raziskovalci proučevali potencialne okoljske vplive gojenega mesa v primerjavi s konvencionalno živinorejsko proizvodnjo (Tuomisto in Teixeira de Mattos, 2011; Risner in sod., 2024; Blackstone in sod., 2025). Rezultati kažejo, da bi lahko proizvodnja gojenega mesa bistveno zmanjšala potrebe po zemljiščih, saj odpravlja potrebo po obsežnih pašnih površinah in pridelavi krmnih rastlin. Zemljišča, ki se danes uporabljajo za živinorejo, bi bilo mogoče ponovno nameniti za gozdove ali druge naravne ekosisteme, kar bi prispevalo k ohranjanju biotske raznovrstnosti in večji vezavi ogljika. Gojeno meso bi lahko zmanjšalo tudi emisije toplogrednih plinov, povezane z živinorejsko proizvodnjo, zlasti emisije metana, ki nastajajo pri prebavi prežvekovalcev (Poore in Nemecek, 2018). Zaradi tega predstavlja gojeno meso potencialno prelomno inovacijo, ki bi lahko pomembno zmanjšala okoljske obremenitve, povezane s konvencionalno živinorejo, hkrati pa ohranila dostop do beljakovin živalskega izvora.

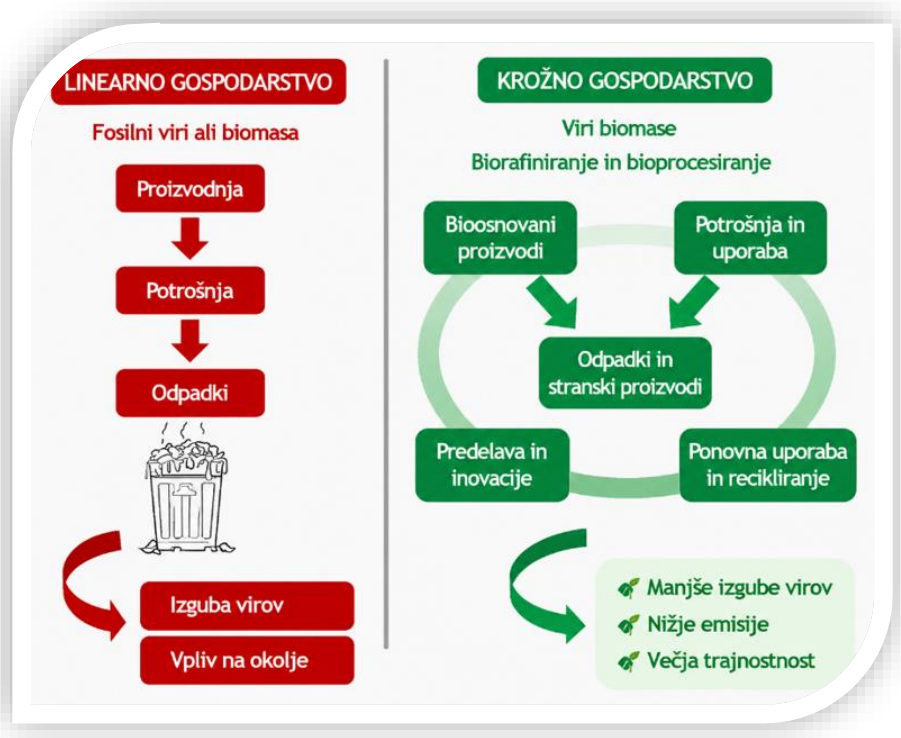
S proizvodnjo mesa neposredno iz živalskih celic in v nadzorovanih razmerah ponuja gojeno meso možnost zmanjšanja okoljskih vplivov ter ločitve proizvodnje mesa od intenzivne živinoreje. Kljub temu je treba pred njegovo široko komercializacijo rešiti številne tehnološke in družbeno-ekonomske izzive. Med najpomembnejše ovire sodijo znižanje proizvodnih stroškov, nadomeščanje sestavin živalskega izvora v gojiščih s cenovno dostopnimi alternativami ter izboljšanje teksture in prehranske vrednosti gojenih izdelkov. Poleg tega so za odobritev takšnih izdelkov na trgu potrebni jasni regulativni okviri in ustrezne ocene varnosti, medtem ko ostaja sprejemljivost med potrošniki eden ključnih dejavnikov za njihovo uspešno uveljavitev. Nadaljnje interdisciplinarno raziskovanje na področjih razvojne biologije, celične in molekularne biologije, biotehnologije, tkivnega inženirstva, živilstva ter bioprocesnega inženirstva bo imelo ključno vlogo pri premagovanju teh izzivov.

Poglavje 2: Spodbujanje trajnostnega razvoja s krožno bioekonomijo in učinkovito rabo virov

2.1. Uvod: Biotehnologija pri trajnostnem upravljanju virov

Trajnostni razvoj predstavlja dolgoročni okvir, ki združuje varstvo okolja, gospodarsko rast in socialno pravičnost z namenom zagotavljanja kakovostne prihodnosti za bodoče generacije. Zaradi vse večje spremenljivosti podnebja, pospešenega izčrpavanja virov in degradacije okolja zahteva doseganje trajnostnega razvoja sprejemanje strategij, ki zmanjšujejo našo odvisnost od omejenih virov. Hkrati se z uveljavljanjem teh strategij krepi gospodarska odpornost in družbena blaginja, saj podpirajo vse tri medsebojno povezane stebre trajnosti: okolje, gospodarstvo in družbo. Biotehnologija pomembno prispeva k tem prehodom, saj omogoča učinkovito, obnovljivo in trajnostno valorizacijo bioloških virov.

Tradicionalni linearni gospodarski modeli sledijo načelu »vzemi–izdelaj–zavrzi« (angl. take–make–dispose), ki predstavlja način proizvodnje in potrošnje, pogosto kritiziran v raziskavah trajnostnega razvoja zaradi spodbujanja prekomernega izkoriščanja virov, velike količine odpadkov in degradacije okolja (Geissdoerfer in sod., 2016; Eelager in sod., 2025). Takšni modeli linearnega gospodarstva niso skladni s sodobnimi cilji trajnostnega razvoja, zlasti v sektorjih, ki temeljijo na bioloških virih, kot so kmetijstvo, proizvodnja hrane, energetika in farmacevtska industrija. To neskladje je spodbudilo vse večje zanimanje za alternativne pristope, predvsem za modele krožnega gospodarstva, ki poudarjajo ponovno kroženje virov in razmišljanje skozi celoten življenjski cikel proizvodov z namenom zmanjševanja količine odpadkov ter izboljšanja učinkovitosti rabe virov (Cahyadi in sod., 2024). Učinkovita raba virov je tako postala eno ključnih načel trajnostnega razvoja, saj stremi k zmanjševanju nastajanja odpadkov ob hkratnem ustvarjanju največje možne gospodarske, okoljske in družbene vrednosti.



Slika 14. Primerjav linearnga in krožnega gospodarstva

Krožna bioekonomija združuje načela in temeljne stebre krožnega gospodarstva ter bioekonomije, saj temelji na trajnostni rabi obnovljivih bioloških virov, valorizaciji bioloških odpadnih tokov ter kroženju materialov in hranil v zaprtih sistemih. Za razliko od konvencionalnih pristopov bioekonomije, ki temeljijo na linearnih vrednostnih verigah, daje krožna bioekonomija prednost regeneraciji virov, kaskadni rabi biomase ter pretvorbi odpadkov v nove vire in proizvode.

Z biotehnološkega vidika temelji krožna bioekonomija na različnih bioloških procesih, kot so mikrobna fermentacija, encimska pretvorba, anaerobna digestija in optimizacija bioprocesov, ki omogočajo pretvorbo organskih ostankov v proizvode z dodano vrednostjo. Sistemi, ki temeljijo na delovanju mikroorganizmov in encimov, omogočajo pretvorbo kmetijskih ostankov, stranskih proizvodov živilske industrije ter drugih organskih materialov v bioenergijo, biološko osnovane proizvode, platformne kemikalije (osnovne, visoko vsestranske spojine, ki služijo kot ključni gradniki za sintezo številnih kompleksnejših kemičnih izdelkov) in biomateriale, s čimer se valorizirajo snovni tokovi, ki bi sicer ostali neizkoriščeni. Biotehnologija tako neposredno prispeva k učinkovitejši rabi virov in blaženju podnebnih sprememb v okviru krožne bioekonomije z izboljšanjem učinkovitosti pretvorbe, zmanjševanjem izgub virov ter ponovno uporabo obnovljivih surovin.

Učinkovita raba virov v biotehnologiji ne zajema zgolj učinkovite uporabe surovin, temveč vključuje tudi manjšo porabo vode in energije, nižje emisije toplogrednih plinov, zlasti med procesiranjem, ter večje izkoristke zaradi optimizacije procesov. Za vrednotenje okoljskih vplivov biološko osnovanih proizvodov in bioprocesov se uporablja analiza življenjskega cikla (Life Cycla Analysis – LCA), medtem ko tehno-ekonomska analiza ocenjuje njihovo gospodarsko izvedljivost in ekonomske koristi. Na globalni ravni podpira krožna bioekonomija več ciljev trajnostnega razvoja (SDGs), zlasti odgovorno proizvodnjo in potrošnjo, podnebne ukrepe, čisto energijo ter trajnostno industrijo. Za študente biotehnologije je razumevanje teh teoretičnih izhodišč ključnega pomena za razvoj in načrtovanje rešitev, ki so hkrati tehnično učinkovite, okoljsko vzdržne in družbeno odgovorne.



Slika 15. Cilji trajnostnega razvoja Združenih narodov (SDGs)

Kljub temu so izzivi trajnostnega razvoja dinamični in se nenehno spreminjajo. Podnebne spremembe, rast prebivalstva in spreminjajoči se vzorci potrošnje vplivajo tako na razpoložljivost kot tudi na kakovost bioloških virov. Zato je doseganje trajnostnega razvoja tesno povezano s sposobnostjo predvidevanja prihodnjih tveganj ter uvajanja prilagodljivih in inovacijsko usmerjenih rešitev. To zahteva preseganje zgolj teoretičnega znanja ter prehod k načrtovanju na podlagi scenarijev in razvoju inovacijsko usmerjenih strategij.

To poglavje predstavlja celovit učni vir, pripravljen v okviru Erasmus+ projekta »Novel Biotechnological Solutions in Climate Change Mitigation«. Gradivo je namenjeno študentom in pedagogom ter povezuje temeljne koncepte krožne bioekonomije in trajnostnih prehranskih sistemov z inovativnimi pristopi. Za razumevanje vloge biotehnologije pri trajnostnih prehranskih sistemih in blaženju podnebnih sprememb je treba preučiti znanstvene, okoljske in družbeno-ekonomske temelje, ki oblikujejo sodobne proizvodne sisteme in kmetijstvo, ter specifične izzive, s katerimi se soočajo.

2.1.1. Trenutni problemi in globalni izzivi

- Naraščajoče svetovno prebivalstvo povzroča vse večje povpraševanje po hrani.
- Podnebne spremembe vplivajo na pridelke zaradi suš, poplav in ekstremnih temperatur.
- Degradacija tal in pomanjkanje vode zmanjšujeta produktivnost kmetijstva.
- Izguba biotske raznovrstnosti zmanjšuje odpornost ekosistemov.
- Prehranska negotovost in neenakomerna porazdelitev hrane.
- Ranljivost oskrbovalnih verig (npr. med pandemijami).
- Visoke emisije toplogrednih plinov (TGP) iz kmetijstva in živinoreje.
- Izčrpavanje fosilnih virov ter naraščajoče količine plastičnih odpadkov.
- Naraščajoče količine živilskih odpadkov, kmetijskih ostankov in stranskih proizvodov predstavljajo resen okoljski izziv za trajnost prehranskih sistemov.

2.1.2. Vloga biotehnologije

Upravljanje živilskih odpadkov in izgub po spravilu predstavlja enega ključnih izzivov pri zagotavljanju trajnosti prehranskih sistemov. Hkrati predstavljajo obnovljivi viri biomase še premalo izkoriščen vir hranil in surovin, ki jih je mogoče nadalje valorizirati v proizvode z višjo dodano vrednostjo ter tako prispevati k razvoju krožne bioekonomije. Biotehnologija ponuja številne učinkovite in večplastne pristope za reševanje teh izzivov. Z razvojem novih tehnologij in procesov omogoča ohranjanje kakovosti hrane, zmanjševanje kvarjenja ter podaljševanje roka uporabnosti živil. Hkrati omogočajo napredni encimski in fermentacijski postopki pretvorbo živilskih odpadkov, kmetijskih ostankov in stranskih proizvodov v proizvode z dodano vrednostjo, kot so bioenergija, biorazgradljive plastike, biomateriali in osnovne kemijske spojine. Pretvorba odpadkov v uporabne proizvode s pomočjo biotehnoloških pristopov ne zmanjšuje le okoljskih vplivov, temveč prispeva tudi k vzpostavljanju trajnostnih in krožnih prehranskih sistemov ter učinkovitejši rabi virov.

2.2. Biorafinerije kot strateški vzvod bioekonomije

Krožno bioekonomijo in trajnostni razvoj v Evropski uniji je mogoče učinkovito spodbujati z razvojem integriranih biorafinerij. Biorafinerije imajo pri tem razvoju osrednjo vlogo, saj omogočajo pretvorbo obnovljivih virov biomase v širok spekter proizvodov, kot so biološko osnovane kemikalije, materiali, energija in goriva, pri čemer temeljijo na čim učinkovitejši rabi virov ter kaskadni uporabi biomase. Evropska unija je vzpostavila in sprejela številne strateške politike ter zakonodajne pobude za podporo razvoju in vključevanju biorafinerij v gospodarstvo. Strategija bioekonomije in Akcijski načrt za krožno gospodarstvo spodbujata učinkovito rabo

virov, krožnost ter razvoj vrednostnih verig, ki temeljijo na bioloških virih, medtem ko raziskovalni in inovacijski programi, kot sta Horizon Europe in skupno podjetje Circular Bio-based Europe Joint Undertaking (CBE JU), zagotavljajo ciljno usmerjeno financiranje za pospeševanje tehnološkega razvoja in uvajanje inovacij na trg. Učinkovito usklajeni ustvarjajo ti okviri spodbudno okolje, v katerem lahko biorafinerije pomembno prispevajo k prehodu v konkurenčno, nizkoogljično in krožno bioekonomijo.

Koncept biorafinerije se je začel razvijati konec devetdesetih let prejšnjega stoletja kot odgovor na vse večjo zaskrbljenost zaradi izčrpavanja omejenih fosilnih virov in naraščajočih okoljskih pritiskov. Biorafinerije so po svojem delovanju podobne klasičnim naftnim rafinerijam, vendar namesto fosilnih surovin uporabljajo obnovljive vire biomase ter hkrati upoštevajo družbene, gospodarske in okoljske vidike. Delovna skupina 42 programa Bioenergy pri Mednarodni agenciji za energijo (International Energy Agency, IEA) opredeljuje biorafinerijo kot »trajnostni obrat, ki pretvarja biomaso v različne tržno zanimive proizvode in energijo«. Dokazano je bilo, da proizvodnja več visokovrednih proizvodov z različnimi tržnimi možnostmi iz iste vhodne surovine povečuje ekonomsko upravičenost procesa in hkrati zmanjšuje nastajanje odpadkov. Ameriški Nacionalni laboratorij za obnovljivo energijo (National Renewable Energy Laboratory, NREL) pa biorafinerijo opredeljuje kot »obrat, ki združuje pretvorbo biomase in ustrezno procesno opremo za proizvodnjo goriv, energije ter kemikalij z dodano vrednostjo iz biomase«.

mogoče uporabiti v procesu, ter nekateri možni in najpomembnejši končni proizvodi. Poleg tega bodo obravnavane izbrane študije primerov in podane dodatne informacije o zakonodajnih okvirih Evropske unije na področju krožne bioekonomije.

2.2.1. Razumevanje tipov in konfiguracij biorafinerij

Biorafinerije lahko razvrščamo na več načinov; odvisno od vrste uporabljenih virov biomase, uporabljenih procesnih tehnologij in končnih proizvodov. Eden najpogostejših pristopov delitve temelji na vrsti surovine, pri čemer ločimo biorafinerije, ki uporabljajo rastline bogate s sladkorji in škrobom, lignocelulozno biomaso (npr. les in ostanke iz kmetijske pridelave), vodno biomaso (npr. alge) ter organske odpadne tokove (npr. živilski odpadki, kmetijski ostanki in organski komunalni odpadki). Drugi način razvrščanja temelji na uporabljeni tehnologiji oziroma poti pretvorbe. V to skupino sodijo biokemijski procesi, kot sta fermentacija in encimska hidroliza, ter termokemijski procesi, kot so uplinjanje, piroliza in hidrotermalno utekočinjanje. Biorafinerije lahko razvrščamo tudi glede na končne proizvode, ki v procesih nastanejo. Ti segajo od biogoriv in biološko osnovanih kemikalij do biomaterialov in bioenergije. Sodobne biorafinerije praviloma združujejo različne vrste surovin in več procesnih poti, da bi povečale učinkovitost izrabe virov ter omogočile proizvodnjo več proizvodov z visoko dodano vrednostjo. Takšen večdimenzionalni pristop k razvrščanju biorafinerij študentom omogoča boljše razumevanje raznolikosti konfiguracij biorafinerij, njihovih potencialnih uporab ter izzivov, povezanih s posameznimi tipi.

2.2.2. Viri biomase in njihova vloga v bioprocesiranju

Biomasa je sestavljena predvsem iz celuloze, hemiceluloze in lignina, poleg tega pa vsebuje še manjše deleže beljakovin, maščob, ekstraktivnih snovi (npr. sladkorjev, organskih kislin, voskov, smol in drugih spojin, ki jih je mogoče iz biomase izločiti z ekstrakcijo) in anorganskih mineralov (pepela). Relativni deleži navedenih komponent so odvisni od vrste biomase, pri rastlinski biomasi pa na njeno sestavo pomembno vplivajo tudi način pridelave in vremenske razmere. Kemijska sestava biomase zato določa možne poti pretvorbe in nabor proizvodov, ki jih je mogoče pridobiti v biorafineriji. Biomasa, bogata z ogljikovimi hidrati (npr. z visokim deležem celuloze in hemiceluloze), je posebej primerna za fermentacijske procese proizvodnje bioetanola in drugih

biološko osnovanih kemikalij. Nasprotno pa so surovine z visokim deležem maščob, kot so oljnice ali odpadna jedilna olja, primernejše za proizvodnjo biodizla. Visoka vsebnost lignina lahko otežuje encimsko pretvorbo biomase, hkrati pa predstavlja potencialen vir za pridobivanje aromatskih kemikalij z dodano vrednostjo.

Kljub velikemu potencialu biomase njena heterogena narava, sezonska spremenljivost, težko razgradljive lignocelulozne strukture ter prisotnost inhibitornih spojin predstavljajo pomembne tehnične in ekonomske izzive. Za optimizacijo izkoristkov proizvodov ter zagotavljanje trajnostnega in stroškovno učinkovitega delovanja biorafinerij so zato ključnega pomena učinkoviti postopki predobdelave, frakcioniranja in integracije procesov.

Biotehnološki vidiki

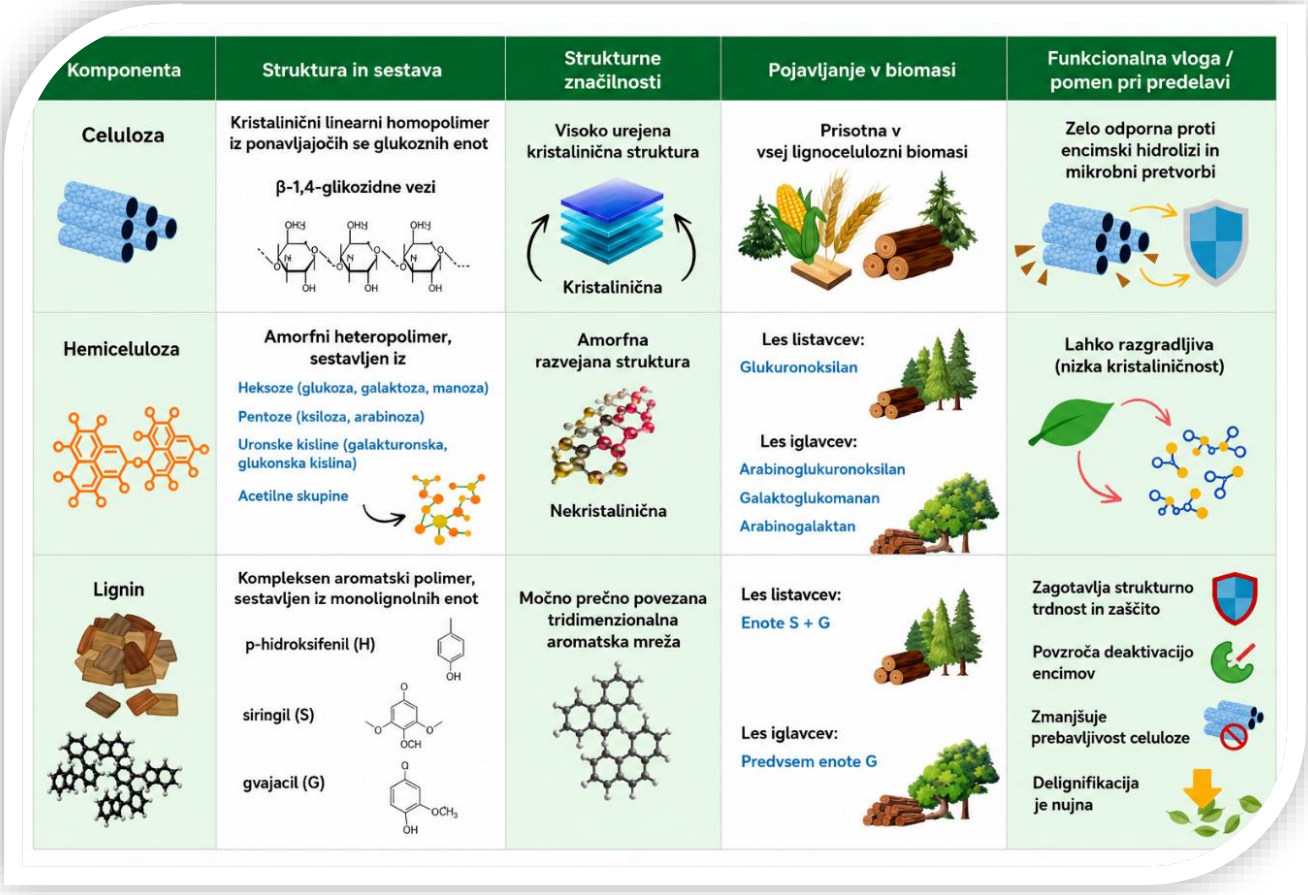
Spremenljiva sestava biomase, težko razgradljiva lignocelulozna struktura ter prisotnost inhibitornih spojin predstavljajo pomembne izzive za procese v biorafinerijah. Biotehnologija te izzive naslavlja z uporabo načrtovanih oziroma izboljšanih encimov z večjo toleranco na lignin, ki omogočajo učinkovitejšo razgradnjo kompleksnih in odpornih struktur biomase. Z metabolnim inženiringom razviti mikrobni sevi lahko hkrati izkoriščajo različne vrste sladkorjev (npr. glukozo in ksilozo) ter prenašajo inhibitorne spojine, kot sta furfural in 5-hidroksimetilfurfural (5-HMF), ki nastajajo med predobdelavo biomase. Poleg tega lahko pristopi, kot sta usmerjena mikrobna adaptacija in celostna biološka analiza, podprejo razvoj robustnih mikrobnih sevov, prilagojenih različnim vrstam surovin. Takšni sevi prispevajo k večji stabilnosti procesov, višjim izkoristkom ter boljši tehnično-ekonomski izvedljivosti procesov v biorafinerijah.

2.2.3. Predobdelava biomase

Načrtovanje procesa v biorafineriji se prične z ustrezno predobdelavo in/ali frakcioniranjem biomase, s katerima želimo pridobiti proizvode z dodano vrednostjo ter povečati dostopnost biomase za mikrobno fermentacijo. Učinkovita valorizacija biomase zahteva izbiro primernih strategij predobdelave, ki omogočajo ločevanje njenih glavnih komponent ob uporabi zelenih topil in trajnostnih procesnih postopkov. Predobdelava predstavlja ključen prvi korak pri sproščanju celuloze in/ali hemiceluloze iz kompleksne in odporne lignocelulozne matrike, s čimer ti komponenti postaneta dostopni za mikrobno pretvorbo v visokovredne biotehnološke proizvode, kot so bioenergija, biokemikalije in bioplastika.

Opredelitev

Lignocelulozna biomasa (LC) je sestavljena iz treh glavnih komponent: celuloze, hemiceluloze in lignina, medtem ko so drugi polimeri, kot so pektini in beljakovine, prisotni v manjših količinah (Bhatia in sod., 2021; Kavitha in sod., 2023). Delež posameznih komponent se močno razlikuje glede na vrsto biomase. Na splošno celuloza predstavlja od 30 do 60 % celotne biomase, hemiceluloza od 14 do 40 %, lignin pa od 7 do 25 %. Slika 16 prikazuje glavne sestavine lignocelulozne biomase, njihovo zgradbo, sestavo ter funkcionalno vlogo.



Slika 16. Strukturne značilnosti lignocelulozne biomase, njena sestava in funkcionalna vloga

Glavni namen predobdelave biomase je delignifikacija (ločevanje in/ali hidroliza lignina), ki ji sledita razgradnja strukture biomase in delna depolimerizacija strukturnih polimerov. S tem se poveča dovzetnost biomase za encimsko hidrolizo in mikrobno pretvorbo. Tehnologije predobdelave na splošno delimo na fizikalne, kemijske in encimske metode. Pogosto se kot najučinkovitejša izkaže kombinacija več pristopov, saj omogoča učinkovitejšo odstranitev lignina ter izboljša pretvorbo celuloze in hemiceluloze v fermentabilne sladkorje.

Čeprav je bilo razvitih in preizkušenih veliko različnih strategij predobdelave, med najbolj obetavne z vidika učinkovitosti in okoljskih vplivov sodijo ultrazvočno podprti postopki, mikrovalovna predobdelava, naravna globoka evtektična topila (angl.: natural deep eutectic solvents – NADES) ter superkritični ogljikov dioksid (SC-CO_2) (Rahmati in sod., 2020; Chakraborty in sod., 2024).

Glavne zelene metode predobdelave biomase

– **Mletje (Milling):** v večini primerov je mletje predpogoj za uporabo drugih metod predobdelave, saj zmanjša velikost delcev biomase in s tem poveča njeno specifično površino. Posledično je encimska hidroliza v nadaljnjih fazah učinkovitejša.

– **Ultrazvočna predobdelava (Ultrasounds):** namen uporabe ultrazvoka je porušiti kompleksno strukturo biomase in tako izpostaviti njene glavne komponente (celulozo, hemicelulozo in lignin) za kasnejšo ekstrakcijo oziroma hidrolizo. Postopek temelji na pojavu akustične kavitacije. Visokofrekvenčni zvočni valovi (> 20 kHz) potujejo skozi tekočo fazo in povzročajo izmenjujoče se cikle nizkega in visokega tlaka. Mikromehurčki, ki

nastanejo med fazo visokega tlaka, se hitro sesedejo, pri čemer nastanejo lokalizirana območja z zelo visokim tlakom in strižnimi silami. Te sile razgrajujejo celične stene biomase ter pospešujejo prenos snovi in encimsko pretvorbo.

– **Mikrovalovna predobdelava (Microwaves):** metoda temelji na uporabi elektromagnetnega polja, ki povzroča lokalne eksplozije znotraj posameznih delcev biomase in s tem olajša razgradnjo celičnih sten. Mehanizem delovanja temelji na dielektrični polarizaciji kovalentnih vezi, kar povzroča trke molekul in posledično razgradnjo toge strukture rastlinskih celic.

– **Naravna globoka evtektična topila (NADEs – Natural Deep Eutectic Solvents):** gre za mešanice spojin, sestavljene iz donorja vodikovih vezi (Hydrogen bonding donor, HBD) in akceptorja vodikovih vezi (Hydrogen bonding acceptor, HBA), ki skupaj tvorita evtektično zmes z nižjim tališčem, kot je tališče posameznih komponent. NADEs so cenjene zaradi svoje stabilnosti, stroškovne učinkovitosti in manjšega vpliva na okolje v primerjavi s konvencionalnimi ionskimi tekočinami. Določene kombinacije teh topil lahko pod blagimi pogoji učinkovito raztapljajo lignin ter povečajo encimsko pretvorbo celuloze v fermentabilne sladkorje, pri čemer pa ne nastajajo inhibitorne spojine (Satlewal in sod., 2018).

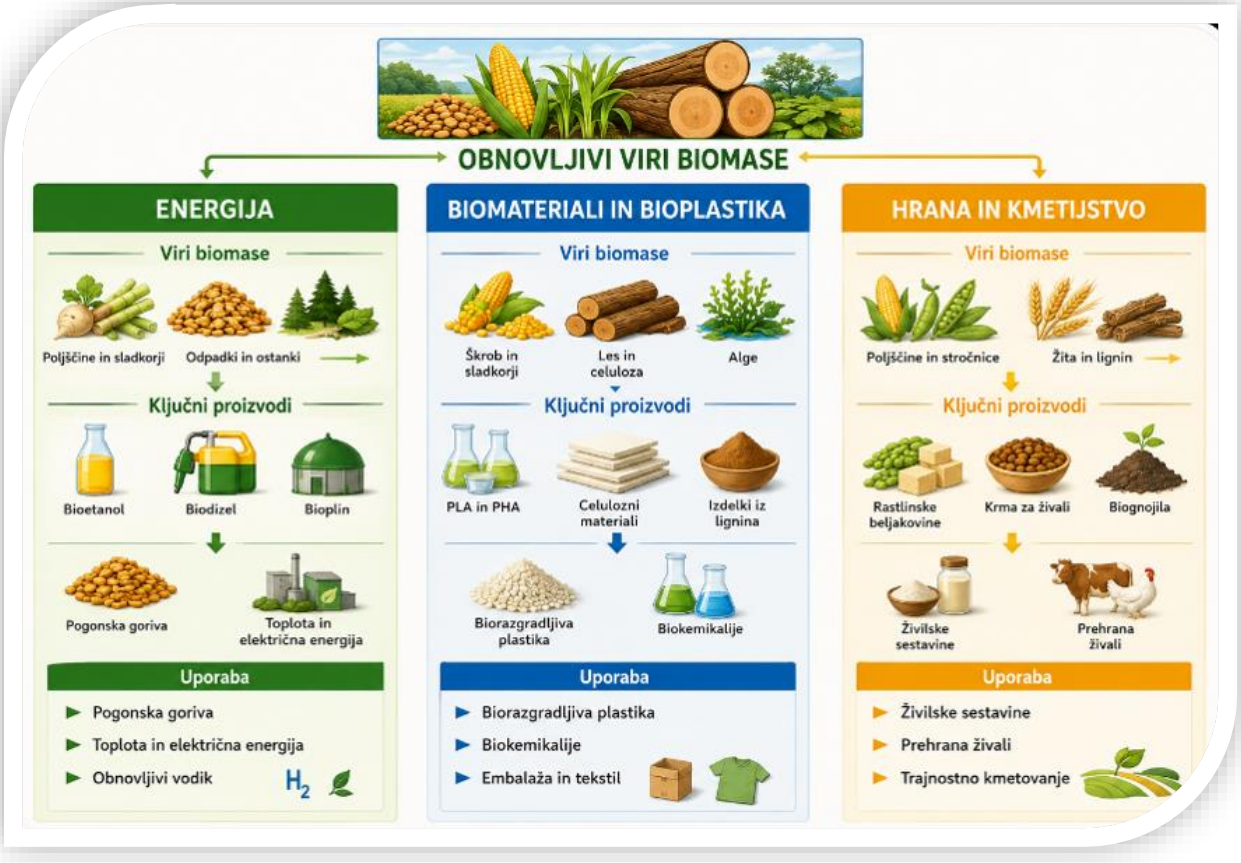
– **Superkritični fluidi (SCF – Supercritical Fluids):** superkritični fluid je snov, ki se nahaja pri temperaturi in tlaku nad svojo kritično točko, zato med tekočo in plinasto fazo ni več jasne meje. Tak fluid združuje lastnosti obeh agregatnih stanj – gostoto tekočine ter viskoznost in difuzivnost plina – zaradi česar deluje kot zelo učinkovito topilo. Superkritične fluide lahko uporabljamo pri predobdelavi biomase za pridobivanje komponent z dodano vrednostjo ali za spreminjanje fizikalne strukture biomase, povečanje njene poroznosti ter izboljšanje nadaljnje encimske pretvorbe.

Encimska hidroliza

Vsi opisani postopki predobdelave so namenjeni pripravi lignocelulozne biomase na encimsko hidrolizo, ki je potrebna za pretvorbo celuloze in/ali hemiceluloze v fermentabilne sladkorje. Omeniti velja, da je hidrolizo biomase do sladkornih monomerov mogoče izvajati tudi s kemijskimi postopki, vendar encimska hidroliza predstavlja okolju prijaznejši pristop. Pri tem nastaja manj inhibitornih spojin, kar ugodno vpliva na nadaljnje delovanje mikroorganizmov in učinkovitost bioprocesov. Hidrolizo hemiceluloze katalizirajo specifični encimi, imenovani hemicelulaze. Med najpogosteje uporabljenimi so endo-β-ksilanaze in β-ksilozidaze, ki razgrajujejo ksilan v ksilooligosaharide oziroma ksilozo. Za učinkovito hidrolizo celuloze se najpogosteje uporabljajo štiri vrste encimov: endoglukanaze, celobiohidrolaze, eksoglukohidrolaze in β-glukozidaze. Le usklajeno delovanje vseh navedenih encimov omogoča popolno hidrolizo celuloze do njenega osnovnega monomera – glukoze (Maitan-Alfenas in sod., 2015).

2.3. Nabor končnih proizvodov iz biorafinerij

Namen razvoja biorafinerij je izkoristiti potencial različnih virov biomase ter jih pretvoriti v številne proizvode z visoko dodano vrednostjo, ki prispevajo k trajnostnemu razvoju, spodbujajo krožno bioekonomijo in zmanjšujejo našo odvisnost od fosilnih virov. Ena izmed ključnih skupin proizvodov so bioplastika in biomateriali, pri katerih se obnovljiva biomasa s fermentacijskimi procesi pretvarja v biorazgradljive polimere, kot sta polihidroksialkanoat (PHA) in polimlečna kislina (PLA). Takšne biološko osnovane plastike predstavljajo trajnostno alternativo konvencionalnim petrokemičnim plastikam ter prispevajo k reševanju dveh pomembnih izzivov sodobne družbe: izčrpavanja fosilnih goriv in onesnaževanja s plastiko. Uporaba kmetijskih ostankov, sladkorjev in drugih obnovljivih surovin omogoča proizvodnjo materialov za embalažo, tekstil in kompozite, hkrati pa zmanjšuje odvisnost od neobnovljivih virov.



Slika 17. Spekter biološko osnovanih proizvodov, pridobljenih iz biomase v biorefinarnah

Bioenergija in biogoriva predstavljajo drugo pomembno skupino proizvodov biorafinerij. Mednje sodijo bioplin, biodizel, bioetanol in novejša goriva, kot je biovodik, ki se pridobivajo iz organskih odpadkov, lignoceluloznih ostankov in mikroalg z uporabo biokemijskih in termokemijskih procesov. Proizvodnja energije je izjemno pomembna, vendar osredotočenost zgolj na proizvodnjo bioenergije pogosto omejuje ekonomsko upravičenost biorafinerij, saj izkoristki goriv in njihove tržne cene pogosto ne zadostujejo za pokritje obratovalnih stroškov. Vključevanje proizvodov z višjo dodano vrednostjo, kot so živilske sestavine ali farmacevtski prekurzorji, ob hkratni proizvodnji bioenergije lahko pomembno izboljša donosnost procesov in poveča splošno učinkovitost rabe virov.

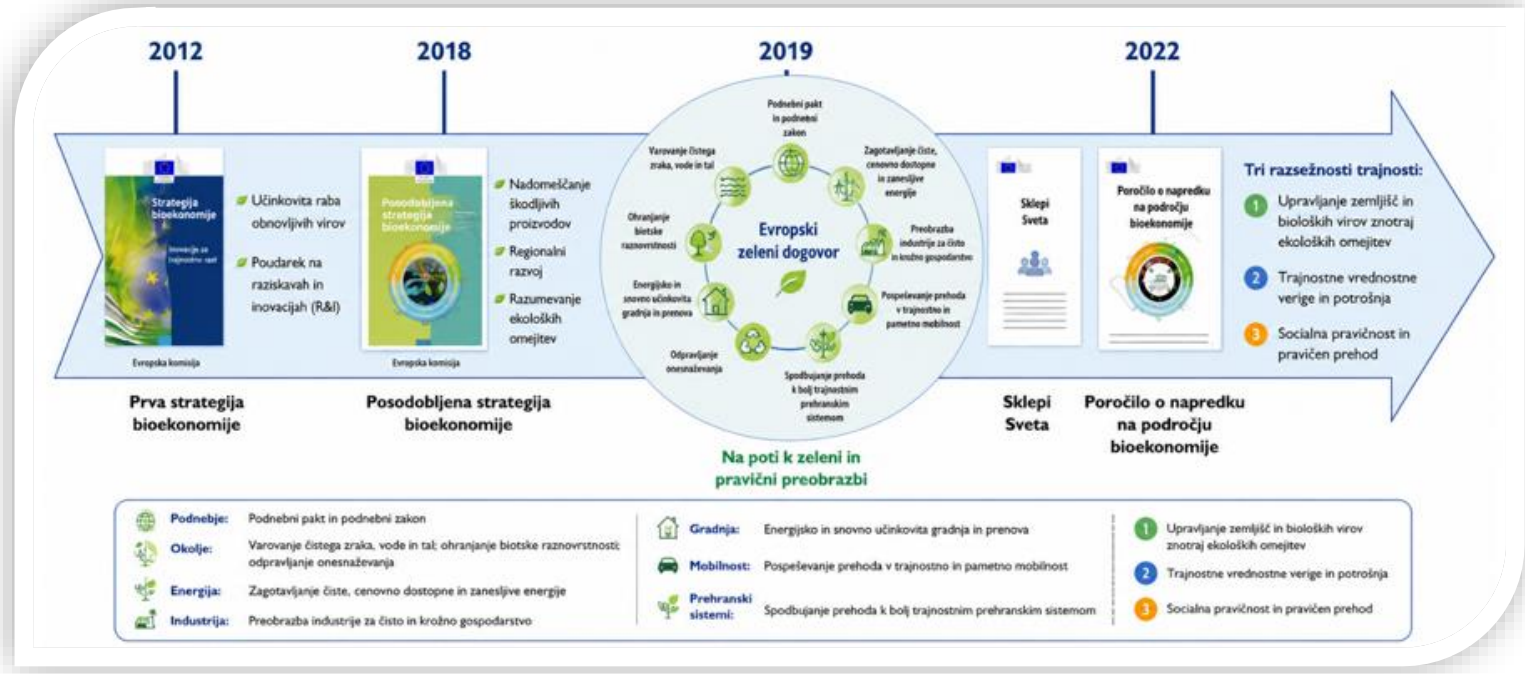
Na področju prehrane in kmetijstva omogočajo biorafinerije valorizacijo kmatijskih ostankov, živilskih odpadkov

in drugih tokov biomase v nutracevtike, encime, organske kisline, biognojila in krmne sestavine. Takšne uporabe ne povečujejo le ekonomske vrednosti sicer nizkovrednih ostankov, temveč prispevajo tudi k trajnosti prehranskih sistemov z zmanjševanjem količine odpadkov, zapiranjem kroženja hranil in spodbujanjem učinkovitejših kmetijskih praks. Skupaj ti proizvodi ponazarjajo velik potencial biorafinerij za pretvorbo biomase v materiale, energijo in proizvode, povezane s prehrano, pri čemer hkrati naslavljajo okoljske, gospodarske in družbene izzive ter podpirajo razvoj trajnostne in krožne bioekonomije.

2.4. Politični okvir Evropske unije za bioekonomijo in prehod v krožno gospodarstvo

Evropska unija je razvila celovit sklop medsebojno povezanih strategij za usmerjanje prehoda v trajnostno, podnebno nevtralno in glede ravnanja z viri učinkovito gospodarstvo. Ti okviri in pobude na področju bioekonomije, krožnega gospodarstva, trajnostnih prehranskih sistemov, biotske raznovrstnosti in podnebnih ukrepov delujejo povezano ter spreminjajo način pridobivanja, porabe in upravljanja virov v različnih sektorjih. Politike ne delujejo ločeno, temveč tvorijo celovit sistem, katerega cilj je zmanjševanje vplivov na okolje, krepitev odpornosti, spodbujanje inovacij in podpora trajnostni gospodarski rasti.

Slika 18 prikazuje razvoj Strategije bioekonomije Evropske unije vse od sprejetja leta 2012 do posodobitve leta 2018 ter poročila iz leta 2022, ki ocenjuje izvajanje strategije in nadaljnje razvojne usmeritve. Evropska komisija je Strategijo bioekonomije sprejela leta 2012 z namenom zmanjšanja odvisnosti od gospodarstva, ki temelji na fosilnih virih, leta 2018 pa jo je posodobila. Posodobljena strategija je ponovno potrdila pet prvotnih ciljev: (i) zagotavljanje prehranske in hranilne varnosti, (ii) trajnostno upravljanje naravnih virov, (iii) zmanjšanje odvisnosti od neobnovljivih in netrajnostnih virov, (iv) blaženje podnebnih sprememb ter prilagajanje nanje in (v) krepitev konkurenčnosti Evrope ter ustvarjanje delovnih mest.



Slika 18. Razvoj Strategije bioekonomije v EU od njenega sprejetja leta 2012 do posodobitev v letih 2018 in 2022 (prirejeno po viru na povezavi: https://ebcd.org/wp-content/uploads/2022/04/European-Commission-Peter-Wehrheim-PDF-Presentation.pdf)

Ti cilji, ki so usklajeni s cilji Evropskega zelenega dogovora (European Green Deal), so danes pomembnejši kot kadar koli prej, zlasti zaradi potrebe po hitrejšem doseganju energetske neodvisnosti in krepitvi prehranske varnosti. Strategija bioekonomije EU podpira zeleni in pravični prehod ter zajema vse tri razsežnosti trajnostnega razvoja: okoljsko, družbeno in gospodarsko.

Za doseganje teh ciljev je bila posodobljena Strategija bioekonomije dopolnjena s ciljno usmerjenim akcijskim načrtom, ki temelji na treh glavnih področjih ukrepanja:

1. Krepitev in širitev sektorjev, ki temeljijo na bioloških virih, ter spodbujanje naložb in razvoja trgov;
2. Pospešeno uvajanje lokalnih bioekonomij po vsej Evropi;
3. Razumevanje ekoloških omejitev bioekonomije.

Preglednica 4 podaja pregled ključnih strategij in političnih instrumentov ter poudarja njihov pomen za krožno bioekonomijo in trajnostne prehranske sisteme.

Preglednica 4. Ključne strategije Evropske unije in njihov pomen za krožno bioekonomijo

Polno ime politike/strategije	Pomen za krožno bioekonomijo in trajnostne prehranske sisteme
Evropski zeleni dogovor (European Green Deal) Celovita strategija EU (2019)	Temeljni okvir za trajnostne prehranske sisteme, krožno gospodarstvo, industrije na biološki osnovi, zmanjševanje emisij v kmetijstvu ter učinkovito rabo virov.
Strategije iz zelenega dogovora	
Strategija »od vil do vilic« (Farm to Fork Strategy – Strategija za pravičen, zdrav in okolju prijazen prehranski sistem) – Sektorska strategija (2020)	Neposredno naslavlja ključne izzive trajnostnega kmetijstva, zmanjševanja živilskih odpadkov, trajnostne prehrane, označevanja živil in oblikovanja krožnih prehranskih sistemov.
Akcijski načrt za krožno gospodarstvo 2020 (Circular Economy Action Plan 2020 – Za čistejšo in konkurenčnejšo Evropo) - Akcijski načrt	Spodbuja inovacije na področju krožne embalaže za živila, zmanjševanja živilskih odpadkov, valorizacije bioodpadkov, recikliranja hranil ter krepi trajnostne proizvodne sisteme.
Strategija EU za biotsko raznovrstnost do leta 2030 (EU Biodiversity Strategy for 2030 – Vrnimo naravo v naša življenja) - Okoljska strategija	Podpira prehod v regenerativno kmetijstvo, trajnostno upravljanje tal, agrogozdarstvo (Agroforestry) ter modele pridelave hrane, ki temeljijo na ekosistemskih pristopih, kar je ključno za odpornost bioekonomije in doseganje trajnostnih ciljev EU.
Skupna kmetijska politika (SKP) 2023–2027 (Common Agricultural Policy – CAP) - Regulativni in finančni okvir	Predstavlja finančno podlago za trajnostno kmetovanje, proizvodnjo biomase za industrije na biološki osnovi, razvoj bioekonomije na podeželju ter podnebno pametno kmetijstvo.
Strategija bioekonomije EU (A Sustainable Bioeconomy for Europe: Strengthening the Connection between Economy, Society and the Environment) - Strateški politični okvir	Osrednja politika krožne bioekonomije, ki povezuje kmetijstvo, gozdarstvo, ribištvo in industrije na biološki osnovi. Spodbuja valorizacijo živilskih odpadkov in razvoj biološko osnovanih proizvodov.
Skupno podjetje Circular Bio-based Europe (CBE JU) - *Javno-zasebno partnerstvo*	Pospešuje komercializacijo biološko osnovanih materialov, valorizacijo stranskih proizvodov živilske industrije ter razvoj bioekonomskih ekosistemov na podeželju.
8. okoljski akcijski program (2021–2030) (8th Environment Action Programme) - *Okoljski okvirni program*	Zagotavlja okvir za upravljanje in spremljanje napredka ter usklajuje trajnost prehranskih sistemov z okoljskimi cilji Evropske unije.

Aktivnost za študente

Zaupana vam je naloga oblikovanja trajnostnega projekta na področju hrane in bioekonomije v Evropski uniji. Kako bi uporabili obstoječe politike in strategije EU, kot so Strategija »od vil do vilic«, Skupna kmetijska politika (SKP) in Akcijski načrt za krožno gospodarstvo, da bi zagotovili krožnost, okoljsko trajnost in gospodarsko odpornost?



Zasnova mojega projekta:

Aktivnost za študente

Izberite študijo primera in pripravite diagram poteka procesa.

Biotehnološke strategije blaženja podnebnih sprememb s pomočjo krožne bioekonomije

Študije primerov, predstavljene v tem modulu, prikazujejo praktične uporabe biotehnologije, ki podpirajo načela krožne bioekonomije v različnih sektorjih, kot so proizvodnja hrane, krme in energije.

Študija primera 10: Trajnostno proizvedene alternativne beljakovine

Ozadje:
študija primera obravnava proizvodnjo in uporabo mikoproteina, glivnega vira beljakovin, ki se proizvaja z industrijsko fermentacijo in je postal globalno prepoznana alternativa mesu v številnih prehranskih izdelkih. Mikoprotein predstavlja primer uspešne uporabe mikrobne biotehnologije za proizvodnjo hranilno kakovostnih živilskih sestavin ob bistveno manjših vplivih na okolje v primerjavi s konvencionalno proizvodnjo živalskih beljakovin. Najbolj znan komercialni primer predstavlja podjetje Quorn Foods, kjer je mikoprotein osnovna sestavina vseh izdelkov blagovne znamke Quorn.

Izziv:
svetovno povpraševanje po beljakovinah zaradi rasti prebivalstva in spreminjajočih se prehranskih navad še naprej hitro narašča, kar povečuje pritisk na naravne vire in tradicionalne živinorejske sisteme. Konvencionalna živinoreja je zelo zahtevna glede porabe virov, saj zahteva velike količine zemljišč, vode in krme, hkrati pa pomembno prispeva k emisijam toplogrednih plinov in izgubi biotske raznovrstnosti. Poleg tega se je v Evropski uniji pojavila strateška potreba po diverzifikaciji in krepitvi domače proizvodnje beljakovin z namenom izboljšanja prehranske varnosti, zmanjšanja odvisnosti od uvoženih virov beljakovin ter podpore podnebnim in trajnostnim ciljem v celotnem prehranskem sistemu. Evropski parlament je zato pozval k oblikovanju celovite Evropske strategije za beljakovine, katere cilj je povečati dostopnost trajnostno proizvedenih beljakovin in okrepiti odpornost prehranskih oskrbovalnih verig. Strategija naj bi bila usklajena s širšimi cilji politik Evropske unije, kot so Strategija »od vil do vilic«, Akcijski načrt za krožno gospodarstvo in raziskovalno-inovacijske prioritete programa Horizon Europe, saj spodbuja trajnostne in raznolike vire beljakovin, ki zmanjšujejo vplive na okolje ter povečujejo odpornost evropskega prehranskega sistema.

Biotehnološka rešitev:
proizvodnja mikoproteina temelji na fermentacijski tehnologiji, pri kateri se naravno prisotna gliva *Fusarium venenatum* goji v velikih fermentorjih z zračnim dvigom (*air-lift fermenters*). Med fermentacijo mikroorganizem pretvarja ogljikove hidrate (iz koruze, pšenice ali drugih virov sladkorjev) v visokokakovostno glivno biomaso, bogato z beljakovinami in prehranskimi vlakninami. Proces je podoben fermentaciji piva ali jogurta, vendar poteka v bistveno večjem obsegu in je optimiziran za proizvodnjo beljakovin. Po fermentaciji se glivna biomasa predela v maso, podobno testu, ki se nato oblikuje in pripravi v živila, namenjena kot alternativa mesu (npr. mleto meso, fileji in klobase). Mikoprotein ni le trajnosten, temveč tudi prehransko zelo kakovosten vir hranil. Predstavlja popoln vir beljakovin, saj vsebuje vse esencialne aminokisline, hkrati pa vsebuje veliko prehranskih vlaknin, malo nasičenih maščob ter je vir vitaminov in mineralov. Zaradi teh lastnosti predstavlja zdravo alternativo za potrošnike, ki želijo zmanjšati uživanje mesa, ne da bi pri tem zmanjšali prehransko vrednost svoje prehrane.

Študija primera 11: Pretvorba morske biomase v funkcionalne sestavine

Ozadje:

študija primera obravnava pretvorbo invazivnih morskih alg v trajnostne in biorazgradljive funkcionalne sestavine za uporabo v različnih industrijah. Takšen pristop hkrati naslavlja sanacijo okolja in razvoj trajnostnih proizvodov. Tehnologijo razvija podjetje Origin by Ocean, specializirano za valorizacijo morske biomase.

Izziv:

škodljiva cvetenja alg in invazivne vrste makroalg predstavljajo resno ekološko in gospodarsko grožnjo morskim ekosistemom, obalnemu turizmu in ribištvu. Hkrati številne industrijske panoge za proizvodnjo površinsko aktivnih snovi, stabilizatorjev in funkcionalnih dodatkov še vedno uporabljajo surovine fosilnega izvora ali druge okoljsko obremenjujoče materiale. Izziv je zmanjšati negativne vplive prekomerne razrasti alg ter hkrati nadomestiti netrajnostne surovine z obnovljivimi alternativami.

Biotehnološka rešitev:

nabrane problematične alge se predelajo s patentiranimi biorefinarskimi postopki, ki prekomerno razrast alg v morju pretvarjajo v visokozmogljive biološko osnovane alternative sestavinam, ki se tradicionalno pridobivajo iz fosilnih virov, podnebno občutljivih rastlin ali poljščin, katerih pridelava zahteva velike površine zemljišč in veliko porabo vode.

Posebej pomembne so spojine, kot so alginati, fukoidani in funkcionalni polimeri, ki se lahko uporabljajo v živilski industriji, kozmetiki, detergentih, kmetijstvu in embalažni industriji. Pri tem se izkoristi skoraj celotna algna biomasa, kar predstavlja primer krožnega bioprocesa brez odpadkov. Takšen pristop hkrati prispeva k obnovi morskega okolja in zagotavlja trajnostne surovine za različne industrijske panoge.



Slika 19. Kopičenje invazivnih alg rodu *Sargassum* na obalnem območju

Študija primera 12: Proizvodnja biopolimerov iz kmetijsko-industrijskih odpadkov

Ozadje:
študija primera obravnava proizvodnjo bakterijske celuloze, visokozmogljivega biopolimera, pri kateri se kot substrati za fermentacijo uporabljajo kmetijsko-industrijski odpadni tokovi. Prikazuje, kako lahko mikrobna biotehnologija podpira razvoj trajnostnih materialov za različne vrste uporabe. Koncept razvijajo tudi podjetja, kot je Polybion (https://www.polybion.bio/stories/celium-now-globally-available/).

Izziv:
naraščajoče povpraševanje po tekstilu, embalaži in naprednih materialih je povzročilo povečano uporabo sintetičnih polimerov in naravnih vlaken, katerih proizvodnja zahteva velike količine virov. Ti materiali imajo pogosto velik okoljski odtis in omejeno biorazgradljivost. Bakterijska celuloza se vse pogosteje uporablja tudi v prehranskih sistemih kot funkcionalna sestavina, ki prispeva k razvoju bolj zdravih živil. Povpraševanje po takšnih izdelkih narašča vzporedno z vse večjo zaskrbljenostjo glede vplivov na okolje, učinkovite rabe virov in javnega zdravja. Poleg tega številna konvencionalna sredstva za uravnavanje teksture, stabilizacijo in nadomeščanje maščob temeljijo na kemično modificiranih polimerih ali sestavinah z omejeno prehransko vrednostjo. Izziv je razviti trajnostne in visokozmogljive materiale, ki lahko nadomestijo manj trajnostne alternative v prehranskih in neprehranskih aplikacijah ter hkrati omogočajo valorizacijo odpadne biomase.

Biotehnološka rešitev:
določene bakterije med fermentacijo sintetizirajo celulozna nanovlakna, kadar rastejo na kmetijsko-industrijskih stranskih proizvodih, bogatih s sladkorji. Nastala bakterijska celuloza je izjemno čista ter se odlikuje z veliko sposobnostjo zadrževanja vode, visoko mehansko trdnostjo in biorazgradljivostjo. V prehranski industriji se bakterijska celuloza uporablja kot sredstvo za uravnavanje teksture, kot stabilizator ali nadomestek maščob, kar omogoča oblikovanje živil z oznako »clean label«, ne da bi pri tem poslabšali teksturo ali senzorično kakovost izdelkov. Njena uporaba v biotekstilih, embalaži, kompozitnih materialih in biomedicinskih izdelkih dodatno potrjuje njeno vsestranskost. S povezovanjem surovin, pridobljenih iz odpadnih tokov, in razvoja večnamenskih proizvodov ta biotehnološki pristop predstavlja dober primer uresničevanja načel krožne bioekonomije ter učinkovite rabe virov.

Študija primera 13: Trajnostne maščobe za aplikacije v živilstvu s pomočjo precizne fermentacije

Ozadje:
študija primera obravnava uporabo precizne fermentacije za proizvodnjo prilagojenih maščob in lipidov za živilske in industrijske namene. Tehnologija predstavlja novo generacijo biotehnoloških rešitev, katerih cilj je ločiti proizvodnjo maščob od konvencionalnega kmetijstva. Eden vodilnih primerov na tem področju je podjetje Melt & Marble (https://www.meltandmarble.com/technology).

Izziv:
tradicionalna proizvodnja maščob iz živinoreje ali oljnic je povezana z obsežno rabo zemljišč, emisijami toplogrednih plinov in izgubo biotske raznovrstnosti. Poleg tega je doseganje specifičnih funkcionalnih ali prehranskih lastnosti maščob s konvencionalnimi metodami pogosto neučinkovito ali okoljsko obremenjujoče. Izziv je proizvesti maščobe z želenimi lastnostmi ob hkratnem zmanjšanju vplivov na okolje in porabe virov.

Biotehnološka rešitev:
s pomočjo precizne fermentacije so mikroorganizmi načrtno izbrani ali gensko prilagojeni tako, da v nadzorovanih pogojih sintetizirajo specifične lipidne strukture. Z uporabo obnovljivih surovin mikroorganizmi pretvarjajo enostavne vire ogljika v maščobe z natančno določenimi lastnostmi taljenja, teksture in funkcionalnosti. Takšen pristop omogoča učinkovito, prilagodljivo in trajnostno proizvodnjo lipidov v velikem obsegu ter predstavlja alternativo konvencionalnim virom maščob v živilskih formulacijah. Hkrati prispeva k učinkovitejši rabi virov in podpira načela krožne bioekonomije.

Študija primera 14: Bioenergija in trajnostna goriva

Ozadje:
študija primera obravnava proizvodnjo mikrobnega olja iz odpadnih tokov in ostankov kot trajnostne surovine za proizvodnjo obnovljivega dizelskega goriva. Prikazuje, kako lahko industrijska biotehnologija povezuje valorizacijo odpadkov z napredno proizvodnjo biogoriv ter tako prispeva k blaženju podnebnih sprememb in učinkovitejši rabi virov. Takšen pristop razvija tudi podjetje Neste, eno vodilnih svetovnih podjetij na področju proizvodnje obnovljivega dizelskega goriva ((https://www.neste.com/news/waste-based-microbial-oil-set-to-become-a-raw-material-for-renewable-diesel).

Izziv:
konvencionalna biogoriva pogosto temeljijo na rastlinskih oljih ali energetskih rastlinah, ki lahko konkurirajo pridelavi hrane, zahtevajo velike količine zemljišč in vode ter odpirajo vprašanja glede njihove trajnostnosti. Hkrati velike količine organskih industrijskih stranskih proizvodov in ostankov ostajajo neizkoriščene ali pa njihovo odstranjevanje povzroča dodatne stroške. Izziv je poiskati alternativne vire lipidov, ki so primerni za proizvodnjo v velikem obsegu, trajnostni in neodvisni od obdelovalnih površin.

Biotehnološka rešitev:
oleogene mikroorganizme, kot so določene vrste kvasovk in gliv, gojijo na virih ogljika, pridobljenih iz odpadnih tokov, vključno z industrijskimi stranskimi proizvodi in kmetijskimi ostanki. Med fermentacijo ti mikroorganizmi v svojih celicah kopičijo lipide, katerih lastnosti so podobne rastlinskim oljem.

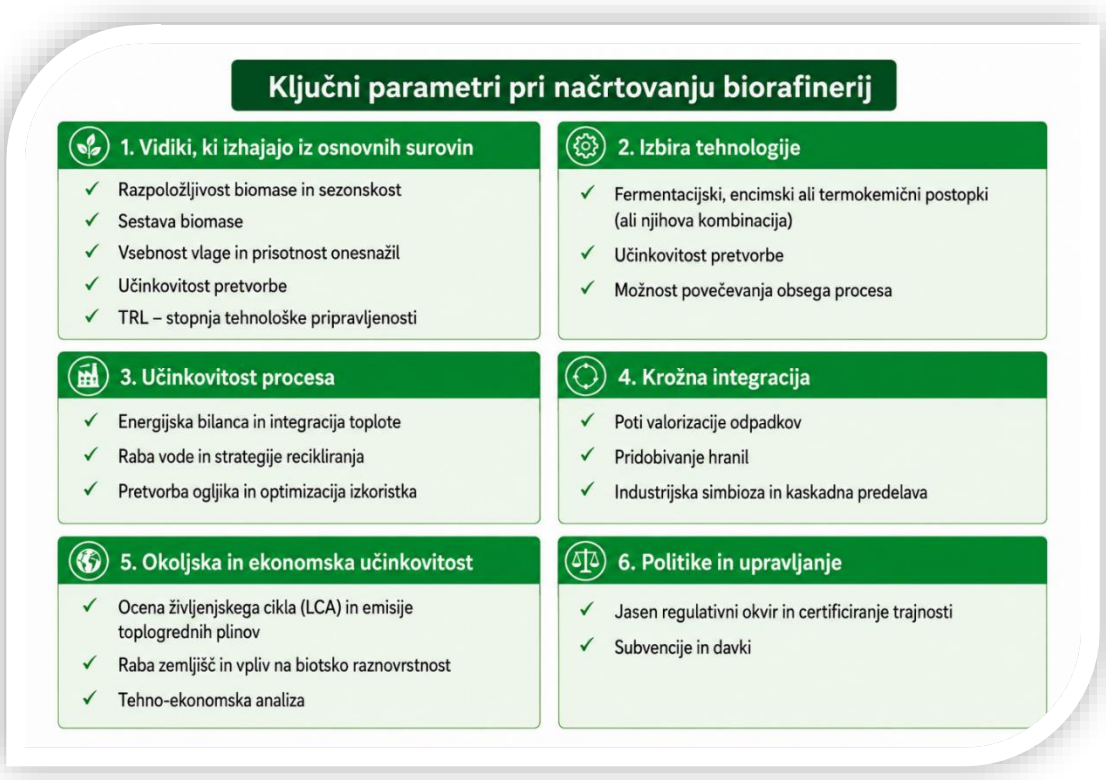
Po ekstrakciji se lahko pridobljeno olje predela v obnovljivo dizelsko gorivo z uporabo obstoječe industrijske infrastrukture. Ta biotehnološki pristop omogoča pretvorbo nizkovrednih odpadnih materialov v visokovredno obnovljivo gorivo, hkrati pa zmanjšuje emisije toplogrednih plinov in podpira načela krožne bioekonomije.

Vrednotenje, ocenjevanje in izbor ključnih parametrov pri načrtovanju bioprocesov

Načrtovanje biorafinerije temelji na skupini medsebojno povezanih tehničnih, okoljskih, ekonomskih in političnih dejavnikov, pri čemer je izhodišče poglobljeno razumevanje sestave biomase in možnosti njene biološke pretvorbe (slika 20). Relativni deleži ogljikovih hidratov, lignina, beljakovin, lipidov in manjših sestavin določajo, katere mikrobne ali encimske platforme je mogoče učinkovito uporabiti. Vsebnost vode, prisotnost inhibitornih spojin in nečistoč vplivajo na zahtevnost predobdelave ter toleranco mikroorganizmov, medtem ko spremenljivost surovin predstavlja izziv za stabilnost procesov in robustnost uporabljenih sevov. Stopnja tehnološke razvitosti *(Technology Readiness Level – TRL)* dodatno oceni, ali je mogoče uspešne laboratorijske postopke prenesti v zanesljivo industrijsko proizvodnjo.

Na podlagi teh značilnosti je treba izbrati ustrezne poti biološke pretvorbe. Fermentacija, encimska hidroliza, anaerobna digestija, termokemijski postopki ali integrirani hibridni sistemi morajo biti usklajeni z lastnostmi surovine in želenimi produktnimi tokovi. Med pomembnimi biološkimi parametri je treba upoštevati hitrost privzema substrata, presnovne izkoristke, toleranco na inhibitorje in genetsko stabilnost mikroorganizmov. Možnost povečanja obsega proizvodnje je odvisna od ohranjanja učinkovitosti procesov tudi v industrijskih pogojih, kot so visoke koncentracije trdnih snovi in nesterilno okolje.

Poleg same biološke pretvorbe imajo ključno vlogo tudi procesna učinkovitost in inženirska zasnova sistema. Energijska bilanca in integracija toplotnih tokov zmanjšujeta obratovalne stroške, medtem ko konfiguracija reaktorjev, strategije mešanja in optimizacija prenosa snovi vplivajo na produktivnost in izkoristek pretvorbe. Strategije rabe in recikliranja vode ter učinkovitost nadaljnjih postopkov ločevanja (*downstream processing*) neposredno vplivajo na okoljski odtis in ekonomsko upravičenost procesa. Optimizirana pretvorba ogljika in visoki izkoristki so rezultat sinergije med presnovno učinkovitostjo mikroorganizmov in ustrezno procesno-inženirsko zasnovo.



Slika 20. Medsebojna povezanost ključnih parametrov pri načrtovanju biorafinerij

Sodobne biorafinerije morajo vključevati tudi trdna načela krožne integracije. Odpadne tokove, ki nastajajo v posameznih procesih, je treba valorizirati s kaskadno predelavo, vračanjem hranil v obtok in industrijsko simbiozo, s čimer se zagotavlja, da so posamezne komponente biomase izkoriščene za proizvode z najvišjo dodano vrednostjo, še preden se uporabijo za pridobivanje energije. Inženirski pristopi so pri tem ključni za zmanjševanje izgub, učinkovitejšo rabo virov ter zagotavljanje stabilnega delovanja večproduktnih sistemov.

Pomembno vlogo pri uvajanju biorafinerij imajo tudi okoljski, ekonomski in upravljavski vidiki. Analiza življenjskega cikla (LCA), potencial za zmanjševanje emisij toplogrednih plinov ter tehno-ekonomske analize pomembno vplivajo na oceno trajnosti procesov. Hitrost uvajanja novih proizvodov na trg je odvisna tudi od zakonodaje, certifikacijskih shem in finančnih spodbud. Ker so vsi ti dejavniki medsebojno povezani in se dinamično prepletajo, zahteva uspešna zasnova biorafinerije celovit sistemski pristop, ki združuje biotehnologijo, optimizacijo procesov in vrednotenje trajnosti v enoten, usklajen in robusten okvir.

2.5. Scenariji inovacij in prihodnje podnebne projekcije

Eno največjih ozkih grl biotehnoloških aplikacij, kot so biorafinerije, predstavlja prenos uspešnih laboratorijskih dosežkov v dejansko industrijsko uporabo. Kljub intenzivnim raziskavam na področju razvoja robustnih bioprocesov, ki skoraj izključno temeljijo na obnovljivih virih, ostaja njihova industrijska uporaba omejena. Številni procesi, razviti v laboratoriju, namreč niso bili preverjeni na pilotni ali demonstracijski ravni, zato še nimajo ustrezno potrjene možnosti povečanja obsega proizvodnje in praktične izvedljivosti. Poleg tega so za celovito vrednotenje predlaganih biotehnoloških rešitev potrebne podrobne analize življenjskega cikla (LCA), tehno-ekonomske analize ter družbeno-politične ocene, ki omogočajo boljše razumevanje njihove ekonomske upravičenosti, okoljskih učinkov in družbene sprejemljivosti. Pomemben potencial za prihodnji razvoj predstavljata tudi vključevanje umetne inteligence (AI) in interneta stvari (IoT) v bioprocesne sisteme, saj lahko prispevata k zmanjšanju obratovalnih stroškov ter izboljšata učinkovitost upravljanja odpadkov in virov. Hkrati lahko inovativni mehanizmi financiranja in javno-zasebna partnerstva pomembno podprejo oblikovanje spodbudnega okolja za razvoj in uvajanje biotehnoloških rešitev.

Predlagane rešitve morajo zato združevati vse navedene značilnosti ter zagotavljati, da so inovativne, okoljsko sprejemljive in hkrati primerne za povečanje obsega proizvodnje. Pri načrtovanju biorafinerij je treba zagotoviti tudi sposobnost uporabe heterogenih in regijsko specifičnih surovin, saj se s tem zmanjšuje odvisnost od sezonskosti in ozko opredeljenih virov biomase. Ključno vlogo pri izboljševanju stabilnosti bioprocesov in njihove produktivnosti bodo imeli metabolni inženiring, sintezna biologija in računalniške vede.

Aktivnost študentov
Vaja za reševanje problema

Zasnujte krožni biorafinerijski sistem za predelavo stranskih proizvodov živilske industrije (npr. ostankov pri predelavi krompirja), iz katerih bi pridobivali bioenergijo, biomateriale ter proizvode z visoko dodano vrednostjo za živilsko industrijo.

- ✓ Katere biotehnološke pristope bi morali prednostno uporabiti, da bi zagotovili največjo možno učinkovitost rabe virov?
- ✓ Kako bi uravnotežili in ovrednotili okoljske koristi, stroškovno učinkovitost ter družbeni vpliv, vključno s prehransko varnostjo in zmanjševanjem količine odpadkov?



Slika 21. Scenarij krožnega biorafiniranja stranskih proizvodov nastalih pri predelavi krompirja

2.6. Zaključek

Biotehnologija ima ključno vlogo pri spodbujanju trajnostnega razvoja in pospeševanju prehoda v krožno bioekonomijo. Z vključevanjem inovativnih bioprocesov, valorizacijo obnovljive biomase ter uporabo tehnologij za učinkovito rabo virov ponujajo biorafinerije obetavne rešitve za nekatere najpomembnejše globalne izzive sodobnega časa, kot so podnebne spremembe, prehranska negotovost, nastajanje odpadkov in izčrpavanje fosilnih virov. Krožni pristopi omogočajo pretvorbo kmetijskih ostankov, živilskih odpadkov in drugih bioloških virov v biološko osnovane proizvode z dodano vrednostjo, energijo in materiale, pri tem pa zmanjšujejo vplive na okolje ter krepijo gospodarsko odpornost. Uspešno uvajanje takšnih sistemov zahteva interdisciplinarno znanje, tehnološke inovacije, podporne politične okvire ter stalno vrednotenje okoljskih, gospodarskih in družbenih učinkov.

Poglavje 3: Koriščenje talnega mikrobioma za podnebno pametno pridelavo rastlin in upravljanje krajine

3.1. Ozadje

Globalna pridelava hrane se sooča z izjemnimi pritiski, ki izhajajo iz prepleta demografskih, okoljskih in družbeno-ekonomskih izzivov. Ti postajajo še izrazitejši ob napovedi, da bo svetovno prebivalstvo do leta 2050 doseglo približno 9,5 milijarde, kar bo znatno povečalo povpraševanje po hrani, krmi in drugih bioloških virih. Dodatno skrb vzbuja podatek, da se trenutno več kot 700 milijonov ljudi sooča s kronično lakoto, pri čemer bi se lahko to število do leta 2030 povečalo na približno 840 milijonov, če se obstoječi trendi nadaljujejo. Ob tem ostaja razpoložljivost obdelovalnih zemljišč omejena, njihova površina pa se zaradi degradacije tal, urbanizacije in podnebnih sprememb še naprej zmanjšuje.

Za zadovoljevanje naraščajočega povpraševanja je sodobno kmetijstvo postalo močno odvisno od zunanjih vložkov, zlasti sintetičnih gnojil. Čeprav so ta omogočila znatno povečanje pridelkov, je učinkovitost izrabe hranil razmeroma nizka, saj rastline običajno izkoristijo le 30–40 % dodanih hranil, preostanek pa se izgubi v okolje. Te izgube prispevajo k emisijam toplogrednih plinov, onesnaževanju voda, evtrofikaciji ter dolgoročni degradaciji tal. Poleg tega je proizvodnja sintetičnih gnojil energetsko zelo zahtevna in odvisna od neobnovljivih virov, kot sta zemeljski plin in fosfatne rude, kar kmetijske sisteme dodatno izpostavlja tveganjem zaradi pomanjkanja virov in geopolitične nestabilnosti.

Omenjeni izzivi in omejitve spodbujajo razvoj bolj trajnostnih in odpornih pristopov v kmetijstvu. V ospredje vse bolj stopajo biološke rešitve, med katerimi imajo pomembno vlogo biognojila in biostimulanti. Ti prispevajo k učinkovitejši izrabi hranil, povečujejo odpornost rastlin ter zmanjšujejo odvisnost od sintetičnih vložkov. Hkrati se ta prehod odraža tudi v hitri rasti globalnih trgov. Po ocenah naj bi trg biognojil že naslednjem desetletju dosegel vrednost okoli 3–5 milijard USD, medtem ko naj bi trg z biostimulanti celo presegel 6–10 milijard USD, pri čemer rast spodbujajo tehnološke inovacije, regulativni pritiski in potreba po prilagajanju kmetijstva podnebnim spremembam.

Osrednji element vseh bioloških pristopov je talni mikrobiom. Mikroorganizmi v tleh namreč uravnavajo ključne procese, kot so kroženje hranil, razgradnja organske snovi ter interakcije med rastlinami in tlemi, s čimer neposredno vplivajo na rast rastlin in delovanje ekosistemov. Z izboljšanjem biološke vezave dušika, mobilizacije fosforja ter povečevanjem odpornosti rastlin na stres predstavlja talni mikrobiom velik potencial za povečanje produktivnosti in trajnosti kmetijskih sistemov.

Pomembno je poudariti, da ti procesi niso prostorsko enotni, temveč jih oblikuje okoljska variabilnost na ravni krajine. Na sestavo in delovanje mikrobnih združb namreč vplivajo lastnosti tal, podnebne razmere, relief in raba tal, zato je razumevanje teh prostorskih vzorcev ključno za razvoj ciljno usmerjenih in učinkovitih strategij upravljanja. Pri tem predstavljajo geografski informacijski sistemi (GIS) in prostorske analize pomembna orodja, ki omogočajo povezovanje procesov talnega mikrobioma z odločanjem na ravni krajine ter s preciznim kmetijstvom.

V poglavju je predstavljeno, kako lahko talni mikrobiom izkoristimo za podporo podnebno pametni pridelavi rastlin in trajnostnemu krajinskemu upravljanju. Povezuje biološke, agronomske in prostorske vidike ter nudi osnovo za razumevanje, kako interakcije med rastlinami in mikroorganizmi prispevajo k razvoju odpornih ter z vidika rabe virov učinkovitih in okoljsko trajnostnih sistemov pridelave hrane.

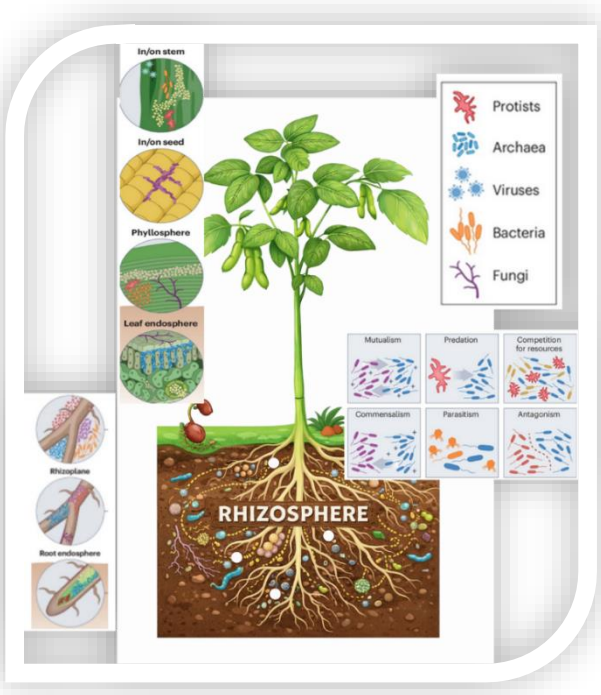
3.2. Mikrobiomske rešitve v pridelavi rastlin

3.2.1. Rastlinski holobiont kot funkcionalna enota

Današnji visokoproduktivni kmetijski sistemi so močno odvisni od mineralnih gnojil, zlasti tistih, ki vsebujejo dušik (N) in fosfor (P). Njihova uporaba pa je pogosto neučinkovita, saj se velik delež dodanih hranil izgubi v okolje, kar prispeva k emisijam toplogrednih plinov, onesnaževanju voda in degradaciji tal. Poleg tega je proizvodnja sintetičnih gnojil energetsko zahtevna ter odvisna od neobnovljivih virov.

Te omejitve poudarjajo potrebo po alternativnih pristopih, ki omogočajo učinkovitejšo izrabo hranil ob hkratnem zmanjševanju vplivov na okolje. Eden ključnih konceptualnih premikov v tem kontekstu je razumevanje rastline kot **holobionta** – celostne ekološke enote, ki jo sestavljata gostiteljska rastlina in z njo povezan mikrobiom. Ta koncept poudarja, da lastnosti rastlin, njihovo zdravje in sposobnost prilagajanja na okoljski stres niso odvisni zgolj od rastline same, temveč izhajajo iz skupnega delovanja rastline in z njo povezanih mikrobnih združb.

Rastlinski mikrobiom sestavljajo raznolike združbe bakterij, gliv, arhej, virusov in mikroskopskih evkariontov, ki naseljujejo različne dele rastline. Mednje sodita **rizosfera** (angl. rhizosphere) – območje tal, ki je pod neposrednim vplivom korenin, in z njo tesno povezan **rizoplan** (angl. rhizoplane), ki predstavlja površino korenin ter stik med rastlino in okoliškimi tlemi. Mikroorganizmi lahko naseljujejo tudi nadzemne dele rastlin, ki jih skupno označujemo kot **filosfero** (angl. phyllosphere) in vključujejo liste, stebla, cvetove, plodove ter semena. Tako se vzdolž celotne rastline vzpostavlja povezan in medsebojno prepleten mikrobiom (slika 22).



Mikroorganizmi, povezani z rastlinami, naseljujejo različne ekološke niše in vzpostavljajo širok spekter interakcij z gostiteljskim organizmom, od mutualističnih do nevtralnih ali celo patogenih. Medtem ko nekateri mikroorganizmi živijo znotraj rastlinskih tkiv kot endofiti, ostajajo mnogi v rizosferi ali na površini korenin in nadzemnih delov rastlin, kjer z rastlino tesno sodelujejo, ne da bi vstopili v njena tkiva (slika 22). V kmetijskih sistemih je posebna pozornost namenjena koristnim mikroorganizmom na in v vseh teh delih rastline, vključno s prostoživečimi, asociativnimi in endofitskimi vrstami.

Slika 22. Rastlinski holobiont: prostorska razporeditev in interakcije mikrobioma rastline

3.2.1.1. Talni mikrobiom

Talni mikrobiom predstavlja pomemben del rastlinskega holobionta in zajema izjemno raznoliko skupnost mikroorganizmov, ki naseljujejo tla. Ti organizmi medsebojno delujejo, sodelujejo s koreninami rastlin ter z okoliškim okoljem, pri čemer tvorijo kompleksne ekološke mreže, ki uravnavajo ključne procese v ekosistemih.

Mikrobne združbe v tleh so izjemno raznolike; en gram tal lahko vsebuje milijarde mikrobnih celic in na tisoče mikrobnih taksonov. Ta izjemna raznolikost je temelj delovanja in stabilnosti kopenskih ekosistemov ter uvršča tla med biološko najbolj aktivna okolja na Zemlji. Ocenjuje se, da lahko ena čajna žlička tal vsebuje več mikroorganizmov, kot je ljudi na planetu. Na večji prostorski ravni je lahko tudi mikrobna biomasa zelo velika: na enem kvadratnem metru tal do globine 15 cm je lahko, odvisno od tipa ekosistema, prisotnih do 500 g bakterij, 500 g aktinomicet in 1,5 kg gliv (Backer in sod., 2018).

Talni mikrobiom ne deluje kot enoten sistem, temveč opravlja številne funkcionalno različne vloge, ki so ključne za rast rastlin, rodovitnost tal in trajnostno delovanje ekosistemov. Poenostavljen pregled najpomembnejših funkcionalnih vlog talnega mikrobioma v agroekosistemih je prikazan v preglednici 5.

Preglednica 5. Funkcionalne vloge talnega mikrobioma v agroekosistemih

Funkcionalna vloga	Ključni procesi	Mehanizmi	Pomen za kmetijstvo
Kroženje in dostopnost hranil	Mineralizacija, nitrifikacija, denitrifikacija in biološka vezava dušika	Encimska aktivnost, tvorba organskih kislin, mobilizacija hranil (P, K, S, mikroelementi)	Povečuje dostopnost in učinkovitost izrabe hranil; zmanjšuje potrebo po gnojilih
Spodbujanje rasti rastlin in odpornost na stres	Sinteza fitohormonov (IAA, citokinini), aktivnost ACC-deaminaze, sinteza osmolitov	Spodbujanje rasti korenin, izboljšan privzem hranil, uravnavanje odziva na stres	Zmanjšuje pojav bolezni in odvisnost od pesticidov
Zdravje rastlin in zatiranje bolezni	Tekmovalnost, tvorba protimikrobnih snovi, inducirana sistemska odpornost	Antibiotiki, litični encimi (hitinaze, glukanaze))	Reduces disease pressure and dependency on pesticides
Delovanje ekosistemov in uravnavanje podnebjaclimate regulation	Razgradnja organske snovi, uravnavanje toplogrednih plinov	Sekvestracija ogljika, mikrobno dihanje, uravnavanje tokov plinov (CO_2, N_2O, CH_4)	Prispeva k rodovitnosti tal, skladiščenju ogljika in podnebni odpornosti

Čeprav so mikrobne združbe v tleh zelo raznolike, vsi mikroorganizmi ne prispevajo enako k rasti in razvoju rastlin. Posebna pozornost je zato namenjena funkcionalnim skupinam koristnih mikroorganizmov, kot so bakterije, ki spodbujajo rast rastlin (angl. plant growth-promoting bacteria – PGPB), in mikorizne glive, ki imajo ključno vlogo pri trajnostni pridelavi rastlin. Razumevanje funkcij in medsebojnih interakcij teh mikroorganizmov predstavlja osnovo za njihovo ciljno uporabo v kmetijskih sistemih, kjer se biološki procesi vse bolj vključujejo v strategije pridelave, vključno z uporabo mikrobnih konzorcijev, kot so efektivni mikroorganizmi (EM), ter rešitev, ki temeljijo na uporabi mikroalg.

3.2.2. Biognojila in biostimulanti

Na podlagi razumevanja delovanja talnega mikrobioma se koristni mikroorganizmi vse pogosteje uporabljajo v kmetijstvu v obliki komercialno dostopnih proizvodov, ki izboljšujejo produktivnost rastlin, povečujejo učinkovitost izrabe hranil ter krepijo odpornost na okoljski stres. Ti proizvodi so zasnovani tako, da podpirajo naravne interakcije med rastlinami in mikroorganizmi ter predstavljajo praktična orodja za vključevanje bioloških procesov v sodobne sisteme pridelave rastlin. Glede na način delovanja in funkcijo jih lahko v grobem razdelimo v dve glavni skupini: **biognojila** in **biostimulante**.

Čeprav se izraz biognojilo pogosto uporablja v znanstveni literaturi, v veljavni zakonodaji Evropske unije ni formalno opredeljen. Zakonodajni okvir, vzpostavljen z Uredbo (EU) 2019/1009 Evropskega parlamenta in Sveta, predstavlja pomemben korak k bolj trajnostnemu kmetijstvu, saj podpira cilje evropskega zelenega dogovora in strategije »od vil do vilic« z spodbujanjem uporabe bioloških in okoljsko manj obremenjujočih vložkov v pridelavi rastlin. Pomembno je, da ta uredba izrecno priznava mikroorganizme kot sestavine sredstev za gnojenje, s čimer omogoča vključevanje rešitev, ki temeljijo na mikrobiomu, v kmetijsko prakso.

V omenjem pravnem okviru so rastlinski biostimulanti (PFC 6) opredeljeni kot proizvodi, ki spodbujajo procese prehrane rastlin ne glede na vsebnost hranil, z namenom izboljšanja učinkovitosti izrabe hranil, odpornosti na abiotski stres, kakovosti pridelkov ali dostopnosti hranil v tleh oziroma rizosferi. Skupina rastlinskih biostimulantov vključuje tako mikrobne kot nemikrobne proizvode. Mikrobne komponente so trenutno omejene na manjše število dovoljenih skupin, med katere sodijo rodovi, kot so *Azotobacter*, *Azospirillum* in *Rhizobium*, ter arbuskularne mikorizne glive. Nemikrobni proizvodi vključujejo snovi, kot so huminske in fulvo kisline, ekstrakti morskih alg, proteinski hidrolizati, aminokisline, rastlinski izvlečki ter materiali na osnovi mikroalg.

Status mikrobnih proizvodov v zakonodaji EU o sredstvih za gnojenje

- Mikrobni in nemikrobni proizvodi so v skladu z Uredbo (EU) 2019/1009 opredeljeni kot sredstva za gnojenje.
- Rastlinski biostimulanti so določeni kot funkcionalna kategorija sredstev 6 (FKS 6).
- Mikroorganizmi so uvrščeni v kategorijo sestavnih materialov 7 (KSM 7), ki določa skupine mikroorganizmov, ki jih je dovoljeno uporabljati.
- Trenutno dovoljeni mikroorganizmi vključujejo rodove bakterij *Rhizobium*, *Azotobacter* in *Azospirillum*, ter arbuskularne mikorizne glive.
- V KSM 7 so vključeni le živi (vitalni) mikroorganizmi; neživi mikrobni proizvodi (npr. ekstrakti ali metaboliti) so uvrščeni v drugih KSM in se lahko uporabljajo v različnih funkcionalnih kategorijah srdstev, vključno z rastlinskimi biostimulanti (FKS 6), odvisno od njihovega namena uporabe.
- Za pridobitev oznake CE morajo proizvodi izpolnjevati stroge zahteve, med drugim:
  - dokazano agronomsko učinkovitost,
  - varnost (odsotnost kontaminantov),
  - skladnost z merili kakovosti in merili, specifičnimi za posamezne seve.



Prihodnje usmeritve:

- Do leta 2026 lahko pričakujemo usklajene metodologije vrednotenja.
- Od leta 2027 dalje lahko pričakujemo razširitev seznama dovoljenih mikroorganizmov (KSM 7).

3.2.2.1. Biognojila (v EU opredeljena kot biostimulanti)

Glede na primarni način delovanja lahko biognojila razvrstimo v več funkcionalnih skupin, med katere sodijo mikroorganizmi, ki vežejo dušik, mikroorganizmi, ki mobilizirajo fosfor, mikroorganizmi, ki mobilizirajo kalij in mikroelemente, mikorizne glive ter med mikrobne konzorcije. Ker vse naštete skupine niso enako pomembne v vseh kmetijskih sistemih, se v tem poglavju osredotočamo na biognojila, ki se najpogosteje uporabljajo v evropskem kmetijstvu, zlasti v pridelavi poljščin:
A. mikroorganizmi, ki vežejo dušik,
B. arbuskularne mikorizne glive (AMF).

A. Mikroorganizmi, ki vežejo dušik

Mikroorganizmi, ki vežejo dušik, imajo v trajnostni pridelavi rastlin ključno vlogo, saj pretvarjajo atmosferski dušik (N_2) v rastlinam dostopne oblike s procesom biološke vezave dušika (BVN). Proces izvajajo specializirani prokarionti (diazotrofi) z encimom nitrogenazo, ki reducira atmosferski dušik v amonijak, katerega rastline lahko asimilirajo. Te mikroorganizme lahko v grobem razdelimo v dve skupini:
1. simbiotske mikroorganizme in
2. prostoživeči ali asociativni mikroorganizmi, ki vežejo dušik.

Simbiotski mikroorganizmi, ki vežejo dušik (1), najbolje predstavljajo bakterije iz rodov *Rhizobium*, *Bradyrhizobium* (študija primera 15) in *Sinorhizobium*, ki tvorijo visoko specifične povezave z metuljnicami, kot so soja, grah in lucerna. Po kolonizaciji korenin te bakterije inducirajo nastanek koreninskih nodulov – specializiranih struktur, v katerih poteka vezava zračnega dušika. V nodulih se atmosferski dušik pretvori v amonijak, rastlina pa bakterijam zagotavlja ogljikove hidrate ter vzdržuje okolje z nizko koncentracijo kisika, ki je nujno za delovanje nitrogenaze. Dobro delujoče simbioze lahko rastlinam zagotovijo znatne količine dušika, s čimer zmanjšujejo potrebo po uporabi sintetičnih gnojil ter prispevajo k rodovitnosti tal v kolobarju.

V nasprotju s simbiotskimi prostoživeči in asociativni mikroorganizmi, ki vežejo dušik (2), ne tvorijo nodulov, temveč živijo samostojno v tleh ali v tesni povezavi s koreninami rastlin. Ti mikroorganizmi so še posebej pomembni za rastline, ki ne spadajo v družino metuljnic, kot so trave (žita) in zelenjadnice. Čeprav je njihov prispevek k oskrbi rastlin z dušikom praviloma manjši kot pri simbiotskih sistemih, se pogosto uporabljajo zaradi dodatnih učinkov na spodbujanje rasti rastlin. Med njimi je dobro poznan *Azotobacter* – prostoživeči mikroorganizem, ki naseljuje rizosfero številnih rastlin in se že dolgo uporablja kot biognojilo. Poznan je tudi *Azospirillum,* ki vzpostavlja asociativne odnose s koreninami trav (žita). Poleg prispevka k dostopnosti dušika proizvaja tudi fitohormone, ki spodbujajo razvoj korenin ter izboljšujejo privzem hranil in vode.

Azospirillum se sicer lahko uporablja kot samostojen mikrobni inokulant, vendar se vse pogosteje uporablja v kombinaciji z drugimi koristnimi mikroorganizmi, kjer deluje kot dopolnilna komponenta, ki spodbuja rast rastlin in izboljšuje izrabo virov. Takšne strategije sočasne inokulacije združujejo več funkcionalnih mehanizmov in postajajo vse pomembnejše v sodobnih sistemih pridelave. Pristop je prikazan v študiji primera 15, kjer se *Azospirillum* uporablja skupaj s simbiotskimi mikroorganizmi pri pridelavi soje.

Endofitske bakterije, ki vežejo dušik, predstavljajo posebno skupino diazotrofov, ki naseljujejo notranja rastlinska tkiva, ne da bi pri tem tvorile specializirane strukture – nodule. Med njimi je ena najbolj raziskanih vrst *Gluconacetobacter diazotrophicus*. Ta gramnegativna bakterija, prvotno izolirana iz sladkornega trsa, naseljuje notranje dele rastline, kot so korenine, stebla in prevodna tkiva, kjer ji tesna povezanost z gostiteljem omogoča hiter dostop do virov ogljika ter hkrati olajša prenos biološko vezanega dušika.

Poleg vezave dušika *G. diazotrophicus* spodbuja tudi rast rastlin z izločanjem fitohormonov, kot so avksini in giberelini, ki vplivajo na razvoj korenin in celostno rast. Ta večfunkcionalnost odraža dvojno vlogo endofitskih diazotrofov, ki prispevajo tako k prehrani rastlin (prek vezave dušika) kot k uravnavanju njihove rasti. Vrsta je bila najdena v številnih kmetijskih rastlinah, vključno z rižem, koruzo, kavo in različnimi vrstami zelenjadnic, kar potrjuje njen širši ekološki pomen in potencial za uporabo v kmetijstvu. V primerjavi s simbiotskimi sistemi vezave dušika je kvantitativni prispevek vrste *G. diazotrophicus* k oskrbi rastlin z dušikom težje opredeljiv, saj je močno odvisen od rastlinske vrste, sorte in okoljskih razmer.

Poleg klasičnih endofitskih sistemov se vse več pozornosti namenja tudi bakterijam, povezanih z rastlinami, ki naseljujejo nadzemne dele rastlin, zlasti filosfero. V tem kontekstu so se vrste iz rodu *Methylobacterium* uveljavile

kot pomembni sestavni deli rastlinskega mikrobioma. Te bakterije so presnovno prilagojene na izrabo spojin z enim ogljikom, kot je metanol, ki ga sproščajo rastlinska tkiva. Zato jih pogosto najdemo na površini listov ter tudi znotraj rastlinskih tkiv.

Methylobacterium symbioticum, nedavno opisana vrsta (formalno opredeljena leta 2020), predstavlja primer te skupine s potencialom za uporabo v kmetijskih sistemih. Prisotnost te bakterije je bila potrjena pri različnih kmetijskih rastlinah in je povezana s procesi, kot so tvorba fitohormonov, uravnavanje presnove rastlin in izboljšana učinkovitost izrabe hranil. Njena vloga pri biološki vezavi dušika je bila predlagana, zlasti v nadzemnih delih rastlin, vendar mehanizmi in obseg njenega prispevka k prehrani rastlin z dušikom še vedno niso povsem pojasnjeni. Ta mikroorganizem je podrobneje obravnavan v študiji primera 16, kjer je njegova učinkovitost analizirana na podlagi raziskav pri koruzi.

B. Arbuskularne mikorizne glive

Arbuskularne mikorizne glive (angl.: Arbuscular mycorrhizal fungi – AMF), ki sodijo v deblo Glomeromycota, tvorijo obligatne simbiotske povezave s koreninami približno 80 % kopenskih rastlinskih vrst, vključno z večino kmetijskih rastlin. Simbioza temelji na dvosmerni izmenjavi virov: rastline glivam zagotavljajo ogljik, pridobljen s fotosintezo, medtem ko glive izboljšujejo privzem mineralnih hranil in vode iz tal.

Vzpostavitev interakcije vključuje nastanek funkcionalne mikorizne mreže, ki jo sestavljajo strukture znotraj korenin ter hife, ki se razraščajo v okoliška tla. Ekstraradikalni micelij povečuje volumen tal, v katerega sega micelij gliv kar omogoča dostop do slabo mobilnih hranil. V kortikalnih celicah korenin tvorijo AMF arbuskule – močno razvejane strukture, ki predstavljajo glavno mesto izmenjave hranil med glivo in gostiteljsko rastlino. Nekatere AMF tvorijo tudi vezikle, ki služijo kot založne strukture in prispevajo k vzdrževanju simbioze.

S funkcionalnega vidika prispevajo AMF k prehrani rastlin z izboljšanim privzemom makro- in mikrohranil, zlasti fosforja, pa tudi dušika iz anorganskih in organskih virov (npr. aminokislin), žvepla, kalija in mikroelementov. Poleg privzema hranil imajo AMF pomembno vlogo pri delovanju tal: njihove hifne mreže in z njimi povezane spojine (npr. glomalin) izboljšujejo agregacijo talnih delcev, povečujejo stabilnost talne strukture ter zadrževanje vode, s čimer prispevajo k rodovitnosti in odpornosti tal. AMF vplivajo tudi na odzive rastlin na okoljski stres, saj izboljšujejo privzem vode, uravnavajo fiziološke procese in aktivirajo obrambne mehanizme rastlin. Posledično povečujejo odpornost rastlin na sušo, slanost in stres zaradi težkih kovin ter prispevajo k zaščiti pred talnimi patogeni.

Na ravni agroekosistema AMF pomembno prispevajo h kroženju hranil, nastajanju tal in dinamiki ogljika. Vendar pa je v kmetijskih sistemih njihova učinkovitost kot biognojil močno odvisna od specifičnih razmer, ki jih določajo lastnosti tal, način kmetovanja, združljivost med rastlino in glivo ter interakcije z avtohtonimi mikrobnimi združbami. Ta kompleksnost je podrobneje obravnavana v študiji primera 17.

3.2.2.2. Mikrobni konzorciji (npr. efektivni mikroorganizmi, EM)

Čeprav v praksi komercialni mikrobni proizvodi najpogosteje temeljijo na posameznih sevih izbranih mikroorganizmov, so vse pogosteje na voljo tudi formulacije z več sevi. Tako mikrobni konzorciji združujejo organizme s komplementarnimi funkcijami, kot so mobilizacija hranil, spodbujanje rasti rastlin in povečanje odpornosti na stres.

Eden najbolj znanih primerov takšnega pristopa je koncept efektivnih (učinkovitih) mikroorganizmov (EM), ki ga je v 80. letih prejšnjega stoletja razvil profesor Teruo Higa. Koncept temelji na predpostavki, da lahko z vnosom

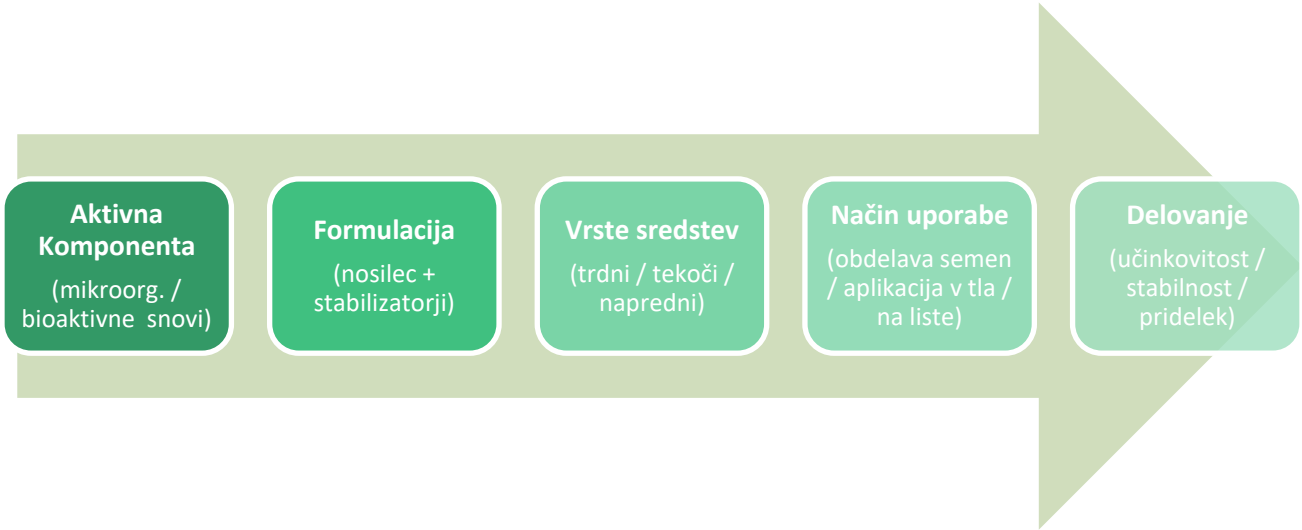
izbranih skupin koristnih mikroorganizmov v okolje usmerjamo mikrobne združbe v bolj ugodne, regenerativne procese. EM formulacije običajno vključujejo mešanice mlečnokislinskih bakterij, fotosintetskih bakterij, kvasovk in drugih mikroorganizmov.

Uporaba EM je v okoljskih aplikacijah bolj dosledno potrjena kot njihova uporaba v pridelavi rastlin. Po podatkih iz literature se EM uporabljajo v kompostnih sistemih, kjer lahko pospešujejo razgradnjo organskih ostankov in izboljšujejo kakovost komposta. Uporabljajo se tudi pri čiščenju odpadnih voda in upravljanju z nastalim blatom, kjer lahko prispevajo k zmanjšanju organskih onesnaževal, neprijetnih vonjav in vsebnosti patogenov. Med druge načine uporabe sodijo stabilizacija odpadkov, bioremediacija onesnaženih tal ter izboljšanje higienskih razmer v živinoreji. V takšnih sistemih, kjer je na voljo veliko organskih substratov in so mikrobni procesi močno odvisni od njihove razpoložljivosti, lahko EM spodbujajo povečano mikrobno aktivnost in procese pretvorbe snovi.

V nasprotju s tem je njihova učinkovitost v sistemih pridelave rastlin bolj variabilna. V kmetijskih tleh, kjer so mikrobne združbe že zelo raznolike in med seboj bolj tekmovalne, morajo vneseni mikroorganizmi vzpostaviti interakcije z obstoječimi avtohtonimi populacijami. Posledično je učinkovitost EM proizvodov v smislu rasti rastlin in pridelka bolj spremenljiva ter močno odvisna od okoljskih razmer, lastnosti tal in načina kmetovanja. Del opaženih pozitivnih učinkov je lahko povezan tudi z organskimi sestavinami v formulacijah, ne pa zgolj z delovanjem mikroorganizmov.

3.2.3. Formulacije biognojil in biostimulantov

Formulacija ima ključno vlogo pri določanju učinkovitosti biognojil in biostimulantov. Vključuje združevanje aktivnih bioloških komponent z nosilci in dodatki, ki zagotavljajo stabilnost, življenjsko sposobnost mikroorganizmov ter enostavno uporabo. Različni pristopi k formulaciji vplivajo na obstojnost proizvoda, način uporabe in njegovo učinkovitost v praksi. Glavni tipi formulacij in njihove značilnosti so prikazani na sliki 23 in povzeti v preglednici 6.



Slika 23. Shematski prikaz formulacije biognojil in biostimulantov: od aktivnih komponent do učinkovitosti v pridelavi

Preglednica 6. Pregled vrst formulacij, uporabljenih pri biognojilih in biostimulantih

Vrsta formulacije	Opis	Prednosti	Omejitve	Tipična uporaba
Trdne formulacije (praški, granule, mikrogranule)	Mikroorganizmi ali bioaktivne spojine vezani na trdne nosilce	Enostavno skladiščenje in transport; visoka stabilnost; stroškovna učinkovitost	Nižja koncentracija mikroorganizmov; počasnejša aktivacija v tleh	Aplikacija v tla, obdelava semena
Tekoče formulacije	Suspenzije mikroorganizmov ali raztopljene spojine v vodi ali olju	Enostavna uporaba; združljivost z namakalnimi sistemi; visoka koncentracija mikroorganizmov	Občutljivost na pogoje skladiščenja; tveganje za zmanjšanje vitalnosti mikroorganizmov	Obdelava semena, fertigacija
Enkapsulirane formulacije	Mikroorganizmi, vključeni v zaščitne matrikse (npr. polimerne kapsule)	Zaščita pred okoljskimi vplivi; nadzorovano sproščanje	Višji stroški; možna omejena dostopnost kisika	Ciljana aplikacija v tla
Emulzije	Mešanice tekočin, ki se sicer ne mešajo (olje/voda), stabilizirane s surfaktanti	Izboljšana stabilnost; nadzorovano sproščanje; možnost prilagodljive uporabe	Zahtevno zagotavljanje stabilnosti formulacije	Foliarna aplikacija, tekoči pripravki
Suhe formulacije (npr. sušenje v fluidizirani plasti)	Odstranjevanje vlage za stabilizacijo mikrobnih proizvodov	Podaljšana obstojnost; manjše tveganje kontaminacije	Tehnološka zahtevnost postopka	Komercialni inokulanti
Nanoformulacije	Aktivne snovi ali mikroorganizmi na nanoravni	Izboljšana učinkovitost nanosa; zmanjšane izgube	Still under development; regulatory uncertainty Še v razvoju; manjko zakonodaje	Tehnologija v razvoju

Študija primera 15: Vloga biološke vezave dušika kot temelj pridelave soje (Telles in sod., 2023: https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.103158)



Slika 24. Noduli na koreninah soje

Izhodišče: Soja (*Glycine max* L.) je ena najpomembnejših poljščin na svetu, pri čemer sodi Brazilija med vodilne proizvajalke in izvoznice, saj zagotavlja pomemben delež soje na mednarodnih trgih, vključno s trgom Evropske unije. Brazilski sistemi pridelave soje so zato zelo pomembni za razumevanje vloge mikrobnih procesov v obsežni kmetijski pridelavi.

Izziv: Dušik je ključno omejujoče hranilo v pridelavi rastlin in se običajno dodaja v obliki sintetičnih gnojil. Po drugi strani je gnojenje z dušikom povezano z visokimi stroški, nizko učinkovitostjo izrabe hranila ter pomembnimi okoljskimi vplivi. Osrednji izziv je, ali lahko biološki procesi zanesljivo in v dovoljšnji meri nadomestijo mineralne vire dušika v intenzivnih pridelovalnih sistemih.

Biotehnološki pristop in rešitev: sistemi pridelave soje v Braziliji temeljijo na inokulaciji z izbranimi sevi bakterij rodu *Bradyrhizobium*, ki s sojo tvorijo zelo učinkovite simbioze in omogočajo biološko vezavo dušika (BNF) v obsegu, ki zadostuje potrebam rastlin po dušiku. Ti sevi so bili skozi desetletja selekcionirani in optimizirani za lokalne talne in podnebne razmere ter za združljivost s sortami soje. Pomembno je poudariti, da kljub prisotnosti avtohtonih populacij rizobijev v tleh ostaja letna reinokulacija standardna praksa, saj vneseni elitni sevi praviloma zagotavljajo učinkovitejšo nodulacijo in vezavo dušika. Poleg tega se vse pogosteje uporablja tudi sočasna inokulacija z bakterijo *Azospirillum brasilense*, ki dopolnjuje simbiotsko vezavo dušika z učinki na spodbujanje rasti rastlin, zlasti z izboljšanjem razvoja korenin in izrabe virov.
V brazilskih sistemih pridelave soje se dušikova gnojila, kot je sečnina (urea), praviloma ne uporabljajo. Potrebe rastlin po dušiku se namreč večinoma pokrivajo z biološko vezavo dušika. V tej raziskavi je bila vrednost BNF ocenjena na podlagi izračuna količine mineralnega dušika, ki bi ga bilo treba dodati v odsotnosti tega procesa, pri čemer je bila upoštevana 50-odstotna učinkovitost izrabe dušika iz gnojil.

Dokazi iz prakse: sistemi pridelave soje v Braziliji potrjujejo pozitiven vpliv BNF v velikem (large-scale) merilu

- Nadomeščanje mineralnih dušikovih gnojil z BNF prinaša približno 15,2 milijarde USD prihrankov v rastni sezoni.
- Tehnologija sočasne inokulacije (ko-inokulacije) soje z bakterijami rodu *Bradyrhizobium* in *Azospirillum brasilense* se je hitro razširila in danes zajema približno 25 % površin s sojo (≈ 10 milijonov ha). To hitro uvajanje tehnologije je povezano z njenimi agronomskimi prednostmi, saj sočasna inokulacija z omenjenimi bakterijami omogoča večje pridelke v primerjavi z enostavno inokulacijo z rizobiji, kar odraža prednosti združevanja komplementarnih funkcij mikroorganizmov.
- Po ocenah so v teh sistemih emisije toplogrednih plinov manjše za približno 183 milijonov Mg CO_2-ekvivalenta.

Pomen biološke vezave dušika presega zgolj agronomske in ekonomske koristi. V Braziliji je BNF prepoznana kot ključni ukrep za blaženje podnebnih sprememb v okviru nacionalnih podnebnih politik, vključno z načrtom za nizkoogljično kmetijstvo (Plano ABC, 2010–2020) in njegovim nadaljevanjem Plano ABC+ (2021–2030). To poudarja vlogo mikrobnih procesov kot merljivih in preverljivih prispevkov k zmanjševanju emisij toplogrednih plinov v kmetijstvu.

Študija primera 15: Vprašanja za kritični razmislek

- Zakaj je re-inokulacija priporočljiva tudi v tleh, kjer so že prisotni s sojo združljivi rizobiji?
- Ali so mikrobni inokulanti na osnovi rodov *Bradyrhizobium* in *Azospirillum* dostopni na slovenskem oziroma evropskem trgu? Pod katerimi komercialnimi imeni se tržijo in v katerih formulacijah so na voljo (npr. tekoči inokulanti, obložena semena, granule)?
- Kako proizvajalci predstavljajo učinkovitost proizvoda in pričakovane koristi? Katere trditve so podprte z znanstvenimi dokazi, katere pa temeljijo predvsem na trženjskih pristopih?
- Kako bi lahko učinkovitost takšnih proizvodov neodvisno ovrednotili v poljskih razmerah? Kakšno zasnovo poskusa bi predlagali?

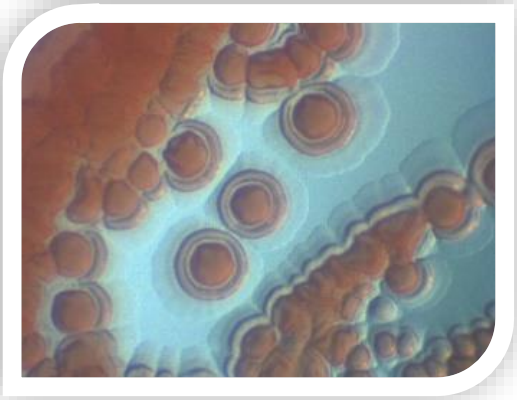
Dodatna računska naloga

Na podlagi razpoložljivih podatkov o biološki vezavi dušika (npr. približno 100 kg N ha^{-1} $leto^{-1}$ za Slovenijo) ocenite agronomsko in ekonomsko vrednost BNF.

1. Če biološka vezava dušika zagotovi 100 kg N ha^{-1}, koliko mineralnega dušikovega gnojila (sečnina, KAN) bi bilo treba uporabiti za zagotovitev enake količine rastlinam dostopnega dušika, ob predpostavki 50-odstotne učinkovitosti izrabe dušika (NUE)?
2. Na podlagi trenutnih cen gnojil ocenite strošek na hektar in skupni strošek za izbrano oziroma povprečno veliko kmetijo.
3. Kako realistična je predpostavka, da je učinkovitost izrabe dušika stalna, npr. 50 %, v različnih talnih in podnebnih razmerah? Kateri dejavniki lahko v praksi vplivajo na to vrednost?

Zapišite ključne ugotovitve:

Študija primera 16: Foliarna aplikacija Methylobactrrium symbioticum pri koruzi – Potencial in variabilnost rezultatov



Slika 25. Mikroskopski prikaz kolonije *M. symbioticum* Vir: Symborg (2025)

Izhodišče: Nedavni razvoj na področju mikrobnih proizvodov za pridelavo rastlin vključuje tudi foliarno aplicirane bakterije, kot je *Methylobacterium symbioticum*, za katere predvidevajo, da lahko pospešujejo rast rastlin in prispevajo k prehrani z dušikom pri nestročnicah. Za razliko od sistemov, povezanih s koreninami, ti mikroorganizmi naseljujejo filosfero (nadzemne dele) in se nanašajo neposredno na liste.

Izziv 1: koruza ima visoke potrebe po dušiku, zato se gnojenje pogosto izvaja v več obrokih, da se izboljša učinkovitost izrabe in zmanjšajo izgube. Poznejše aplikacije so lahko tehnično zahtevne, saj višina rastlin omejuje dostop do posevka. Čeprav obstajajo rešitve, kot so tekoča gnojila in aplikacije iz zraka (letala, droni), te niso vedno praktične ali stroškovno učinkovite.

Biotehnološka rešitev / priložnost: v več raziskavah so bili opisani pozitivni učinki bakterije *M. symbioticum* na rast in pridelavo koruze. V določenih razmerah so inokulirane rastline izkazovale:

- povečano vsebnost dušika v rastlinskih tkivih (Quemada in sod., 2026),
- izboljšano tvorbo biomase in razvoj korenin (Bolla in sod., 2025),
- večji pridelek zrnja, zlasti v negnojenih obravnavanjih (npr. povečanje z ~5,1 na 7,3 t ha^{-1}),
- potencial za delno nadomeščanje mineralnih dušikovih gnojil (Quemada in sod., 2026).

Izziv 2: **variabilni rezultati:** kljub nekaterim obetavnim rezultatom ostaja agronomska učinkovitost bakterije *M. symbioticum* zelo variabilna.

- V več poljskih poskusih so poročajo o povečanju pridelkov, vendar ti učinki niso bili vedno statistično značilni (Bolla in sod., 2025).
- Pri optimalnem gnojenju z dušikom se učinek inokulacije pogosto izgubi (Quemada in sod., 2026).
- Odzivi se razlikujejo glede na lokacijo in okoljske razmere (de Jesus Santos in Da Cas Bundt, 2025).

Mehanizem delovanja še ni povsem pojasnjen, saj v nekaterih raziskavah ni jasnih dokazov o vezavi zračnega dušika. Opaženi učinki so lahko povezani predvsem s spodbujanjem rasti rastlin (npr. razvojem korenin, tvorbo fitohormonov) in ne z neposredno vezavo dušika.

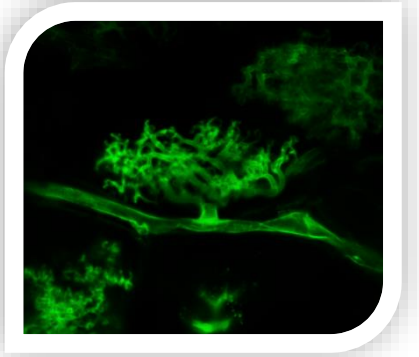
Interpretacija: primer ponazarja kompleksnost prenosa mikrobnega potenciala v zanesljivo, stabilno in ponovljivo agronomsko učinkovitost. Čeprav *M. symbioticum* v določenih razmerah izkazuje jasen potencial – zlasti ob omejeni razpoložljivosti dušika – njegove učinkovitosti ni mogoče posplošiti na vse pridelovalne sisteme.

Študija primera 16: Vprašanja za kritični razmislek

- Kako se rezultati razlikujejo med poskusi v kontroliranem okolju (lončni poskusi, rastlinjak) in poljskimi poskusi?
- Zakaj je ta mikroorganizem posebej zanimiv za uporabo v kmetijstvu? Upoštevajte rastlinske vrste in tkiva, ki jih naseljuje, ter možne mehanizme delovanja.
- Kako proizvajalci predstavljajo učinkovitost proizvoda in pričakovane koristi? Katere trditve so podprte z znanstvenimi dokazi, katere pa temeljijo predvsem na trženjskih pristopih?

Zapišite svoje ugotovitve:

Študija primera 17: Arbuskularne mikorizne glive – velik potencial, a od razmer odvisna učinkovitost teh kot biostimulanta (biognojila) (Berruti in sod., 2016: https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.01559



Slika 26. Arbuskul glive *Rhizophagus irregularis*, ki kolonizira korenino koruze, posnet s konfokalnim mikroskopom. Vir: Montero (2019)

Izhodišče: arbuskularne mikorizne glive (AMF) so splošno prepoznane zaradi svojega ekološkega pomena in potencialne vloge v trajnostnem kmetijstvu. Kljub dobro poznanim funkcijam pa je njihova uporaba kot biognojil v kmetijskih sistemih še vedno omejena in pogosto daje neenotne rezultate.

Izziv 1: fosfor je esencialno hranilo pomembno za rast rastlin, vendar je njegova dostopnost v tleh pogosto omejena zaradi slabe mobilnosti in močne vezave na talne delce. Posledično rastline pogosto ne morejo dostopati do zadostnih količin fosforja, tudi kadar je ta dodan z gnojili. Izboljšanje učinkovitosti izrabe fosforja tako ostaja eden ključnih izzivov trajnostne pridelave rastlin.

Biotehnološka rešitev / priložnost

AMF prispevajo k prehrani rastlin in delovanju tal, zlasti v sistemih z omejeno razpoložljivostjo hranil. Njihova vloga pri izboljšanju dostopnosti fosforja in pozitiven vpliv na rast rastlin jih uvršča med obetavne pristope za zmanjšanje odvisnosti od mineralnih gnojil.

Izziv: kljub velikemu potencialu številni biološki in tehnološki dejavniki omejujejo širšo praktično uporabo AMF kot biostimulantov oz. biognojil. Ena ključnih omejitev je, da so AMF obligatni simbionti, kar pomeni, da jih ni mogoče gojiti neodvisno od gostiteljske rastline. Zato proizvodnja inokuluma poteka v sistemih, ki vključujejo rastline, kar je bolj kompleksno in težje prenosljivo v proizvodnjo večjega obsega kot je npr.-mikrobna fermentacija, ki se uporablja pri bakterijskih inokulantih.
Poleg tega je odziv na inokulacijo z AMF v poljskih razmerah pogosto variabilen. Kmetijska tla običajno že vsebujejo avtohtone združbe AMF, zato morajo vneseni sevi tekmovati z obstoječimi populacijami. Posledično inokulacija ne vodi vedno do merljivih agronomskih učinkov. Na učinkovitost AMF dodatno vplivajo še založenost tal s hranili, zlasti s fosforjem, način kmetovanja, združljivost med rastlino in glivo ter okoljske razmere.

Tehnologija in uporaba: inokulanti z AMF se proizvajajo v kontroliranih sistemih z gostiteljskimi rastlinami in so običajno formulirani kot trdni nosilci, ki vsebujejo spore, hife in kolonizirane koreninske fragmente. V primerjavi z bakterijskimi inokulanti je AMF proizvode težje standardizirati, njihova učinkovitost pa je v različnih agroekosistemih manj predvidljiva.

Interpretacija: primer poudarja razliko med biološkim potencialom in agronomsko uporabnostjo. Čeprav imajo AMF ključno vlogo v delovanju ekosistemov, njihova učinkovitost kot apliciranih biostimulantov (biognojil) ni univerzalna.

Študija primera 17: Vprašanja za kritični razmislek

- Ali so mikrobni inokulanti na osnovi AMF dostopni na slovenskem oziroma evropskem trgu? Pod katerimi komercialnimi imeni se tržijo in v katerih formulacijah so na voljo?
- Kako proizvajalci predstavljajo učinkovitost proizvoda in pričakovane koristi? Katere trditve so podprte z znanstvenimi dokazi, katere pa temeljijo predvsem na trženjskih pristopih?
- Kako bi lahko učinkovitost takšnih proizvodov neodvisno ovrednotili v kontroliranih razmerah, npr. v lončnih poskusih, in kako v poljskih razmerah? Bi pričakovali podobne rezultate? Zakaj da oziroma zakaj ne? Kateri dejavniki bi lahko pojasnili morebitne razlike?

Zapišite svoje ugotovitve:

3.2.4. GIS analiza okoljskih dejavnikov, ki vplivajo na talni mikrobiom v kontekstu podnebnih sprememb

3.2.4.1. Okoljski dejavniki, ki vplivajo na talni mikrobiom

Na sestavo in delovanje talnega mikrobioma močno vplivajo okoljski dejavniki, ki določajo fizikalne in kemijske razmere za življenje in se med pokrajinami razlikujejo. Med najpomembnejšimi dejavniki so lastnosti tal, podnebje, vegetacija in raba tal. Razumevanje teh dejavnikov je ključno za razlago prostorske razširjenosti in delovanja združb talnih mikroorganizmov ter za povezovanje mikrobioloških procesov s širšimi prostorskimi sistemi.

Med lastnostmi tal je pH tal eden najpomembnejših dejavnikov, ki vplivajo na mikrobno diverziteto na regionalni in globalni ravni. Raziskave kažejo, da se sestava bakterijskih združb spreminja glede na pH tal, pri čemer so posamezne skupine mikroorganizmov prilagojene kislim, nevtralnim ali alkalnim razmeram. Na splošno je bakterijska diverziteta največja v tleh z nevtralnim pH (približno med 6 in 7,5), medtem ko močno kisla ali alkalna tla običajno podpirajo manj raznolike in drugačne mikrobne združbe. Med pomembne lastnosti tal sodijo tudi vsebnost organskega ogljika, razpoložljivost hranil, tekstura tal in vsebnost talne vlage.

Podnebje pomembno vpliva na talne mikrobne procese, saj določa temperaturne razmere in razpoložljivost vode. Hitrost presnovnih procesov mikroorganizmov se z naraščanjem temperature običajno povečuje, dokler so razmere zanje še ugodne, kar pospešuje razgradnjo organske snovi in mineralizacijo hranil. Enako pomembna je razpoložljivost vode, saj večina talnih mikroorganizmov za premikanje in biokemijske procese potrebuje tanke vodne filme v talnih porah. Ob zmanjšanju talne vlage se mikrobna aktivnost in hitrost razgradnje praviloma zmanjšata. Ker se zaradi podnebnih sprememb v številnih regijah pričakuje pogostejše pojavljanje suš in večja sušnost, lahko te spremembe pomembno vplivajo na kroženje ogljika, dostopnost hranil in dolgoročno rodovitnost tal.

Pomemben dejavnik oblikovanja talnega mikrobioma sta tudi vegetacija in raba tal. Različne rastlinske vrste vplivajo na mikrobne združbe prek koreninskega sistema, vnosa organske snovi ter simbiotskih odnosov s talnimi organizmi. Zato gozdovi, travišča in drugi naravni ekosistemi pogosto podpirajo številčnejše in bolj raznolike mikrobne združbe. Na razmere v tleh in delovanje mikroorganizmov vplivajo tudi različni načini rabe tal, kot so obdelava tal, gnojenje, namakanje in paša. Poleg tega pomembno vlogo igra relief, ki vpliva na lokalne razmere, kot so vlažnost tal, erozijski procesi in prerazporejanje hranil. Nadmorska višina, naklon ter lega določajo odvodnjavanje in mikroklimatske razmere, kar se odraža tudi v aktivnosti in sestavi talnih mikrobnih združb.

Skupaj ti okoljski dejavniki oblikujejo kompleksne prostorske gradiente, ki določajo razširjenost in delovanje talnega mikrobioma. Ker je mogoče številne dejavnike, kot so podnebne spremenljivke, raba tal, vegetacijska pokrovnost in relief, predstaviti v obliki prostorskih podatkov, predstavljajo pomembno osnovo za analizo talnega mikrobioma z uporabo geografskih informacijskih sistemov (GIS).

3.2.4.2. GIS in digitalna integracija za analizo in upravljanje talnega mikrobioma

Okoljski dejavniki, ki vplivajo na talni mikrobiom, se prostorsko razlikujejo, zato se razlikujejo tudi mikrobne združbe. Geografski informacijski sistemi (GIS) omogočajo analizo teh prostorskih vzorcev z integracijo prostorskih podatkov o podnebju, lastnostih tal, vegetaciji in reliefu. S povezovanjem okoljskih podatkov z rezultati terenskih raziskav GIS omogoča proučevanje okoljskih razmer za talne mikrobne procese na ravni regije.

Številni okoljski dejavniki, ki vplivajo na talni mikrobiom, so danes na voljo v obliki prostorskih podatkov.

Podnebne spremenljivke, kot sta temperatura in količina padavin, je mogoče pridobiti iz globalnih in regionalnih podnebnih baz podatkov (npr. WorldClim), medtem ko so podatki o lastnostih tal, kot so pH, vsebnost organskega ogljika, tekstura ter vsebnost hranil (npr. dušika in fosforja), dostopni prek globalnih pobud za digitalno kartiranje tal, kot sta SoilGrids in European Soil Data Centre (ESDAC).

Podatki daljinskega zaznavanja, pridobljeni iz satelitskih posnetkov, omogočajo spremljanje vegetacijske produktivnosti in rabe tal. Med najpogosteje uporabljenimi kazalniki je normalizirani diferenčni vegetacijski indeks (NDVI), ki se pogosto uporablja za ocenjevanje gostote vegetacije in pokrovnosti. Poleg tega je mogoče iz digitalnih modelov višin izpeljati reliefne spremenljivke, kot so nadmorska višina, naklon in ekspozicija, ki pomembno vplivajo na porazdelitev talne vlage, erozijske procese in lokalne mikroklimatske razmere.

Uporabna metoda za povezovanje več okoljskih dejavnikov v GIS je analiza obteženega prekrivanja (ang. weighted overlay analysis), ki se pogosto uporablja pri prostorskem odločanju in vrednotenju primernosti prostora. Pri tej metodi se posamezni okoljski dejavniki najprej pretvorijo na primerljivo lestvico, ki odraža njihovo primernost oziroma vpliv na izbrani proces. Nato se vsakemu dejavniku dodeli utež glede na njegov relativni pomen, na koncu pa se vsi sloji združijo v skupno karto, ki prikazuje prostorsko razporeditev ugodnih okoljskih razmer.

Pri raziskovanju talnega mikrobioma je mogoče z analizo obteženega prekrivanja združiti spremenljivke, kot so pH tal, temperatura, količina padavin, vegetacijska produktivnost, talna vlaga in vsebnost hranil, ter opredeliti območja, kjer okoljske razmere najverjetneje omogočajo intenzivnejše mikrobne procese oziroma večjo mikrobno aktivnost. Na primer, tla z nevtralnim pH, zmernimi temperaturami, zadostno količino vlage in uravnoteženo vsebnostjo hranil praviloma zagotavljajo ugodne razmere za razgradnjo organske snovi in kroženje hranil.

Najnovejši razvoj presega statične prostorske analize z vključevanjem podatkov v realnem času ter bioloških informacij. Senzorske tehnologije (npr. senzorji za merjenje talne vlage, temperature in hranil), daljinsko zaznavanje (npr. spremljanje z brezpilotnimi letalniki) ter digitalne platforme omogočajo neprekinjeno spremljanje stanja tal in rastlin. Hkrati napredek na področju analiz mikrobioma, vključno z metagenomiko in funkcionalnim profiliranjem, omogoča podrobnejši vpogled v sestavo in funkcionalni potencial mikrobnih združb.

Povezovanje teh podatkovnih virov v okviru GIS omogoča celovitejše razumevanje interakcij med rastlinami, tlemi in mikroorganizmi v različnih okoljskih razmerah. Takšen pristop podpira določanje upravljavskih območij (ang. management zones) ter omogoča bolj ciljno usmerjene in lokalnim razmeram prilagojene kmetijske prakse (Študija primera 18).

Takšna integracija se vse pogosteje odraža tudi v razvoju sistemov Smart-MIP (Microbial- and Sensor-Based Integrated Precision). Ti sistemi združujejo mikrobne pripravke, senzorske tehnologije, prostorske analize in podatkovno podprta orodja v enoten sistem za podporo odločanju. S povezovanjem bioloških procesov s prostorskimi in časovnimi podatki omogočajo učinkovitejše določanje lokacije, časa in načina uporabe mikrobnih pripravkov v kmetijstvu (slika 24).

***Študija primera 18:* Od mikrobnih pripravkov do natančnega upravljanja talnega mikrobioma – integracija talnih podatkov, senzorjev in GIS** (Ambaru in sod.., 2025: https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.103158; Danesh, 2025: https://doi.org/10.3390/s25216631)

Pregled: Učinkovitost mikrobnih pripravkov v kmetijski pridelavi je pogosto neenakomerna, saj je njihovo delovanje odvisno od okoljskih razmer, lastnosti tal in prostorske variabilnosti znotraj kmetijskih površin. Hkrati razvoj digitalnega kmetijstva omogoča boljše razumevanje, spremljanje in upravljanje te prostorske variabilnosti.

Izzivi:

1 – Prostorska variabilnost tal in mikrobnih procesov

Lastnosti tal, kot so pH, vsebnost vlage, organska snov in razpoložljivost hranil, se znotraj kmetijskih površin prostorsko razlikujejo ter pomembno vplivajo na aktivnost mikroorganizmov. Posledično so odzivi na uporabo mikrobnih pripravkov neenakomerni in segajo od izrazito pozitivnih učinkov do zelo majhnega učinka ali popolne odsotnosti odziva.

2 – Omejena možnost napovedovanja učinkovitosti mikrobnih pripravkov

Čeprav imajo mikrobni pripravki velik potencial, je njihovo učinkovitost v dejanskih razmerah na terenu težko napovedati. Tradicionalni pristopi upravljanja pogosto ne vključujejo prostorsko opredeljenih informacij, ki bi povezovale lastnosti tal, stanje posevkov in aktivnost mikroorganizmov.

Biotehnološka rešitev / priložnost

Novi pristopi združujejo:

- mikrobne pripravke (biognojila, biostimulante),
- analizo talnega mikrobioma (metagenomiko, funkcionalno profiliranje),
- senzorske tehnologije (merjenje talne vlage, temperature in stanja hranil),
- daljinsko zaznavanje (brezpilotni letalniki – UAV, vegetacijski indeksi, kot je NDVI),
- prostorske analize z uporabo geografskih informacijskih sistemov (GIS).

Te tehnologije omogočajo prepoznavanje prostorske variabilnosti, kartiranje okoljskih razmer, ki vplivajo na aktivnost mikroorganizmov, ter povezovanje bioloških in okoljskih podatkov. GIS pri tem predstavlja osrednjo platformo za opredelitev upravljavskih območij, kjer je mogoče mikrobne pripravke uporabljati učinkoviteje. Takšna integracija predstavlja osnovo sistemov Smart-MIP (ang. Microbial-and Sensor-Based Integrated Precision), ki podpirajo ciljno usmerjeno in prilagodljivo upravljanje kmetijske pridelave.

Primer uporabe

Na koruznem polju je prisotna izrazita prostorska variabilnost:

- na višje ležečih delih pobočja so tla bolj izpostavljena suši in vsebujejo manj organske snovi,
- v nižje ležečih delih je talna vlaga večja, hkrati pa obstaja večje tveganje za zastajanje vode.

Na podlagi podatkov o tleh (pH, organska snov, razpoložljivost hranil), senzorskih meritev (talna vlaga) in kazalnikov daljinskega zaznavanja (NDVI) se kmetijska površina razdeli na upravljavska območja. Mikrobni pripravek (npr. *Azospirillum* ali *Methylobacterium symbioticum*) se nato uporabi ciljno, le na izbranih upravljavskih območjih:

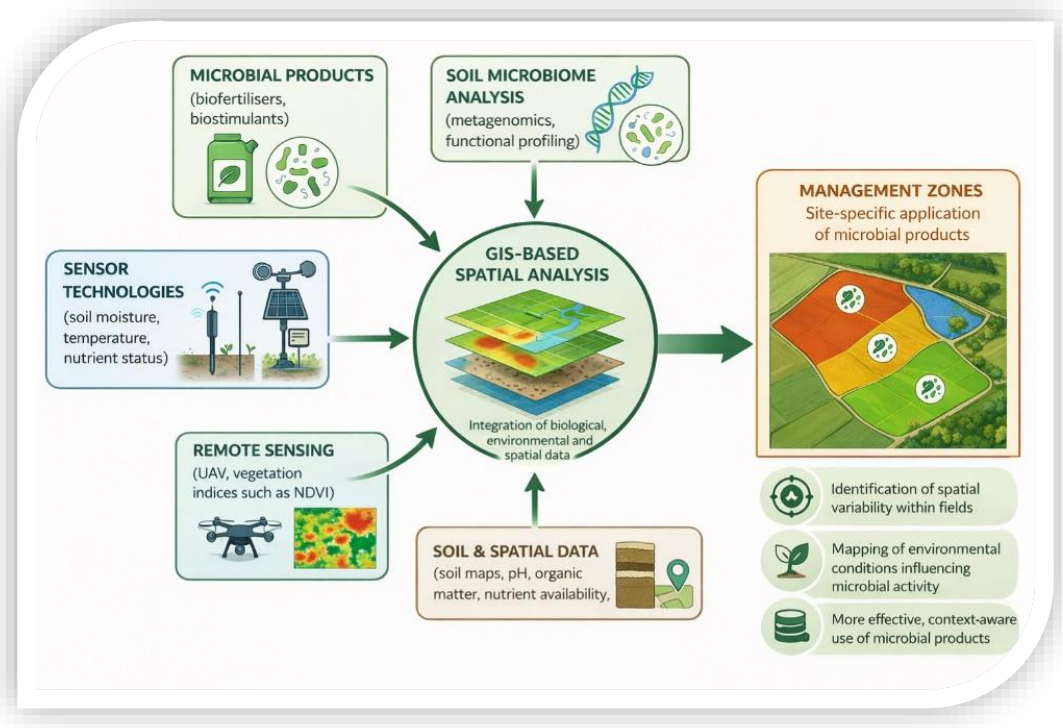
- na območjih, kjer so rastline izpostavljene stresnim razmeram in je njihova rast omejena,
- na območjih, kjer talne razmere omogočajo učinkovite koristne interakcije med rastlinami in

mikroorganizmi,
- z nanosom v tla ali na liste v ustreznih razvojnih fazah rastlin.

Na drugih upravljavskih območjih se lahko uporaba mikrobnega pripravka zmanjša ali opusti.

Študija primera 18: Vprašanja za kritični razmislek

- Zakaj se učinkovitost mikrobnih pripravkov razlikuje med posameznimi deli iste kmetijske površine? Kateri talni in okoljski dejavniki imajo pri tem najpomembnejšo vlogo?
- Kako lahko prostorski podatki (npr. lastnosti tal, NDVI, talna vlaga) pomagajo pojasniti razlike v odzivu posevkov na uporabo mikrobnih pripravkov?
- Katere prednosti ima ciljno usmerjena uporaba mikrobnih pripravkov v primerjavi z enakomerno uporabo na celotni površini?
- Katere tehnologije združujejo sistemi Smart-MIP in kako prispevajo k učinkovitejšemu odločanju v kmetijski pridelavi?
- Kako bi na podlagi predstavljenega primera določili upravljavska območja in opredelili, kje je uporaba mikrobnih pripravkov najbolj smiselna?
- Katere so glavne omejitve oziroma izzivi pri uvajanju takšnih pristopov v prakso (npr. stroški, dostopnost podatkov, strokovno znanje)?



Slika 27. Od podatkov do odločitve: ciljno usmerjena uporaba mikrobnih pripravkov.

Spodaj zapišite svoj razmislek:

3.2.5. Vključevanje rešitev, ki temeljijo na talnem mikrobiomu za podnebno pametno kmetijstvo

Talni mikrobiom je vse bolj prepoznan kot pomemben sestavni del podnebno pametnega kmetijstva. V tem poglavju je bilo prikazano, da mikroorganizmi pomembno prispevajo h kroženju hranil, prehrani rastlin, odpornosti na stres, delovanju tal ter splošni odpornosti agroekosistemov. Njihov pomen se odraža ne le v naravnih interakcijah med rastlinami in tlemi, temveč tudi v vse širši uporabi mikrobnih pripravkov, kot so biofertilizatorji, biostimulanti in mikrobni konzorciji.

Hkrati poglavje poudarja, da rešitev, ki temeljijo na talnem mikrobiomu, ni mogoče obravnavati ali uporabljati ločeno od drugih dejavnikov. Njihova učinkovitost je odvisna od medsebojnega delovanja mikroorganizmov, rastlin, talnih razmer in načinov gospodarjenja, na te interakcije pa dodatno vplivata prostorska in časovna variabilnost znotraj kmetijskih površin ter širše krajine. Zato bo prihodnji razvoj pristopov, ki temeljijo na talnem mikrobiomu, vse bolj temeljil na povezovanju biološkega znanja s prostorskimi analizami, spremljanjem podatkov v realnem času in digitalnimi sistemi za podporo odločanju.

V tem okviru GIS, senzorske tehnologije, daljinsko zaznavanje, spremljanje na podlagi interneta stvari (IoT), umetna inteligenca in orodja preciznega kmetijstva odpirajo nove možnosti za učinkovitejše povezovanje mikrobnih procesov z razmerami na terenu. Skupaj z napredkom na področju analiz talnega mikrobioma in razvoja ciljno usmerjenih mikrobnih pripravkov te tehnologije omogočajo prehod od enotne uporabe kmetijskih vložkov k bolj prostorsko prilagojenemu in podatkovno podprtemu upravljanju pridelave.

Na splošno največji potencial rešitev, ki temeljijo na talnem mikrobiomu, ni v popolni zamenjavi konvencionalnih kmetijskih vložkov, temveč v prispevku k učinkovitejšim, prilagodljivejšim in trajnostnim sistemom kmetijske pridelave. Integrirani pristopi, kot je Smart-MIP, ponazarjajo to usmeritev, saj združujejo mikrobne pripravke, okoljske podatke in digitalna orodja v enoten okvir za podporo podnebno pametni kmetijski pridelavi.

Moji zapiski:

3.3. Inovativno delo študentov

Predlogo uporabite za načrtovanje in dokumentiranje poskusa, vključno z izborom rastlinskega materiala, mikrobnega proizvoda, stresnih razmer, zasnove poskusa in meritev.

BIOSHIELD – ŠTUDENTSKI PROJEKT

PRENOS INOVACIJ V PRAKSO

Vrednotenje učinkovitosti mikrobnih proizvodov v razmerah podnebnega stresa

Študenti boste zasnovali in izvedli manjši poskus, s katerim boste ovrednotili učinkovitost komercialnega mikrobnega proizvoda (ali več njih) v pridelavi rastlin v specifičnih stresnih okoljskih razmerah (npr. suša ali zastajanje vode), ki odražajo izzive podnebnih sprememb v kmetijstvu.

KORAK 1: DEFINIRANJE SISTEMA

- Laboratorijski poskus, poskus v rastni komori, rastlinjaku, lončni ali poljski poskus?
- Izberite rastlinsko vrsto in ustrezno sorto(-e) (po možnosti s kratkim rastnim ciklom).
- Izberite enega ali več komercialnih mikrobnih proizvodov, dostopnih na lokalnem trgu.
- Določite razvojno fazo oziroma faze rastlin, ki jih boste spremljali (npr. kalitev, zgodnja vegetativna rast ali določeno rastno obdobje).

KORAK 2: DEFINIRANJE RAZISKOVALNEGA PROBLEMA

- Opredelite dejavnik podnebnega stresa (npr. suša, zastajanje vode).
- Postavite raziskovalno vprašanje.
- Opredelite pričakovani vpliv stresa na rast in uspešnost rasti rastlin.

KORAK 3: DEFINIRANJE V POSKUS VKLJUČENIH DEJAVNIKOV

- Izberite glavne proučevane dejavnike v poskusu.
- Določite ravni posameznega dejavnika (npr. odmerek, način aplikacije, intenzivnost stresa).
- Opredelite obravnavanja, vključno z ustreznimi kontrolami.
- Izračunajte skupno število poskusnih enot oziroma potrebno število rastlin.

KORAK 4: DEFINIRANJE RAZISKOVALNEGA VPRAŠANJA(VPRAŠANJ) IN POSTAVITEV HIPOTEZE (HIPOTEZ)

- Na podlagi raziskovalnega vprašanja oziroma vprašanj oblikujte jasne in preverljive hipoteze.

KORAK 5: NAČRTOVANJE IN POSTAVITEV POSKUSA

- Določite zasnovo poskusa in število ponovitev.
- Opredelite, kdaj in kako dolgo bodo rastline rasle v stresnih razmerah.
- Opišite, kako boste stres vzdrževali in ga spremljali.
- Določite, kaj boste merili, na kakšen način in kdaj (načrt meritev).
- Pripravite načrt za del Materiali in metode dela.
- Načrt preglejte sovrstniki (študenti druge skupine), pregleda naj ga tudi mentor ali strokovnjak. Po potrebi ga ustrezno dopolnite.

KORAK 6: IZVEDBA POSKUSA

- Izvedite načrtovana obravnavanja in vzdržujte eksperimentalne razmere.
- Skladno z načrtom zvedite meritve.
- Sistematično beležite opazovanja in podatke.

KORAK 7: ANALIZA DOBLJENIH PODATKOV

- Izračunajte relevantne parametre ali kazalnike (npr. povečanje biomase, razmerje korenina:nadzemni del, kazalniki odziva na stres).
- Izvedite osnovno statistično analizo (če je primerno).
- Organizirajte rezultate (preglednice, grafikoni, slike).
- Glede na raziskovalno vprašanje in postavljene hipoteze interpretirajte rezultate.

KORAK 8: PREDSTAVITEV REZULTATOV

- Pripravite pisno poročilo, poster ali predstavitev.
- Predstavite in razpravljajte o rezultatih s sovrstniki.
- Razmislite o omejitvah in možnih izboljšavah.
- Prilagodite način predstavitve različnim ciljnim skupinam (znanstvenikom vs. strokovnjakom/kmetom).

Pričnete z natančno opredelitvijo eksperimentalnega sistema in pogojev v poskusu. Dobro zasnovan poskus je namreč ključnega pomena za pridobitev smiselnih rezultatov.



Slika 28. Opredelitev ključnih elementov v poskusu

V poskus vključene rastline: vrsta(-e) in sorta(-e); utemeljitev izbire

Mikrobni proizvod(i): komercialno ime, mikrobni sev(i), formulacija, priporočeni odmerek, način in čas uporabe (v skladu z navodili proizvajalca)

Stresni dejavnik (okoljski): vrsta stresa (npr. suša, zastajanje vode), čas pojava stresa (razvojna faza / dnevi po setvi ali vzniku), trajanje stresa

Lastnosti uporabljenih nativnih tal/substrata: *npr. mesto jemanja tal v naravi, fizikalne in kemijske lastnosti tal oz. substrata ...*

Dejavniki v poskusu: katere dejavnike boste proučevali *(npr. odmerek, način aplikacije, stres) in katere ravni*

posameznega dejavnika boste vključili v poskus (npr. 0, priporočeni, povečan odmerek)? Ali boste kot kontrolo uporabili nesterilizirana ali avtoklavirana tla/substrat? Določite število obravnavanj in ponovitev na obravnavanje, opredelite poskusne enote (npr. lonci, setveni platoji, parcele), število rastlin na enoto ter način označevanja enot (za zmanjšanje pristranskosti) …

Način beleženja podatkov: zvezek, preglednica, tablica, aplikacija

Časovni potek: ključni koraki (setev, aplikacija, stres, meritve, žetev)

Opombe ob pregledu: povratne informacije sovrstnikov, mentorja ali strokovnjaka

Izberite zgolj tiste meritve, ki vam pomagajo odgovoriti na raziskovalno vprašanje. Vnaprej določite, kaj, kako in kdaj boste merili, ter zagotovite doslednost med meritvami vseh obravnavanj. Podatke beležite sistematično in vnaprej načrtujte, kako boste rezultate analizirali in predstavili.

Spodaj navedene meritve in analize so primeri pogosto uporabljenih parametrov in osnovnih pristopov; prilagodite jih vašemu specifičnemu načrtu poskusa in raziskovalnim ciljem.



Slika 29. Razmislek o meritvah in analizi rezultatov

Preglednica 7. Meritve in analiza podatkov

Meritve			
Kaj?	Zakaj?	Metoda/naprava	Kdaj?
Kalitev in druge razvojne faze po BBCH skali	(Zgodnji) odziv rastline	Štetje, ocenjevanje deleža	Glede na razvoj rastline (v dnevih po setvi)
Višina rastlin	Kazalnik rasti	Ravnilo, meter	V določenih intervalih
Število listov	Določanje razvojne faze	Štetje	V določenih intervalih
Dolžina korenin	Razvoj korenin	Analiza/meritve na fotografiji	Končno vrednotenje
Sveža biomasa	Odziv rastline	Tehtanje	Končno vrednotenje (tudi prej)
Suha biomasa (pri določeni vlagi)	Stabilna mera biomase (med obravnavanji primerljiva)	Sušenje + tehtanje	Končno vrednotenje (tudi prej)
Vizualni simptomi stresa	Odziv rastline na stres	Ocenjevalna lestvica/fotografije	Med stresnim obdobjem
Klorofil (SPAD) Meritve fotosinteze (+ respiracije v tleh)	Fiziološko stanje rastline	SPAD-meter, Prenosni sistem za merjenje fotosinteze	V določenih intervalih
Talna vlaga	Spremljanje stresa	Senzorski merilnik, gravimetrična metoda	V rednih intervalih
Izračuni, analize			
Izračunani parametri, indeksi	Npr. povečanje biomase, razmerje korenina:nadzemni del, indeks tolerance na stres		
Organizacija podatkov	Preglednice (npr. v Excelu)		
Statistični program	Npr. SPSS, SAS, R, Excel, Jamovi		
Statistične metode	Npr. test homogenosti varianc, test normalnosti porazdelitve, t-test, ANOVA, testi mnogoterih primerjav (angl.: multiple range/post hoc tests)		
Grafična predstavitev	Stolpični diagram, črtni grafikon, diagram kvartilov ali škatlja z brki (angl.; boxplot/box-and-whisker plot)		
Ključni rezultati	Glavne ugotovitve		
Interpretacija	Kaj rezultati pomenijo?		

3.4. Zaključek

Poglavje pojasnjuje, kako lahko talni mikrobiom prispeva k podnebno pametni pridelavi rastlin in trajnostnemu upravljanju krajine. Kmetijstvo se sooča z vse večjimi pritiski zaradi rasti prebivalstva, lakote, omejenih obdelovalnih površin, degradacije tal, urbanizacije in podnebnih sprememb. Sodobna pridelava je močno odvisna tudi od uporabe sintetičnih gnojil, čeprav rastline izkoristijo le del dodanih hranil. Preostanek se lahko izgubi v okolje, kar prispeva k emisijam toplogrednih plinov, onesnaževanju voda, evtrofikaciji in nadaljnji degradaciji tal.

Kot enega izmed odgovorov na te izzive poglavje predstavlja rešitve, ki temeljijo na mikrobiomu. Mednje sodijo biognojila, biostimulanti in mikrobni konzorciji, ki podpirajo naravne interakcije med rastlinami in mikroorganizmi. Pri tem je uporabljen koncept rastlinskega holobionta, v katerem rastlina in z njo povezani mikroorganizmi delujejo kot povezan sistem. Ti mikroorganizmi se pojavljajo v tleh, rizosferi, na površini korenin, v notranjih rastlinskih tkivih ter na nadzemnih delih rastlin, kjer vplivajo na prehranjenost rastlin, rast, zdravje in odpornost na stres.

Talni mikrobiom opravlja številne ključne funkcije v agroekosistemih. Mikroorganizmi sodelujejo pri kroženju hranil, razgradnji organske snovi, biološki vezavi dušika, mobilizaciji fosforja, zatiranju bolezni, oblikovanju strukture tal, skladiščenju ogljika ter uravnavanju emisij toplogrednih plinov. Koristne skupine mikroorganizmov, zlasti bakterije, ki spodbujajo rast rastlin (Plant growth-promoting bacteria, PGPB), in arbuskularne mikorizne glive, lahko izboljšajo dostopnost hranil, razvoj korenin, privzem vode, rodovitnost tal in odpornost pridelkov.

Poglavje predstavlja tudi več primerov uporabe mikroorganizmov v praksi. Mikroorganizmi, ki vežejo dušik, pretvarjajo atmosferski dušik v rastlinam dostopne oblike. Simbiotske bakterije, kot sta *Rhizobium* in *Bradyrhizobium*, so posebej pomembne za metuljnice, medtem ko lahko *Azotobacter*, *Azospirillum*, endofitske bakterije in bakterije na listni površini podpirajo rast drugih kmetijskih rastlin. Arbuskularne mikorizne glive izboljšujejo privzem fosforja in drugih hranil, prispevajo k agregaciji tal ter povečujejo odpornost rastlin na sušo, slanost, težke kovine in nekatere talne patogene. Mikrobni konzorciji, med katere sodijo tudi efektivni mikroorganizmi (EM), združujejo več skupin mikroorganizmov in se uporabljajo pri kompostiranju, čiščenju odpadnih voda, obdelavi blata, bioremediaciji, v živinorejskih sistemih in rastlinski pridelavi. Kljub temu mikrobni pripravki niso univerzalna rešitev. Njihova učinkovitost je odvisna od mikrobnega seva, rastlinske vrste, lastnosti tal, podnebnih razmer, razpoložljivosti hranil, avtohtonih mikrobnih združb, formulacije, skladiščenja in načina uporabe. Različne formulacije, kot so trdne, tekoče, kapsulirane, suhe, emulzije in nanoformulacije, vplivajo na stabilnost proizvoda, rok uporabnosti, način uporabe in učinkovitost. Zato je treba trditve o učinkovitosti takšnih proizvodov vedno kritično preverjati s kontroliranimi in poljskimi preizkusi ter ustreznimi meritvami.

Poglavje povezuje talni mikrobiom tudi z geografskimi informacijskimi sistemi (GIS) in digitalnimi tehnologijami. Mikrobne združbe v tleh oblikujejo številni prostorsko spremenljivi dejavniki, kot so pH tal, vlaga, temperatura, vsebnost organskega ogljika, hranila, vegetacija, raba zemljišč in relief. GIS omogoča povezovanje podnebnih podatkov, pedoloških kart, satelitskih posnetkov, indeksov NDVI, podatkov o pokrovnosti tal in digitalnih modelov reliefa za prepoznavanje okolij, ki so ugodna za delovanje mikroorganizmov ali interakcije med rastlinami in mikrobi. Analize s tehtanim prekrivanjem slojev (weighted overlay analysis) ter sistemi Smart-MIP omogočajo bolj ciljno uporabo mikrobnih pripravkov z združevanjem podatkov o mikrobnih proizvodih, analiz talnega mikrobioma, senzorjev, daljinskega zaznavanja, GIS-orodij in podatkovno podprtih odločitev. Poglavje tako kaže, da ima talni mikrobiom velik potencial za razvoj podnebno pametnega kmetijstva. Njegova uspešna uporaba pa zahteva dobro poznavanje bioloških procesov, prostorske analize, eksperimentalno preverjanje in kritično vrednotenje rezultatov.

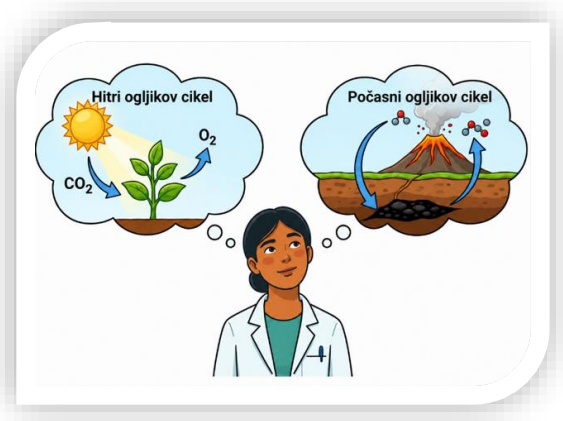
Poglavje 4: Biotehnologija za zajem in izrabo ogljika

4.1. Uvod: Strateška integracija bioloških znanosti pri blaženju podnebnih sprememb

Potek razvoja v 21. stoletju zaznamuje nujna potreba po ponovnem uravnoteženju globalnega ogljikovega cikla. Kumulativno kopičenje antropogenih toplogrednih plinov (TGP) je povzročilo podnebno krizo in ta zahteva celovit odziv, ki presega tradicionalno delitev med zmanjševanjem emisij in prilagajanjem. Čeprav razogljičenje energetskega in prometnega sektorja ostaja ključna prioriteta, je Medvladni odbor za podnebne spremembe (IPCC) jasno pokazal, da ti ukrepi sami po sebi ne zadoščajo za omejitev globalnega segrevanja na 1,5 °C ali celo 2 °C v primerjavi predindustrijsko ravnjo (Masson-Delmotte in sod., 2018). Za doseganje ciljev Pariškega sporazuma bo moralo človeštvo aktivno odstranjevati gigatone ogljikovega dioksida (CO_2) iz ozračja – proces, znan kot odstranjevanje ogljikovega dioksida (Carbon Dioxide Removal, CDR) oziroma »negativne emisije«.

Zgodovinsko gledano so v razpravah o zajemanju ogljika prevladovale geološke in inženirske rešitve, kot sta neposredno zajemanje iz zraka (Direct Air Capture, DAC) in zajemanje ter shranjevanje ogljika na mestu nastanka emisij (Carbon Capture and Storage, CCS). Omenjene tehnologije, čeprav ključne, pogosto obravnavajo ogljik kot odpadni produkt, ki ga je treba shraniti v podzemnih rezervoarjih. Vzporedno tem pa se razvija nov, vse bolj napreden pristop: biotehnologija za zajemanje in izrabo ogljika (Bio-CCU). Ta pristop ogljik ne obravnava več kot odpadek, temveč kot temeljno biološko surovino – osnovni gradnik življenja, materialov in energije.

To poglavje predstavlja celovit izobraževalni vir za projekt Erasmus+ »Inovativne biotehnološke rešitve za blaženje podnebnih sprememb«. Namenjeno je študentom in pedagogom ter povezuje temeljna biološka načela z najsodobnejšimi aplikacijami na področju podnebnih sprememb. Obravnava, kako lahko biološke sisteme – od globokih koreninskih sistemov genetsko optimiziranih rastlin do presnovnih poti mikroskopskih cianobakterij – izkoristimo za vezavo ogljika iz ozračja in njegovo pretvorbo v stabilne, ekonomsko vredne oblike.



Slika 30. Konceptualna delitev ogljikovega cikla

Da bi razumeli potencial biotehnologije, moramo najprej razlikovati med dvema osnovnima konceptoma ogljikovega cikla:

- **Počasni ogljikov cikel:**
  poteka v geoloških časovnih okvirih (milijoni let). Ogljik kroži med kamninami, tlemi, oceanom in ozračjem

preko vulkanskih izbruhov, kemijskega preperevanja in nastajanja sedimentov. Fosilna goriva predstavljajo zalogo »počasnega« ogljika, ki je bil vezan za več sto milijonov let. Njihovo izgorevanje pa ta ogljik skoraj v

- **Hitri ogljikov cikel:**
  poteka v bioloških časovnih okvirih (leta do desetletja). Ogljik kroži med biosfero in ozračjem preko fotosinteze in dihanja. Rastline vežejo CO_2 v biomaso, ki se ob razgradnji ponovno sprosti v ozračje.

- **Biotehnološki izziv:**
  standardni biološki procesi so kratkoročno ogljično nevtralni; drevo raste (pri tem veže ogljik) in sčasoma odmre ter razpade (pri tem se ogljik ponovno sprosti). Cilj Bio-CCU je poseči v hitri ogljikov cikel ter podaljšati čas zadrževanja ogljika v biosferi ali ga pretvoriti v obstojnejše, težje razgradljive oblike, ki posnemajo stabilnost počasnega cikla. Z genskim in biotehnološkim pristopom lahko rastline usmerimo v tvorbo na razgradnjo odpornih biopolimerov, kot je suberin, ali pa z uporabo mikroorganizmov omogočimo vezavo ogljika v mineralni kalcit (t. i. biobeton). Na ta način biotehnologija učinkovito upočasnjuje vračanje ogljika v ozračje in prispeva k doseganju negativnih emisij.

4.2. Motor zajema: biokemijski mehanizmi fotosinteze

V središču vseh strategij Bio-CCU je fotosinteza – biološki proces, ki že več kot 2,4 milijarde let uravnava sestavo Zemljinega ozračja. Poglobljeno razumevanje tega mehanizma je temeljni pogoj za vsako biotehnološko intervencijo. Fotosinteza ni zgolj »rastline se hranijo s sončno svetlobo«, temveč zaporedje kompleksnih redoks reakcij, ki predstavljajo primarni vstop energije v biosfero.

4.2.1. Svetlobna faza: zajem energije

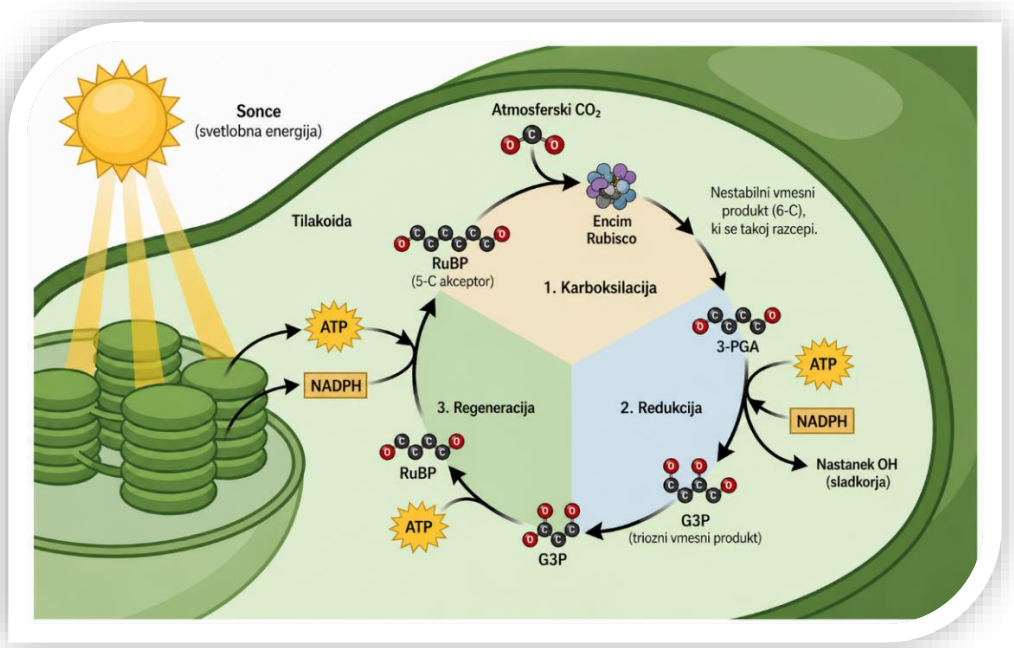
Proces se začne v tilakoidnih membranah kloroplasta, kjer se svetlobna energija pretvarja v kemijski potencial. Ta »svetlobno odvisna reakcija« predstavlja energijsko središče celice.

- **Fotosistem II (PSII) in fotoliza vode:** reakcija se prične, ko fotoni zadenejo antenski kompleks fotosistema II, pri čemer se elektroni vzbudijo in preidejo na višji energijski nivo.
- **Transport elektronov in sinteza ATP:** vzbujeni elektroni potujejo po prenašalni verigi elektronov (angl.: Electron Transport Chain – ETC) skozi kompleks citokroma b6f. Ta proces omogoča črpanje protonov v tilakoidni lumen. Nastali protonski gradient poganja encim ATP-sintazo, ki deluje kot molekularna turbina in sintetizira adenozin trifosfat (ATP).
- **Fotosistem I (PSI) in NADPH:** elektroni nato dosežejo fotosistem I, kjer jih dodatni fotoni ponovno vzbudijo. Ti visokoenergijski elektroni se za tem uporabijo za redukcijo $NADP^+$ v NADPH.

Biotehnološki vidik: učinkovitost opisanih svetlobnih reakcij je izjemno visoka; rastline z veliko natančnostjo izkoriščajo kvantno energijo. Omejitve pri vezavi ogljika le redko izvirajo iz tega dela procesa fotosinteze. Ozko grlo je skoraj vedno v nadaljnji porabi te kemijske energije v »temotnih reakcijah fotosinteze«.

4.2.2. Calvin-Bensonov cikel: motor vezave ogljika

Kemijska energija (ATP in NADPH), ki nastane v tilakoidih, se v stromi kloroplasta uporablja za vezavo atmosferskega CO_2 v organske molekule. Ta cikel, znan kot Calvin-Bensonov cikel (svetlobno neodvisne ali temotne reakcije fotosinteze), je glavni cilj biotehnoloških izboljšav.



Slika 31. Calvin-Bensonov cikel

Cikel poteka v treh jasno ločenih fazah:

1. **Karboksilacija:** encim **Rubisco** (ribuloze-1,5-bispfosfat karboksilaza/oksigenaza) katalizira vezavo molekule CO_2 na 5-C akceptor ribuloza-1,5-bisfosfat (RuBP). Pri tem nastane nestabilen 6-C vmesni produkt, ki se takoj razcepi na dve molekuli 3-fosfoglicerata (3-PGA).

2. **Redukcija:** ATP fosforilira 3-PGA, NADPH pa ga reducira, pri čemer nastane gliceraldehid-3-fosfat (G3P), enostaven triozni sladkor. Dejansko je ta triozni sladkor ogljikov hidrat, ki nastane pri fotosintezi.

3. **Regeneracija:** For the cycle to continue, the majority of the G3P molecules must be recycled and rearranged, consuming more ATP, to regenerate the RuBP acceptor. da se cikel lahko nadaljuje, se mora večina molekul G3P ponovno pretvoriti in preurediti, pri čemer se porablja dodatni ATP. S tem se regenerira akceptor atmosferskega ogljika – RuBP in se proces nadaljuje.

4.2.3. Paradoks Rubisca: evolucijske omejitve in priložnosti

Rubisco je v literaturi pogosto omenjen kot najbolj zastopana beljakovina na Zemlji, vendar je hkrati znan po svoji nizki učinkovitosti. Predstavlja glavni vstopni encim za ogljik v biosfero, vendar je njegova katalitska hitrost nizka (obdela le 3–10 molekul CO_2 na sekundo, medtem ko drugi encimi lahko obdelajo na tisoče molekul).

Še pomembneje je, da Rubisco nima visoke specifičnosti. Razvil se je v pradavni atmosferi, bogati s CO_2 in brez kisika (O_2). Zato njegovo aktivno mesto ne more zanesljivo razlikovati med ogljikovim dioksidom in kisikom. Ko Rubisco veže O_2 namesto CO_2, sproži proces fotorespiracije.

Cena fotorespiracije:

- Namesto nastanka dveh molekul 3-PGA (produktiven proces) povzroči reakcija oksigenacije nastanek ene molekule 3-PGA in ene molekule 2-fosfoglikolata (2-PG).
- 2-PG je za rastlino toksičen in ga mora reciklirati preko dolge in energijsko zahtevne poti, ki vključuje

peroksisom in mitohondrij.

- Ključno je, da se pri tem procesu recikliranja predhodno vezan CO_2 ponovno sprošča v ozračje, s čimer se izniči del učinka fotosinteze.
- Pri tipičnih C_3 rastlinah (npr. pšenica, riž, soja) lahko fotorespiracija zmanjša učinkovitost fotosinteze za 25–30 %, pri čemer se ta izguba z naraščajočo temperaturo še povečuje.

Preglednica 8. Primerjava učinkovitosti različnih poti fotosinteze

Značilnost	C3 fotosinteza	C4 fotosinteza	CAM fotosinteza
Primarni karboksilacijski encim	Rubisco	PEP karboksilaza (in nato Rubisco)	PEP karboksilaza (in nato Rubisco)
Fotorespiracija	Visoka (20–30 % izgub)	Zanemarljiva	Zanemarljiva
Učinkovitost izrabe vode (Water Use Efficiency, WUE)	Nizka	Srednja	Visoka
Tipične rastline	Pšenica, riž, drevesa, soja	Koruza, sladkorni trs, sirek	Kakteje, agave, ananas
Mehanizem	Neposredna vezava v mezofilu	Prostorska ločitev (Kranz anatomija mezofila s celicami žilnega ovoja – Bundle Sheath Cells)	Časovna ločitev (noč/dan)
Pomen za Bio-CCU	Cilj za izboljšanje (npr. obvodi fotorespiracije)	Model visoke učinkovitosti	Model za pridelavo v sušnih razmerah

4.3. Biotehnološke strategije za blaženje podnebnih sprememb z zajemom in izrabo ogljika (CCU)



Slika 32. Biotehnološke strategije za povečanje vezave ogljika

4.3.1. Napredna rastlinska biotehnologija za blaženje podnebnih sprememb

Zaradi omejitev naravne fotosinteze uporabljajo biotehnologi gensko inženirstvo in sintetično biologijo s katerima lahko povečajo sposobnosti rastlin za vezavo ogljika.

Raziskava se osredotoča na dve ključni področji: povečanje hitrosti vezave ogljika (moč vira – Source Strength) in izboljšanje trajnosti njegovega skladiščenja (moč ponora – Sink Strength).

4.3.1.1. Preoblikovanje fotosintetskih poti: »visokoučinkovite – "Turbocharged"« rastline

Raziskave se trenutno premikajo onkraj klasične selekcije in žlahtnjenja k natančnim genskim posegom, s katerimi želijo premagati omejitve encima Rubisco.

Obvod fotorespiracije:
znanstveniki razvijajo »obvode« oziroma alternativne presnovne poti v rastlinskih celicah. Te sintetične poti razgrajujejo toksični fosfoglikolat neposredno v kloroplastu, namesto da bi se ta prenašal v druge celične

organele. Pri tem se CO_2 sprošča v neposredni bližini encima Rubisco, kar učinkovito ustvarja lokalno »črpalko« CO_2 in zmanjšuje nadaljnjo oksigenacijo. Nedavne raziskave, ki vključujejo gene iz bakterij (*E. coli*) in buče (*Cucurbita*), so pri poljskih poskusih na tobaku pokazale povečanje biomase do 40 %.

Sintetični cikli vezave ogljika:
poleg optimizacije Calvinovega cikla razvijajo sintezni biologi povsem nove presnovne cikle, ki v naravi ne obstajajo. Eden takšnih je **CETCH cikel** (Crotonyl-CoA/Ethylmalonyl-CoA/Hydroxybutyryl-CoA), ki je bil sestavljen v *in vitro* pogojih z uporabo encimov iz bakterij, arhej in rastlin (Schwander in sod., 2016). Cikel temelji na encimih enojl-CoA karboksilazah/reduktazah (ECR), ki so bistveno hitrejši in bolj specifični karboksilacijski encimi kot Rubisco. Teoretično je cikel CETCH 2–3-krat energijsko učinkovitejši od Calvinovega cikla. Čeprav gre zaenkrat za dokaz koncepta v mikrobnih sistemih, predstavlja prenos takšnih ciklov v rastline dolgoročen »prebojni« cilj za obsežno razogljičenje.

4.3.1.1. Pobuda Harnessing Plants (HPI) inštituta Salk

Ena najvidnejših praktičnih aplikacij prej omenjenih ciljev in načel je pobuda HPI (Harnessing Plants Initiative) inštituta Salk, ki se ne osredotoča le na zajemanje ogljika, temveč tudi na njegovo dolgoročno zadrževanje v tleh. Ta pobuda predstavlja premik od »ogljično nevtralnega« kmetijstva k »ogljično negativnemu« kmetijstvu.

Fenotip »idealne rastline Salk«

Pobuda se osredotoča na tri ključne fenotipske lastnosti za povečanje sekvestracije ogljika:

1. **Globina korenin:** globlje korenine odlagajo ogljik v nižje plasti tal. V zgornjih plasteh tal je mikrobna aktivnost visoka, zato se ogljik tam hitro porablja in z respiracijo prehaja nazaj v ozračje. Globlje plasti tal so pogosto revne s kisikom, kar upočasni razgradnjo in podaljša čas zadrževanja ogljika, ki ga več ne merimo v letih temveč stoletjih.

2. **Masa korenin:** povečanje celotne količine koreninske biomase ustvarja večji fizični rezervoar za shranjevanje ogljika.

3. **Kemijska obstojnost (suberin):** je ključna biokemijska inovacija. Suberin je kompleksen biopolimer (poznan tudi kot pluta), prisoten v celičnih stenah rastlin. Gre za poliaromatski/polialifatski poliester, ki je zelo odporen na encimsko razgradnjo talnih mikroorganizmov. Z genskim povečanjem tvorbe suberina v koreninah rastline te v bistvu delujejo kot »ogljični zamaški«.

Genske tarče in prenos v pridelavo: pobuda HPI uporablja za prepoznavanje genov, odgovornih za prej omenjene lastnosti, modelne rastline, kot sta *Arabidopsis thaliana* in *Lotus japonicus*, Takšen je na primer gen EXOCYST70A3, ki vpliva na arhitekturo in globino koreninskega sistema (Ogura in sod., 2019). Po eksperimentalni potrditvi se te lastnosti prenesejo v glavne kmetijske rastline, kot so koruza, soja, riž in pšenica, z uporabo metod CRISPR/Cas9 ali naprednega žlahtnjenja. Ta pristop izkorišča obsežnost globalnega kmetijstva – milijone hektarjev kmetijskih površin lahko pretvori v aktivna skladišča ogljika, ne da bi pri tem zmanjšal pridelek hrane.

4.3.1.3. Rizosfera in sekvestracija ogljika v tleh

Rastline ne delujejo same; obstajajo v simbiotskem odnosu s talnim mikrobiomom. Pomemben delež ogljika, vezanega pri fotosintezi (do 20–40 %), se izloča iz korenin v tla v obliki sladkorjev, aminokislin in organskih kislin. Ta »tekoča ogljikova pot« predstavlja vir energije za talne mikroorganizme.

Cilj biotehnologije je preoblikovati to interakcijo med rastlino in mikrobi (rizosfero). Z izbiro rastlinskih genotipov, ki izločajo specifične spojine, lahko znanstveniki spodbujajo razvoj mikrobnih združb, ki te izločke pretvarjajo v stabilni talni organski ogljik (SOC) ali mineralne karbonate, namesto da bi se ogljik ponovno sproščal v ozračje kot CO_2. Ta proces, znan kot »mikrobna ogljikova črpalka«, je ključen za dolgoročno sekvestracijo ogljika (Jiao in sod., 2010).

4.3.2. Mikrobni sistemi: alge in cianobakterije

Medtem ko veljajo rastline za glavni kopenski ponor ogljika, omogočajo vodni mikroorganizmi (mikroalge in cianobakterije) bistveno višje stopnje fotosinteze ter večjo prilagodljivost za industrijsko uporabo. Kljub temu da predstavljajo le majhen delež biomase, so odgovorni za približno 50 % globalne biološke vezave ogljika.

4.3.2.1. Visoko učinkoviti mehanizmi koncentriranja ogljika (Carbon Concentrating Mechanisms – CCM)

Za razliko od kopenskih rastlin so številne cianobakterije razvile kompleksne proteinske strukture, imenovane **karboksisomi**. Te poliedrične strukture vsebujejo encim Rubisco in ga učinkovito izolirajo pred kisikom. Posebni transportni sistemi aktivno črpajo bikarbonat v celico, ta pa nato vstopi v karboksisom, kjer se pretvori v CO_2. S tem nastane okolje, nasičeno s CO_2, ki omogoča, da Rubisco deluje z največjo učinkovitostjo in ob zanemarljivi fotorespiraciji.

Biotehnološka uporaba

- **Transgene rastline:** eden glavnih ciljev sodobnih raziskav je prenos genov za CCM iz bakterij (zlasti genov za proteinske ovojnice karboksisomov in transportne sisteme za bikarbonat) v kloroplaste C_3 kmetijskih rastlin. Če bo pristop uspešen, bi lahko bistveno povečal učinkovitost fotosinteze in potencialno povečal pridelek tudi do 60 %, hkrati pa zmanjšal porabo vode in dušika.

- **Industrijski fotobioreaktorji:** cianobakterije lahko, v visoki gostoti, gojimo v bioreaktorjih, kjer jih oskrbujemo z industrijskimi dimnimi plini. Ker prenašajo višje koncentracije CO_2 (do 10–15 %) kot rastline, so zelo primerne za zajemanje ogljika na mestu nastanka emisij, npr. v termoelektrarnah ali cementarnah.

4.3.2.2. Nedavna dognanja: sev "Chonkus" (UTEX 3222)

Raziskovanje ekstremnih okolij še naprej prinaša nove biološke rešitve. Nedavno so raziskovalci v vulkanskih izvirih v bližini otoka Vulcano v Italiji odkrili sev cianobakterij (UTEX 3222), ki so ga poimenovali »Chonkus«.

- **Značilnosti:** sev se je razvil v okolju z visokimi koncentracijami CO_2 in okolju z močnimi morskimi tokovi. Ima dve ključni lastnosti za industrijsko uporabo: hitro rast pri visokih koncentracijah ogljika in visoko gostoto celic, zaradi katere hitro potone v vodi.

- **Rešitev za pobiranje biomase:** ena glavnih ekonomskih omejitev zajemanja ogljika z algami je energijska zahtevnost »odvodnje« (ločevanja mikroskopskih alg od vode), ki običajno zahteva energijsko intenzivno centrifugiranje. Naravna sposobnost usedanja seva »Chonkus« omogoča pobiranje z uporabo gravitacije, kar bistveno zmanjša porabo energije in izboljša ekonomsko upravičenost procesa.

- **Uporabnost:** tako pridobljeno biomaso lahko posušimo in trajno shranimo (sekvestracija ogljika) ali pa jo predelamo v biogoriva, bioplastiko ali krmo, s čimer prispevamo k krožnemu gospodarjenju z ogljikom.

4.3.3. Izraba ogljika v grajenem okolju (stavbe in infrastruktura)

Pri prehodu od bioloških mehanizmov k praktični uporabi predstavlja grajeno okolje novo področje razvoja za Bio-CCU. Ta sektor vključuje vključevanje živih sistemov v arhitekturo in gradbene materiale, s čimer se stavbe iz virov emisij ogljika preoblikujejo v ponore ogljika.

4.3.3.1. Biobeton in bakterijska mineralizacija

Proizvodnja betona je odgovorna za približno 8 % globalnih emisij CO_2. Biotehnologija ponuja rešitev v obliki mikrobno inducirane precipitacije kalcita (MICP) (DeJong in sod., 2006).

Mehanizem:
MICP temelji na ureolitičnih bakterijah, kot sta *Sporosarcina pasteurii* ali *Bacillus sphaericus*. Te bakterije proizvajajo encim ureazo, ki katalizira hidrolizo sečnine.

1. **Hidroliza sečnine (uree):** encim razgradi sečnino na amonij in karbamat. Slednji se spontano razgradi v amonijak in ogljikovo kislino.

2. **Povišanje pH:** molekule amonijaka vežejo protone in tvorijo amonij ter hidroksidne ione, kar povzroči znatno povišanje lokalnega pH oziroma alkalnost medija.

3. **Obarjanje (precipitacija):** v okolju z visokim pH se kopičijo karbonatni ioni. Ob prisotnosti topnih kalcijevih ionov pride do obarjanja kalcijevega karbonata ($CaCO_3$). Celična stena bakterij pogosto deluje kot mesto nukleacije za nastanek kristalov.

Uporabnost:

- **Biocement:** podjetja, kot je npr. Biomason, uporabljajo ta proces za izdelavo cementnih plošč in opek pri sobni temperaturi. S tem se izognejo žganju portlandskega cementa (ki zahteva temperature okoli 1450 °C), kar bistveno zmanjša porabo energije in omogoča vezavo ogljika v mineralni strukturi materiala.

- **Samopopravljivi ali samocelilni beton (angl.; Self-Healing Concrete):** spore bakterij in hranila (npr. kalcijev laktat) se vgradijo v betonsko mešanico. Spore lahko ostanejo neaktivne več desetletij. Ko pride do razpok, voda aktivira bakterije, ki začnejo presnavljati substrat in obarjati kalcit. Ta »biološka malta« zapolni razpoke, obnovi strukturno integriteto in prepreči korozijo armature, s čimer se podaljša življenjska doba konstrukcije in zmanjša ogljični odtis, ki bi nastal zaradi popravil.

4.3.3.2. Biofasade in arhitektura z mikroalgami

Običajne fasade stavb so pasivne površine, ki pogosto prispevajo k pojavu urbanih toplotnih otokov. Biofasade jih preoblikujejo v aktivne presnovne plasti.

Zasnova sistema:

Biofasade sestavljajo tanki, prozorni ploščati fotobioreaktorji (angl.; photobioreactors – PBR), nameščeni na zunanjost stavb. Skozi te panele kroži voda, ki vsebuje mikroalge.

- **Zajemanje ogljika:** alge absorbirajo sončno sevanje in CO_2 (ki se lahko dovaja tudi iz izpušnih plinov ogrevalnega sistema stavbe) ter vršijo fotosintezo.

- **Energetska učinkovitost:** gostota biomase zasenči stavbo in ustvarja dinamično izolacijsko plast, ki poleti zmanjšuje potrebe po hlajenju. Voda absorbira sončno toploto, ki jo lahko preko toplotnih izmenjevalnikov izkoristimo za pripravo tople vode.
- **Študija primera:** hiša BIQ (angl.: Bio-Intelligent Quotient) v Hamburgu v Nemčiji je bila prvi pilotni projekt, ki je v celoti implementiral opisano tehnologijo. Izkazalo se je, da lahko biofasade zajamejo bistveno več ogljika na kvadratni meter kot kopenske rastline, predvsem zaradi optimiziranih rastnih razmer in odsotnosti strukturne biomase, kot so stebla oziroma debla.

4.3.4. Študije primerov namenjene analizi študentov

Za podporo zahtevi po »analizi primerov« v okviru projekta Erasmus+ predstavlja naslednje poglavje tri konkretne primere, primerne za poglobljeno obravnavo v učnem procesu. Ti primeri povezujejo teoretična izhodišča s tržno realnostjo.

Študija primera 19: Zelene urbane rešitve – "CityTree"



Slika 33. "CityTree"

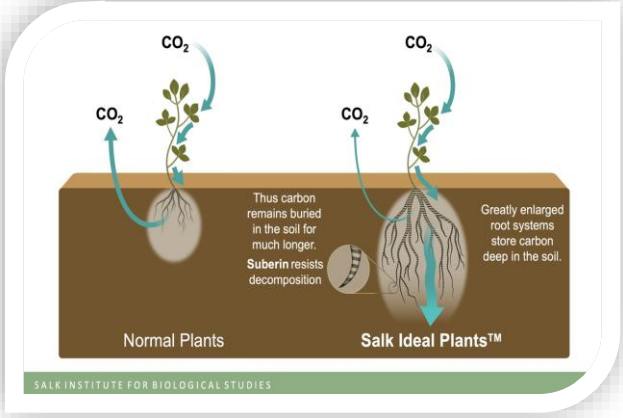
Izhodišče:
Biotehnološko zagonsko podjetje iz Nemčije, ki združuje tehnologijo interneta stvari (IoT) z gojenjem mahov za zmanjševanje onesnaženosti zraka in ravni ogljika v urbanem okolju.

Tehnologija:
»CityTree« je samostoječa, približno 4 m visoka, vertikalna stena poraščena z mahovi. Uporablja izbrane vrste mahov z zelo veliko površino za vezavo delcev in absorpcijo CO_2 ter vključuje avtomatiziran sistem namakanja, dodajanja hranil in senzorjev za ohranjanje optimalnega stanja mahov v zahtevnih urbanih razmerah.

Trditve:
podjetje navaja, da lahko ena enota zagotovi učinek čiščenja zraka, primerljiv z do 275 mestnimi drevesi, pri čemer filtrira drobne delce in hladi okolico z evapotranspiracijo.

Kritična analiza za študente:
- Preverjanje učinkovitosti: študenti naj poiščejo neodvisne podatke o vezavi ogljika pri mahovih v primerjavi z drevesi. Ali primerjava z »275 drevesi« temelji na filtraciji delcev ali na sekvestraciji ogljika? (običajno filtracija).
- Analiza življenjskega cikla (Lifecycle Analysis – LCA): Ali proizvodnja jeklene konstrukcije, plastičnih komponent in poraba električne energije za delovanje sistema izniči prihranke ogljika?
- Urbano načrtovanje: Kako se lahko takšna tehnološko podprta urbana infrastruktura primerja z zasaditvijo dejanskih mestnih gozdov z vidika biotske pestrosti, psiholoških koristi in zmanjševanja učinka toplotnega otoka?

Študija primera 20: Idealna rastlina Salk™ (z globokim koreninskim sistemom)



Slika 34. Primer uporabe genskega inženirstva za vezavo ogljika

Izhodišče:
Kot je predstavljeno v poglavju 4.3.2, gre za pristop k sekvestraciji ogljika z uporabo genskega inženirstva.

Ključni podatki:
Tla vsebujejo približno 2.500 giga ton ogljika, kar je približno trikrat več kot v ozračju. Pobuda »4 na 1000« predlaga, da bi lahko že povečanje zalog ogljika v tleh za 0,4 % na leto zaustavilo letno naraščanje koncentracije CO_2 v ozračju.

Vprašanja za študente:

- Obstojnost: raziščite kemijsko stabilnost suberina. Zakaj je obstojnejši od celuloze? (aromatski obroči v primerjavi z glukoznimi verigami).
- Kmetijska praksa: Kako sodobne kmetijske prakse (oranje v primerjavi z obdelavo brez pluga – *no-till*) vplivajo na stabilnost ogljika v globljih plasteh tal? Oranje poveča dostop kisika, kar pospeši mikrobno razgradnjo talnega organskega ogljika (SOC).

Študija primera 21: Steelanol projekt (Gent, Belgija)



Slika 35. Obrat za pretvorbo industrijskih odpadnih plinov, bogatih z ogljikom, v tekoče gorivo

Izhodišče:
vodilni evropski projekt, ki poteka v jeklarni ArcelorMittal v Gentu. Gre za prvi industrijski obrat v Evropi, ki pretvarja industrijske odpadne pline, bogate z ogljikom, v tekoče gorivo.

Izziv:
proizvodnja jekla ustvarja velike količine plavžnega plina, ki vsebuje CO in CO_2. Ta plin se tradicionalno odvaja in sežiga v bakelnih sistemih (angl.: flare systems), pri čemer se CO_2 neposredno sprošča v ozračje, brez ustvarjene dodane vrednosti.

Rezultat v praksi:
obrat, odprt leta 2022, ima zmogljivost proizvodnje 80 milijonov litrov tega trajnostno proizvedenega etanola letno. Produkt, tržen pod imenom »Steelanol«, se uporablja za mešanje z bencinom v prometu ali kot surovina za proizvodnjo trajnostnih plastik, pri čemer se letne emisije CO_2 zmanjšajo za približno 125.000 ton.



Slika 36. Razmislek o izzivih na obravnavanem področju

Odgovore zapišite spodaj

1.

2.

3.

4.3.5. Navodila za raziskovalno delo študentov: metode in protokoli

V tem poglavju je predstavljen nabor praktičnih orodij za študente, ki omogoča raziskovalni pristop »znanost kot poizvedovanje«. Opisano je, kako dostopati do podatkov, izvesti pregled literature ter načrtovati in varno izvajati ustrezno zasnovane in znanstveno utemeljene poskuse.

4.3.5.1. Dostop do podatkov o podnebju in njihova interpretacija

Da bo projekt znanstven, mora temeljiti na relevantnih podatkih. Študenti naj presežejo uporabo sekundarnih virov ter analizirajo primarne podnebne podatkovne nize. Preglednica 9 predstavlja primere primarnih virov podnebnih podatkov potrebnih za raziskovalno delo.



Slika 37. Razmislek o dostopu do podnebnih podatkov

Preglednica 9. Primarni viri podnebnih podatkov za raziskovalno delo študentov

Vir podatkov	Opis	Student Application
Helenska nacionalna meteorološka služba (HNMS) – Grčija http://www.hnms.gr	Uradna institucija, odgovorna za vremensko napovedovanje in spremljanje podnebja v Grčiji.	Študenti lahko analizirajo zgodovinske podnebne podatke za sredozemsko območje ter preučujejo vpliv toplotnega stresa na rastline (npr. oljke), kar se neposredno povezuje z inženiringom proteinov toplotnega šoka ((angl.: heat-shock protein –HSP), predstavljenim v poglavju o biotehnologiji.
Turška državna meteorološka služba https://www.mgm.gov.tr	Uradna institucija za spremljanje vremena in podnebja v Turčiji.	Študenti lahko dostopajo do dolgoročnih podatkov o temperaturi (TMAX/TMIN) in padavinah za različne regije Turčije ter analizirajo lokalne trende podnebnih sprememb. Te ugotovitve lahko povežejo z odpornostjo gensko izboljšanih rastlinskih genotipov (npr. toleranca na sušo, odpornost na škodljivce), obravnavanih v besedilu.
Ministrstvo za okolje, urbanizacijo in podnebne spremembe Turčije https://csb.gov.tr	Uradni portali z nacionalnimi akcijskimi načrti, evidencami emisij in podatki o okolju.	Študenti lahko analizirajo emisije toplogrednih plinov v Turčiji po sektorjjih in prepoznajo področja z največjim potencialom za uporabo Bio-CCU tehnologij (npr. biobeton ali algni bioreaktorji za industrijske odpadne pline).
Turški statistični urad (TÜİK) – okoljska statistika https://www.tuik.gov.tr/	Nacionalni statistični podatki o energiji, vodi, odpadkih in onesnaženju.	Vir omogoča razumevanje aktualnega ekonomskega konteksta po gospodarskih sektorjih, ki ga študenti potrebujejo za analizo potencialnih ekonomskih in okoljskih koristi uvedbe Bio-CCU tehnologij (npr. v kmetijstvu ali gradbeništvu).
Hrvaška meteorološka in hidrološka služba (DHMZ) – Hrvaška https://meteo.hr	Nacionalna institucija za meteorologijo, hidrologijo in spremljanje kakovosti zraka.	Študenti lahko primerjajo podnebne trende med jadransko in celinsko Hrvaško ter ocenijo, kako spremembe v padavinskih vzorcih vplivajo na biotsko pestrost in razpoložljivost vode, kar je pomembno z vidika uvedbe biotehnoloških rešitev.

Agencija Republike Slovenije za okolje (ARSO) – Slovenija https://www.arso.gov.si	Osrednja institucija za spremljanje okolja, narave in vodnih virov v Sloveniji.	Študentom so na voljo celoviti podatki za alpsko in submediteransko podnebno območje. Na tej osnovi lahko spremljajo dolgoročne spremembe temperature in vlažnosti tal ter predlagajo ustrezne, na podnebne spremembe odporne rastlinske vrste ali sorte.
NOAA NCEI (National Centers for Environmental Information – Nacionalni centri za okoljske informacije) https://www.ncei.noaa.gov/	Globalni zgodovinski vremenski in podnebni podatki.	Študenti lahko dostopajo do podatkov lokalnih meteoroloških postaj (GHCN-Daily) in analizirajo trende spreminjanja temperature (TMAX/TMIN) ali padavin v svoji Erasmus+ regiji za obdobje več kot 50 let.
NASA Earth Observations (NEO) https://neo.gsfc.nasa.gov/	Satelitski posnetki vegetacije (NDVI), ogljikovega monoksida in temperature.	Vir omogoča vizualizacijo globalnih vzorcev fotosinteze (»ozelenitev« – *green-up*) in jih je moč povezati s sezonskimi nihanji CO_2 (t. i. Keelingova krivulja).
GLOBE Observer https://observer.globe.gov/	Aplikacija državljanske znanosti za spremljanje okoljskih sprememb.	Študenti lahko z orodjem »Trees« merijo višino in obseg dreves ter prispevajo k umerjanju satelitskih podatkov za oceno biomase.
Interaktivni atlas IPCC https://interactive-atlas.ipcc.ch/	Orodja za regionalne podnebne projekcije (6. poročilo IPCC).	Študenti lahko raziskujejo prihodnje podnebne razmere za svojo državo glede na različne scenarije podnebnega segrevanja.
ESA Climate from Space https://cfs.climate.esa.int/index.html	Satelitsko pridobljene podnebne spremenljivke. (ECVs).	Študenti lahko uporabijo gradivo »Taking the Pulse of the Planet« in analizirajo spremembe v vlažnosti tal, pojavnosti požarov in pokrovnosti z vegetacijo v Evropi.

4.3.5.2. Iskanje in pregled znanstvene literature

Strukturiran pristop k pregledu literature je bistvenega pomena.



Slika 38. Razmislek o orodjih za pregled znanstvene literature

Orodja:

- **PubMed:** Primeren za področje biotehnologije in genetike. Za natančnejše iskanje uporabljajte izraze MeSH (*Medical Subject Headings*).

- **Google Učenjak:** uporabite funkcijo »napredno iskanje« za filtriranje po letih (npr. »od leta 2020 dalje«) in iskanje najnovejših raziskav o CRISPR ali algah.

Nekatere pomembne znanstvene revije s tega področja:

1. Global Change Biology

- **Vsebinski poudarek:** revija objavlja raziskave, ki prispevajo k razumevanju povezav med biološkimi sistemi in različnimi vidiki okoljskih sprememb (vključno s podnebnimi spremembami in povečevanjem koncentracije CO_2 v ozračju).
- **Pomen za študente:** revija je ključna za razumevanje, kako biotehnološki posegi (npr. izboljšana fotosinteza) vplivajo na globalni cikel ogljika in talne ekosisteme.
- **Spletna stran:** https://onlinelibrary.wiley.com/journal/13652486

2. Nature Climate Change

- **Vsebinski poudarek:** ena najuglednejših znanstvenih revij na področju podnebnih sprememb, ki obravnava tako fizikalne vidike kot tudi družbene in ekonomske posledice..
- **Pomen za študente:** odličen vir preglednih (*review*) člankov, ki obravnavajo potencial bioloških rešitev (npr. bioenergija z zajemanjem ogljika) na ravni globalnih politik.
- **Spletna stran:** https://www.nature.com/nclimate

3. Plant Biotechnology Journal

- **Vsebinski poudarek:** prostodostopna revija, ki objavlja pomembne raziskave na področju aplikativne botanike, molekularne biologije in genetike.
- **Pomen za študente:** revija je neposredno povezana s tem poglavjem. Študenti lahko najdejo tehnične podrobnosti o transgenih rastlinah, odpornih na sušo, presnovnem inženirstvu za vezavo ogljika ter uporabi rastlin kot »bio-tovarn«.
- **Spletna stran:** https://onlinelibrary.wiley.com/journal/14677652

4. Trends in Biotechnology (TIBTEC)

- **Vsebinski poudarek:** revija objavlja strnjene pregledne članke in strokovna mnenja o najnovejših trendih v biotehnologiji (ne primarnih znanstvenih podatkov).
- **Pomen za študente:** revija je zelo priporočljiva za razvoj projektnih idej. Članki so dostopni in obravnavajo napredne teme, kot so sintetična biologija za zajem ogljika in mikrobne celične tovarne.
- **Spletna stran:** https://www.cell.com/trends/biotechnology/home

5. Biotechnology for Biofuels and Bioproducts

- **Vsebinski poudarek:** revija se osredotoča na tehnološke in operativne vidike pretvorbe rastlinske

biomase in zajetega ogljika v goriva, kemikalije in materiale.

- **Pomen za študente:** ključno za razumevanje vidika »izrabe« (utilisation) v Bio-CCU. Ponuja vpogled v to, kako lahko ogljik, vezan v rastlinah, pretvorimo v ekonomsko vredne produkte (bioekonomija).
- **Spletna stran:** https://biotechnologyforbiofuels.biomedcentral.com

Strategija iskanja: študenti lahko uporabijo Boolove operatorje (AND, OR, NOT)

Primer: "cyanobacteria" AND "carbon capture" NOT "marine" (za osredotočenost na sladkovodne ali industrijske aplikacije). (to focus on freshwater or industrial applications).

Vodnik za branje (metoda treh prehodov):

Prehod 1: *preberite naslov, povzetek in zaključke. Opredelite »osrednje raziskovalno vprašanje«.*

Prehod 2: *analizirajte slike in preglednice. Ali vizualizacija podatkov podpira trditve iz povzetka? .*

Prehod 3: *preberite metodologijo in razpravo, da razumete podrobnosti in omejitve raziskave.*

Kritična presoja virov:

Učitelj usmerja študente pri razlikovanju med recenziranimi znanstvenimi revijami (primarni viri) ter sporočili za javnost ali novinarskimi članki (sekundarni viri).

Spodaj zapišite svoje ugotovitve:

4.3.6. Politični okvir in prihodnji razvoj

Razumevanje znanosti samo po sebi ni dovolj, če hkrati ne upoštevamo tudi političnega in ekonomskega konteksta. Evropska unija se je uveljavila kot globalna vodilna sila na področju zelenega prehoda, zato se pričakuje, da so tudi projekti Erasmus+ usklajeni s temi strateškimi cilji.

4.3.6.1. Kontekst Erasmus+: mladi in zeleni prehod

Evropski zeleni dogovor (*Green Deal*) si prizadeva, da bi Evropa do leta 2050 postala prva podnebno nevtralna celina. Uresničitev tega ambicioznega cilja je v veliki meri odvisna od bioekonomije – obnovljivega segmenta gospodarstva, ki temelji na rabi bioloških virov s kopnega in iz morja za proizvodnjo hrane, materialov in energije. Program Erasmus+ ima pri tem prehodu ključno vlogo, saj spodbuja razvoj »zelenih kompetenc« (*green skills*) in kritičnega mišljenja med evropsko mladino. To poglavje je usklajeno z okvirom Action for Climate Empowerment (ACE) v okviru UNFCCC, ki poudarja, da je izobraževanje ključno orodje za dosego obsežnih sprememb v družbenih in gospodarskih sistemih, potrebnih za trajnostni razvoj

Študenti pri obravnavi te vsebine niso zgolj pasivni udeleženci, temveč pridobivajo kompetence za aktivno sodelovanje pri uresničevanju ciljev Evropskega zelenega dogovora. Z analizo študij primerov in izvedbo raziskov na osnovi poizvedovanja razvijajo znanstveno pismenost, ki jim omogoča kritično presojo biotehnoloških rešitev ter razlikovanje med resničnimi inovacijami in »zelenim zavajanjem« (*greenwashing*).

4.3.6.2. Evropski zeleni dogovor in bioekonomija

Evropski zeleni dogovor predstavlja krovni politični načrt Evropske unije. Vključuje več strategij, ki so neposredno povezane z Bio-CCU:

- **Strategija za biotsko raznovrstnost do leta 2030:** vključuje zavezo za zasaditev 3 milijard dreves. Biotehnologija ima pri tem ključno vlogo – ne le pri sajenju, temveč predvsem pri izboru genotipov, odpornih na prihodnje podnebne razmere (toleranca na sušo, odpornost na škodljivce), kar zagotavlja njihovo preživetje do odraslosti.

- **Strategija bioekonomije:** osredotoča se na nadomeščanje materialov na osnovi fosilnih virov z materiali biološkega izvora. Ta »krožna bioekonomija« temelji na tehnologijah, obravnavanih v tem poglavju (npr. plastika iz alg, biobeton, lesena gradnja), z namenom zapiranja ogljikovega kroga. Cilj je zmanjšati odvisnost od neobnovljivih virov ter hkrati ustvarjati zelena delovna mesta.

- **Mehanizem za pravični prehod:** zagotavlja, da je prehod v zeleno gospodarstvo pravičen. Na primer, regije, odvisne od premoga, se lahko preoblikujejo v središča za proizvodnjo algne biomase ali bioenergije, pri čemer se izkoristijo obstoječa industrijska infrastruktura in znanje, ki ga imajo delavci.sile.

4.3.6.3. Vključevanje mladih: Action for Climate Empowerment (ACE)

Program Erasmus+ poudarja pomen demokratične participacije. Študenti naj razumejo, da njihovo raziskovalno delo prispeva k iniciativi Action for Climate Empowerment (ACE) v okviru Pariškega sporazuma. ACE, preko izobraževanja, usposabljanja in ozaveščanja javnosti. spodbuja opolnomočenje vseh članov družbe za aktivno delovanje na področju podnebnih sprememb.

Z ustvarjanjem lokalnih podatkov (npr. s spremljanjem fenologije v okviru državljanske znanosti ali z ocenami količine vezanega ogljika v drevesih) lahko skupine študentov prispevajo k lokalnim načrtom prilagajanja na podnebne spremembe ter tako premostijo vrzel med znanostjo v učilnici in dejanskimi politikami. Na ta način prehajajo iz vloge »študentov« v vlogo »državljanskih znanstvenikov«, ki aktivno spremljajo stanje planeta.

4.4. Scenariji inovacij in prihodnje podnebne projekcije

Pregled najnovejše znanstvene literature kaže jasno soglasje glede prihodnosti Bio-CCU: področje mora nujno preiti iz laboratorijskih »dokazov koncepta« (*proof-of-concept*) v razširljive, ekonomsko vzdržne industrijske sisteme. Za študente – raziskovalce na dodiplomski stopnji študija, priporoča literatura premik od zgolj prepoznavanja naravnih organizmov k njihovemu aktivnemu inženiringu z uporabo orodij sintetične biologije (npr. CRISPR/Cas9), z namenom povečanja fotosintetske učinkovitosti in odpornosti na stresne dejavnike (npr. visoke temperature ali onesnaževala). Poleg tega vrhunske znanstvene revije vse pogosteje poudarjajo, da zgolj biološki uspeh ni dovolj; prihodnji projekti morajo že od začetka vključevati tehno-ekonomsko analizo (TEA) in analizo življenjskega cikla (LCA). To pomeni, da mora biti predlagana rešitev ne le znanstveno inovativna, temveč tudi energetsko učinkovita in sposobna zagotoviti dejanski »ogljično negativen« učinek pri uvedbi v večjem obsegu. Nazadnje se kot ključna kompetenca prihodnjih biotehnologov izpostavlja povezovanje računalniške biologije in umetne inteligence za napovedovanje obnašanja encimov in presnovnih tokov.

Zapišite svoj razmislek o scenarijih inovacij:

4.5. Zaključek

Biotehnologija za zajemanje in izrabo ogljika predstavlja pomemben premik v pristopih k blaženju podnebnih sprememb, saj presega zgolj zmanjševanje emisij in omogoča aktivno odstranjevanje ogljika iz ozračja ter njegovo ponovno uporabo. Z izboljševanjem naravnih in načrtovanih bioloških sistemov, kot so napredni rastlinski fenotipi s povečano obstojnostjo korenin proti razgradnji, lahko vzpostavimo robustne vrednostne verige z negativno ogljično bilanco. Uspešna uvedba teh inovacij pa je v veliki meri odvisna od njihovega prenosa iz laboratorijskih prototipov v industrijsko in ekonomsko izvedljive rešitve. Prihodnji biotehnologi morajo zato povezovati orodja sintezne biologije s tehno-ekonomskimi analizami in ocenami življenjskega cikla, da bi zagotovili, da so razvite tehnologije hkrati okoljsko učinkovite in trajnostne. S sprejemanjem takšnega interdisciplinarnega pristopa bo naslednja generacija znanstvenikov lahko aktivno soustvarjala podnebne politike ter spodbujala globalni prehod v krožno, podnebno odporno bioekonomijo.

Poglavje 5: Biotehnologija za obnovo ekosistemov in blaženje podnebne krize

5.1. Na naravi temelječe rešitve za prilagajanje podnebnim spremembam

Podnebna kriza, onesnaževanje okolja in vse večji pritiski na naravne vire sodijo med najpomembnejše globalne izzive 21. stoletja (Horn, 2025). Ti procesi prispevajo k degradaciji ekosistemov, izgubi biotske raznovrstnosti ter poslabšanju kakovosti tal in vode, kar na koncu ogroža prehransko varnost in okoljsko trajnostnost (Gabric, 2023). Zaradi navedenega se povečuje potreba po inovativnih in trajnostnih pristopih, ki lahko podpirajo obnovo ekosistemov ter hkrati povečujejo njihovo odpornost na podnebne spremembe.

Biotehnologija ponuja širok nabor orodij, ki lahko prispevajo k varstvu okolja, obnovi ekosistemov in trajnostnemu upravljanju naravnih virov (Karavolias in sod., 2021). Za obnovo degradiranih okolij in izboljšanje delovanja ekosistemov se uporabljajo različne biotehnološke strategije. Fitoremediacija na primer uporablja rastline za odstranjevanje, stabilizacijo ali pretvorbo onesnaževal v tleh in vodi ter predstavlja okolju prijazno metodo sanacije onesnaženih območij (Subašić in sod., 2022). Poleg tega se lahko za spodbujanje rasti rastlin, izboljšanje privzema hranil in povečanje odpornosti rastlin proti abiotskim stresom, kot so suša, slanost in temperaturni ekstremi, uporabljajo koristni mikroorganizmi, vključno z bakterijami, ki spodbujajo rast rastlin (Petrić in sod., 2022). Pomembno vlogo pri izboljšanju kalitve semen, uspešnosti vzpostavljanja posevkov in rasti rastlin v neugodnih okoljskih razmerah imajo tudi tehnike predsetvene obdelave semen (*seed priming*) (Karalija in sod., 2024). Poleg tega so tehnike rastlinskih tkivnih kultur *in vitro* postale dragoceno orodje ne le za razmnoževanje rastlin, temveč tudi za varstvo okolja in obnovo ekosistemov (Sota in sod., 2025). Metode *in vitro* omogočajo hitro razmnoževanje rastlinskih vrst, vključno z ogroženimi, redkimi ali ekološko pomembnimi rastlinami, ki jih je mogoče pozneje ponovno vnesti v degradirane ali ogrožene habitate. Te tehnike podpirajo ohranjanje biotske raznovrstnosti in obnovo rastlinskih populacij ter tako prispevajo k okrevanju in stabilnosti ekosistemov.

Skupaj ti biotehnološki pristopi podpirajo tako sanacijo onesnaženih okolij kot tudi preprečevanje nadaljnje degradacije ekosistemov z izboljševanjem zdravja rastlin, rodovitnosti tal in odpornosti ekosistemov. S krepitvijo prilagoditvenih sposobnosti rastlin na okoljske strese in spodbujanjem trajnostnih praks upravljanja lahko biotehnologija odigra ključno vlogo pri blaženju posledic podnebnih sprememb ter podpiranju dolgoročne trajnostnosti ekosistemov.

5.1.1. Biotehnološki pristopi za obnovo ekosistemov in blaženje podnebne krize

5.1.1.1. Fitoremediacija

Fitoremediacija predstavlja okolju prijazen in stroškovno učinkovit biotehnološki pristop za obnovo onesnaženih ekosistemov. Ta metoda temelji na naravni sposobnosti določenih rastlinskih vrst, da absorbirajo, akumulirajo, stabilizirajo ali pretvarjajo onesnaževala, prisotna v tleh, vodi in sedimentih (Subašić in sod., 2022). Rastline, ki se uporabljajo pri fitoremediaciji, lahko odstranjujejo onesnaževala, kot so težke kovine, pesticidi, ogljikovodiki in druge strupene spojine, ter tako prispevajo k postopnemu okrevanju degradiranih okolij. Med različne mehanizme fitoremediacije sodijo fitoekstrakcija, fitostabilizacija, fitodegradacija in rizofiltracija, pri čemer je njihova uporaba odvisna od vrste onesnaževala in okoljskih razmer (Subašić in sod., 2022).

Poleg zmanjševanja stopnje onesnaženosti prispeva fitoremediacija k obnovi ekosistemov tudi z izboljšanjem strukture tal, povečanjem vsebnosti organske snovi ter spodbujanjem mikrobne aktivnosti v rizosferi (Wu in sod., 2022).

Vegetacijski pokrov, vzpostavljen med procesom sanacije, lahko prav tako preprečuje erozijo tal, povečuje vezavo ogljika in podpira ponovno vzpostavljanje lokalne biotske raznovrstnosti.

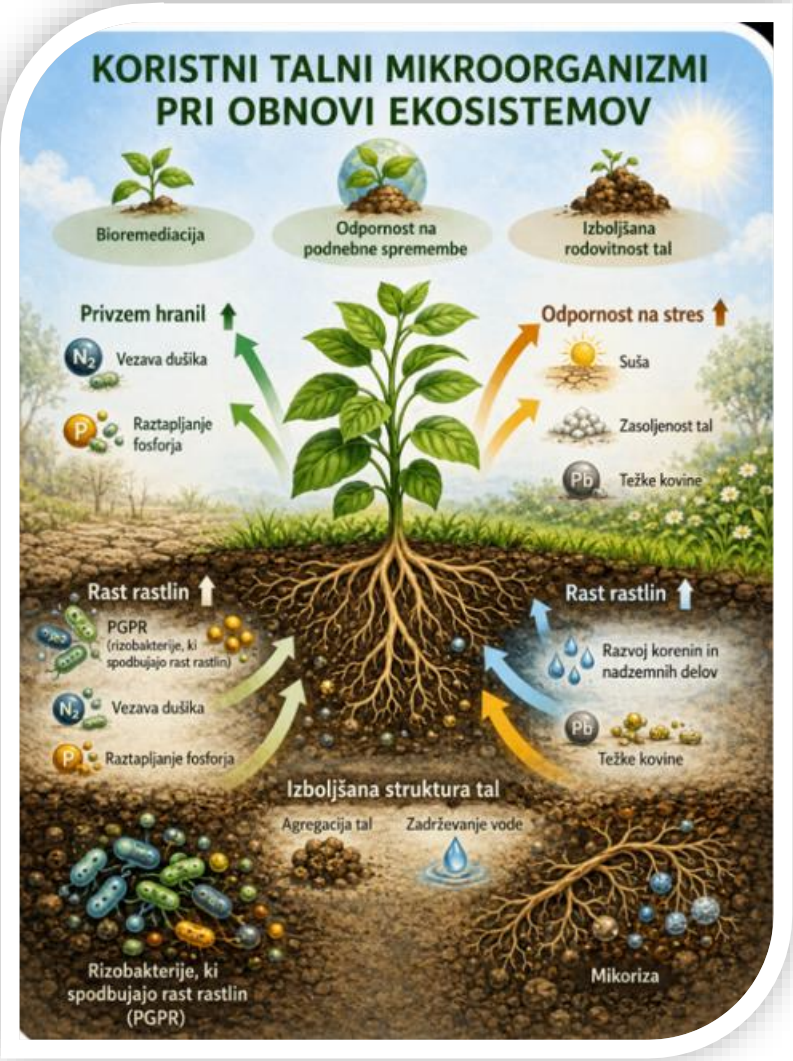
Zaradi teh številnih koristi je fitoremediacija vse bolj prepoznana kot trajnostna, na naravi temelječa rešitev, ki lahko pomembno prispeva tako k obnovi ekosistemov kot tudi k blaženju nekaterih posledic podnebne krize.



Slika 39. Shematski prikaz mehanizmov fitoremediacije in možnih prispevkov k blaženju podnebnih sprememb

5.1.1.2. Koristni talni mikroorganizmi

Uporaba koristnih talnih mikroorganizmov predstavlja še eno pomembno biotehnološko strategijo za obnovo ekosistemov in blaženje podnebne krize. Tla so kompleksen in dinamičen sistem, v katerem živijo raznolike mikrobne združbe, ki imajo ključno vlogo pri ohranjanju rodovitnosti tal, kroženju hranil in zdravju rastlin. Med temi mikroorganizmi so posebej pomembne rizobakterije, ki spodbujajo rast rastlin (Plant growth-promoting rhizobacteria, PGPR), saj so sposobne kolonizirati korenine rastlin in z njimi vzpostaviti obojestransko koristne odnose (Petrić in sod., 2022). Te bakterije spodbujajo rast rastlin, izboljšujejo kakovost tal ter povečujejo odpornost rastlin na okoljske strese, kot so suša, slanost in onesnaženost s težkimi kovinami.



Slika 40. Shematski prikaz mehanizmov delovanja koristnih mikroorganizmov in njihove potencialne vloge pri blaženju podnebnih sprememb

Koristni mikroorganizmi podpirajo razvoj rastlin preko več različnih mehanizmov. Številne bakterije proizvajajo fitohormone, kot je indol-3-ocetna kislina (IAA), ki spodbuja rast korenin in izboljšuje sposobnost rastlin za privzem vode in hranil iz tal.

Drugi mikroorganizmi povečujejo dostopnost hranil z vezavo zračnega dušika, raztapljanjem fosforja ali tvorbo sideroforov, ki izboljšujejo privzem železa.

Poleg tega nekatere bakterije proizvajajo encim ACC-deaminazo, ki zmanjšuje koncentracijo etilena, povezanega s stresom, in rastlinam pomaga ohranjati rast v neugodnih okoljskih razmerah (Senko in sod., 2024).

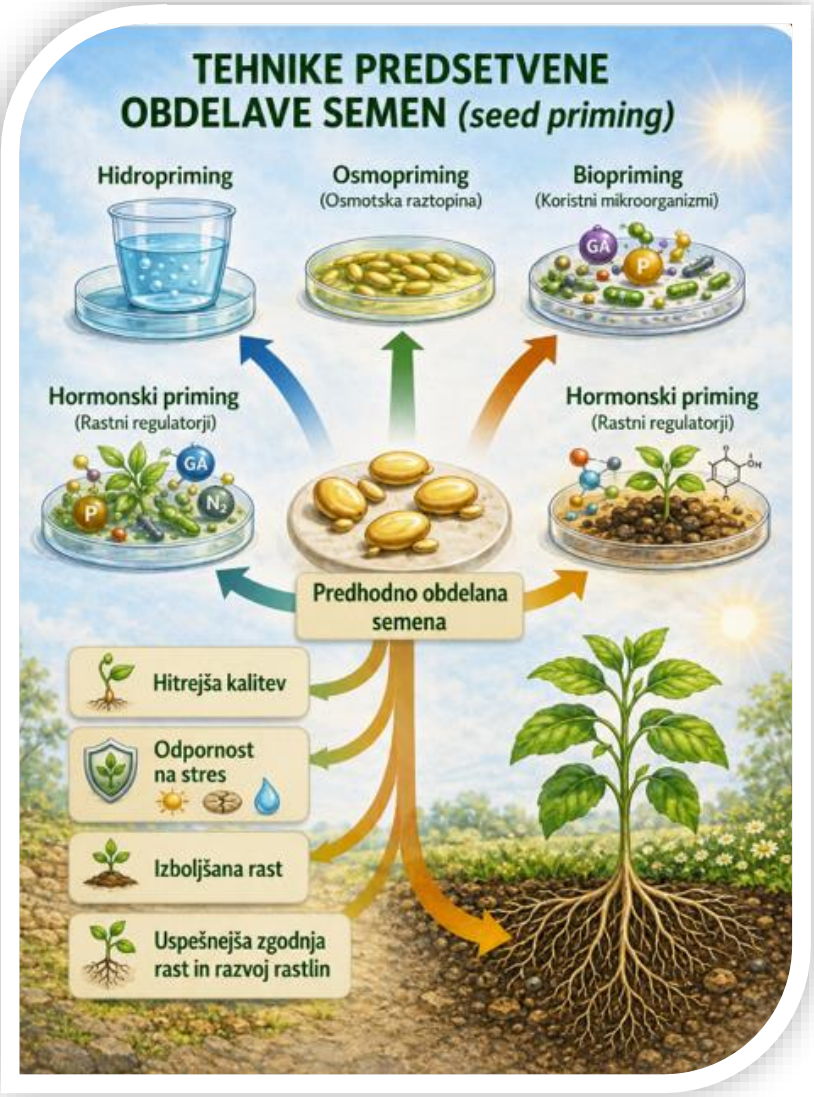
Poleg neposrednih učinkov na rastline koristni mikroorganizmi izboljšujejo tudi strukturo tal in delovanje ekosistemov (Chen in sod., 2024). Mnoge vrste tvorijo zunajcelične polimere in biofilme, ki prispevajo k stabilizaciji talnih agregatov, povečujejo poroznost tal in izboljšujejo zadrževanje vode v rizosferi. Te spremembe ustvarjajo ugodna mikrookolja za korenine rastlin in mikrobne združbe ter podpirajo uspešno rast rastlin in njihovo odpornost v degradiranih tleh ali na območjih, prizadetih zaradi suše.

Zaradi vsega naštetega se uporaba mikrobnih inokulantov in mikrobnih konzorcijev vse pogosteje vključuje v trajnostno kmetijstvo in obnovo ekosistemov. Koristni talni mikroorganizmi z izboljševanjem rodovitnosti tal, spodbujanjem rasti rastlin in povečevanjem odpornosti na okoljske strese prispevajo k obnovi degradiranih

ekosistemov ter pomagajo blažiti nekatere vplive podnebnih sprememb na kmetijske in naravne sisteme.

5.1.1.3. Seed Priming Techniques Tehnike predsetvene obdelave semen (seed priming)

Predsetvena obdelava semen (*seed priming*) je biotehnološki pristop, namenjen izboljšanju kalitve semen, vitalnosti sejancev in uspešnosti vzpostavljanja rastlin, zlasti v stresnih okoljskih razmerah. Metoda vključuje obdelavo semen pred setvijo s fizikalnimi, kemijskimi ali biološkimi agensi, s katerimi se predhodno aktivirajo presnovni procesi (slika 41 in slika 42). Tako semena po setvi kalijo hitreje in bolj enakomerno. Predsetvena obdelava semen je postala pomembno orodje pri obnovi ekosistemov, trajnostnem kmetijstvu in prilagajanju na podnebno krizo (Jatana in sod., 2024).



Slika 41. Shematski prikaz različnih tehnik predsetvene obdelave semen (*seed priming*) in njihovih pozitivnih učinkov na rast in razvoj rastlin

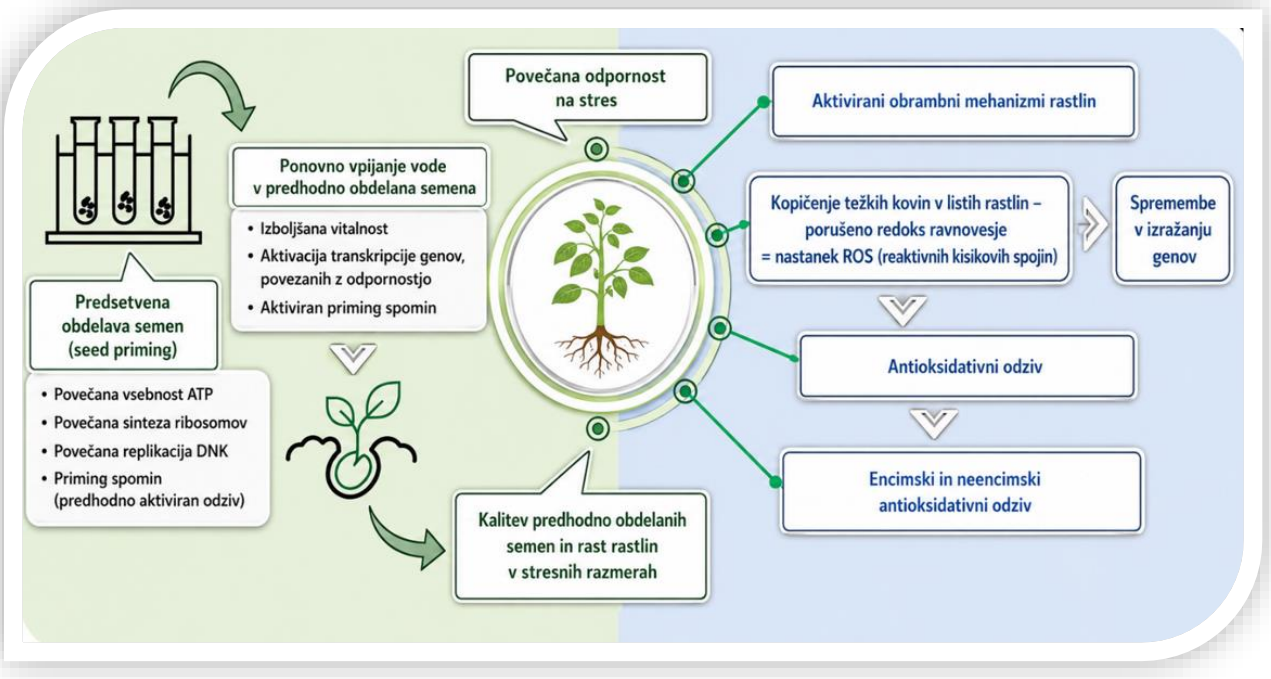
Poznamo več vrst tehnik predsetvene obdelave semen:

Hidropriming: semena za določen čas namakamo v vodi, s čimer se sproži predkalitvena presnovna aktivnost, ne da bi prišlo do izraščanja koreninice. Ta postopek izboljša kalivost in uspešnost vzpostavljanja rastlin v degradiranih ali suši izpostavljenih tleh.

Osmopriming: semena obdelamo z osmotskimi raztopinami, kot je polietilenglikol, ki uravnavajo privzem vode in izboljšujejo odpornost na slanost ali sušo. Tako obdelana semena pogosto izkazujejo večjo odpornost proti stresu in višjo stopnjo preživetja v zahtevnih okoljskih razmerah.

Biopriming: semena obdelamo s koristnimi mikroorganizmi, kot so bakterije ali glive, ki spodbujajo rast rastlin. Metoda izboljša kalitev in rast rastlin, povečuje privzem hranil ter krepi odpornost proti patogenom in abiotskim stresom.

Hormonski priming: semena izpostavimo rastnim regulatorjem, kot so giberelini ali citokinini, ki aktivirajo specifične presnovne poti in izboljšujejo vitalnost sejancev zlasti v manj ugodnih okoljskih razmerah.



Slika 42. Shematski prikaz predsetvene obdelave semen (*seed priming*) ter njenih učinkov na povečanje odpornosti rastlin na stres (Karalija in sod., 2022).

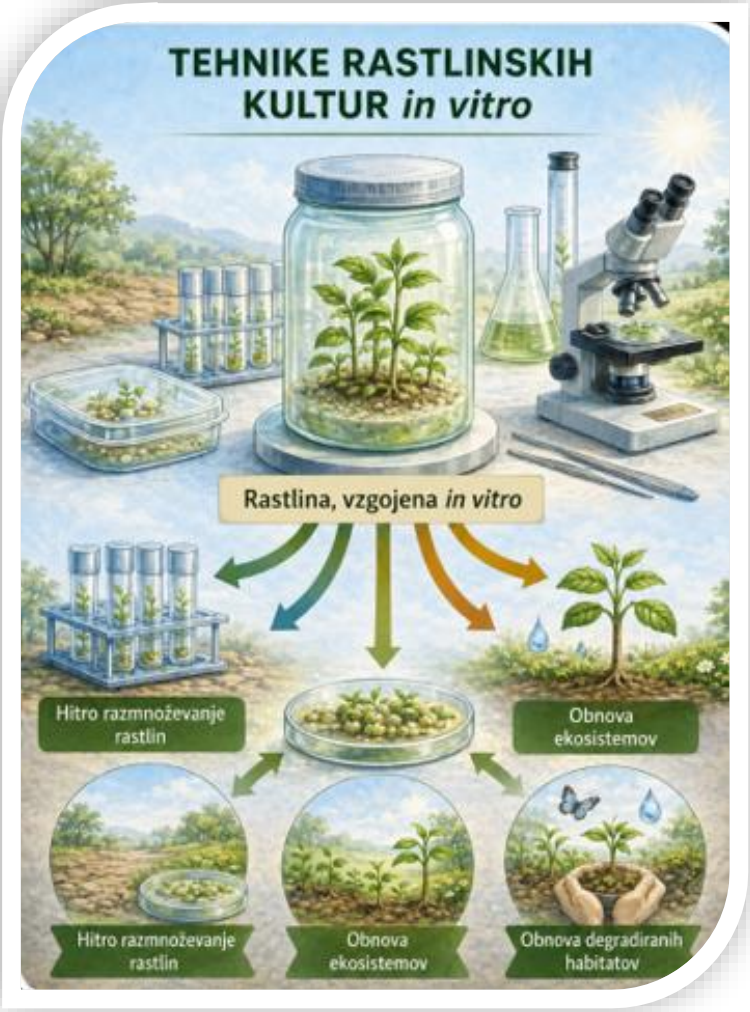
Tehnike predsetvene obdelave semen so bile uspešno uporabljene tako v kmetijstvu kot tudi pri projektih obnove ekosistemov. Predhodno obdelana semena vrst, odpornih na sušo, se lahko na primer uporabljajo za ponovno ozelenitev degradiranih območij, izboljšanje stabilizacije tal in pospeševanje obnove ekosistemov. S spodbujanjem zgodnje rasti rastlin predsetvena obdelava semen povečuje verjetnost preživetja sejancev v stresnih razmerah, kot so suša, slanost in nizka rodovitnost tal, ki zaradi podnebnih sprememb postajajo vse pogostejše (Karalija in sod., 2024, 2026). Predsetvena obdelava semen se lahko uporablja tudi za povečanje učinkovitosti drugih biotehnoloških pristopov. Tako lahko na primer predhodno obdelane rastline izkazujejo večjo sposobnost fitoremediacije onesnaženih tal (Karalija in sod., 2022).

Na splošno predstavlja predsetvena obdelava semen stroškovno učinkovito in praktično strategijo za izboljšanje uspešnosti rasti rastlin, spodbujanje trajnostnega upravljanja zemljišč ter krepitev odpornosti ekosistemov na okoljske izzive.

5.1.1.4. Tehnike rastlinskih tkivnih kultur in vitro

Tehnike rastlinskih tkivnih kultur *in vitro*, znane tudi kot tkivne kulture, so napredne biotehnološke metode, ki se uporabljajo za razmnoževanje rastlin v nadzorovanih laboratorijskih razmerah (Yancheva in Kondakova, 2018). Metode vključujejo gojenje rastlinskih celic, tkiv ali organov na hranilnih gojiščih ob natančnem nadzoru svetlobe, temperature in rastnih regulatorjev (slika 43). Kulture *in vitro* so postale pomembno orodje ne le za

hitro razmnoževanje rastlin, temveč tudi za obnovo ekosistemov, ohranjanje ogroženih vrst in sanacijo degradiranih habitatov.



Slika 43. Možnosti uporabe rastlinskih kultur *in vitro* za blaženje posledic podnebnih sprememb

Ena glavnih prednosti tehnik *in vitro* je možnost pridelave velikega števila genetsko enakih in zdravih rastlin (brez bolezni) v razmeroma kratkem času. To je še posebej pomembno pri redkih, ogroženih ali počasi rastočih rastlinskih vrstah, ki jih je s konvencionalnimi metodami težko razmnoževati. Primer kalusne kulture ginka (*Ginkgo biloba* L.) je prikazan na sliki 44. Pri obnovi ekosistemov razmnoževanje *in vitro* omogoča pridobivanje zadostnih količin rastlinskega materiala za ponovno naselitev degradiranih območij, s čimer prispeva k obnovi vegetacijskega pokrova, stabilizaciji tal in ohranjanju lokalne biotske raznovrstnosti.



Slika 44. Rastna komora za gojenje rastlinskih kultur *in vitro* (levo) in primer kalusne kulture ginka (*G. biloba*) (desno)

V programih obnove ekosistemov se pogosto uporabljajo različni pristopi rastlinskih tkivnih kultur *in vitro*:

Mikropropagacija: *razmnoževanje poganjkov ali rastlinic iz majhnih eksplantatov za pridobivanje velikega števila genetsko enakih rastlin, namenjenih ponovni naselitvi naravnih habitatov.*

Somatska embriogeneza: *tvorba zarodkov iz somatskih (nespolnih) celic, ki omogoča množično razmnoževanje ter razvoj na stres odpornih ali genetsko izboljšanih sort rastlin.*

Kalusna kultura in organogeneza: *regeneracija celotnih rastlin iz nediferenciranega tkiva (kalusa) ali posameznih organov, kar omogoča pridobivanje rastlin iz poškodovanega ali omejeno dostopnega rastlinskega materiala.*

Krioprezervacija: *Ddolgoročno shranjevanje rastlinskih tkiv ali semen pri ultra nizkih temperaturah, ki je ključnega pomena za ohranjanje genske raznovrstnosti in varovanje ogroženih vrst za prihodnje aktivnosti obnove ekosistemov.*

Poleg obnove ekosistemov podpirajo tehnike kultur *in vitro* tudi raziskave odzivov rastlin na okoljske strese, saj znanstvenikom omogočajo izbor ali razvoj sort z večjo odpornostjo na sušo, slanost in onesnaževala. S pridelavo odpornega rastlinskega materiala ter omogočanjem ponovne naselitve ekološko pomembnih vrst imajo rastlinske kulture *in vitro* ključno vlogo pri obnovi ekosistemov, ohranjanju biotske raznovrstnosti in blaženju vplivov podnebnih sprememb.

5.2. Scenariji inovacij in prihodnje podnebne projekcije

Pričakujmo, da bodo podnebne spremembe povečale pogostost in intenzivnost ekstremnih vremenskih pojavov, kot so poplave, suše, erozija tal, zasoljevanje in vročinski valovi. Za pripravo na te izzive lahko študenti raziskujejo inovativne biotehnološke strategije, ki povečujejo odpornost ekosistemov, preprečujejo degradacijo okolja in blažijo posledice podnebno pogojenih nesreč. S povezovanjem posameznih biotehnoloških metod s potencialnimi podnebnimi tveganji lahko razvijajo praktične in ustvarjalne rešitve z možnostjo uporabe v resničnem okolju.

Zmanjševanje poplavne ogroženosti

Pristopi: fitoremediacija in biotehnologija rastlin ter koreninskega sistema

Utemeljitev: rastline z globokim koreninskim sistemom in hitro rastjo lahko stabilizirajo rečne brežine, mokrišča in poplavne ravnice ter tako zmanjšujejo erozijo tal in površinski odtok vode. Uporaba mikrobnih konzorcijev, ki spodbujajo rast korenin, lahko dodatno izboljša uspešnost vzpostavljanja vegetacije in utrjevanje tal.

Aktivnost za študente: oblikujte eksperimentalni načrt obnove območja ogroženega zaradi poplav za pospešitev ponovne vzpostavitve vegetacijskega pokrova- Pri tem uporabite kombinacijo avtohtonih rastlinskih vrst, mikrobnih inokulantov in sadik, razmnoženih *in vitro*.

Spodaj opišite svoj načrt:

Stabilizacija tal in preprečevanje erozije

Pristopi: biotehnologija tal, ki temelji na mikrobnih konzorcijih, bioloških stabilizatorjih tal in predsetveni obdelavi semen (*seed priming*)

Utemeljitev: koristni mikroorganizmi lahko krepijo stabilnost talnih agregatov, povečajo vsebnost organske snovi in izboljšajo zadrževanje vode v tleh, s čimer zmanjšujejo občutljivost tal za erozijo. Predsetvena obdelava semen omogoča uspešnejše vzpostavljanje rastlin v degradiranih ali nestabilnih tleh. Biološki stabilizatorji tal (npr. mikrobni polisaharidi) lahko dodatno izboljšajo povezanost talnih delcev in povečajo stabilnost tal.

Aktivnost za študente: raziščite, kako lahko mikrobni konzorciji in predhodno obdelana semena prispevajo k obnovi degradiranih pobočij, kmetijskih teras ali urbanih zelenih površin, ki so izpostavljene eroziji.

Spodaj zapišite rezultate svoje raziskave:

Odpornost na sušo in slanost tal

Pristopi: predsetvena obdelava semen (*seed priming*), razmnoževanje na sušo odpornih vrst *in vitro* ter uporaba bakterij, ki spodbujajo rast rastlin.

Utemeljitev: predhodno obdelana semena kalijo hitreje in razvijejo močnejše sejance tudi v razmerah omejene razpoložljivosti vode. Mikroorganizmi lahko izboljšajo privzem hranil in povečajo odpornost rastlin na stres, medtem ko rastline, razmnožene *in vitro*, omogočajo ponovno naselitev redkih ali posebej odpornih vrst.

Aktivnost za študente: predlagajte poskus obnove vegetacije na sušnih ali zasoljenih območjih, pri katerem preizkusite različne kombinacije predhodno obdelanih semen, mikrobnih inokulantov in rastlin, vzgojenih s pomočjo tkivnih kultur.

Spodaj opišite predlog svojega poskusa:

Onesnažena ali degradirana območja

Pristopi: fitoremediacija in mikrobno podprta remediacija

Utemeljitev: rastline v kombinaciji s koristnimi mikroorganizmi lahko iz tal odstranjujejo ali stabilizirajo težke kovine, ogljikovodike in druga onesnaževala ter tako postopoma obnavljajo kakovost in funkcionalnost tal.

Aktivnost za študente: načrtujte projekt bioremediacije za opuščeno industrijsko ali rudarsko območje z uporabo hiperakumulacijskih rastlin in izbranih mikrobnih sevov.

Spodaj predstavite zasnovo svojega bioremediacijskega projekta:

Integrirane strategije za hkratno obvladovanje več tveganj ("Multi-Hazard" strategies)

Predlog: kombinirate lahko več metod za obravnavo prekrivajočih se podnebnih tveganj. Tako lahko na primer uporabite rastline, razmnožene *in vitro*, skupaj z mikrobnimi konzorciji za stabilizacijo tal na poplavno ogroženih območjih in hkratno povečanje odpornosti na sušo. Druga možnost je kombiniranje fitoremediacije z biološkimi stabilizatorji tal na onesnaženih območjih, ki so hkrati izpostavljena eroziji.

Aktivnost za študente: razvijte scenarije obnove ekosistemov na podlagi predvidenih prihodnjih podnebnih razmer ter ocenite, katera kombinacija metod zagotavlja največjo odpornost ekosistemov ob hkratnem delovanju več stresnih dejavnikov.

Spodaj predstavite svoj scenarij oziroma načrt obnove ekosistema:

5.3. Študije primerov namenjene analizi študentov

Študija Primera 22: Remediacija težkih kovin s sončnico

Strategija: na tleh, onesnaženih s težkimi kovinami, kot sta svinec in kadmij, je bila uporabljena sončnica (*Helianthus annuus* L.). Zaradi velike proizvodnje biomase in izrazite sposobnosti akumulacije težkih kovin je bila vključena v več zaporednih ciklov pridelave za postopno odstranjevanje onesnaževal iz tal. Proces so podpirali osnovni ukrepi upravljanja tal, namenjeni spodbujanju rasti rastlin in privzema kovin.

Rezultati: sčasoma je bilo doseženo opazno zmanjšanje koncentracij težkih kovin v zgornjem sloju tal. Poleg tega so bile ugotovljene izboljšave biološke aktivnosti in strukture tal, kar kaže na postopno obnovo ekosistema. Popolna sanacija območja je zahtevala več rastnih sezon.

Pomen raziskave: pristop se je izkazal kot stroškovno učinkovita in okoljsko trajnostna rešitev za sanacijo onesnaženih zemljišč. Zmanjšal je ekološka tveganja in tveganja za zdravje ljudi ter omogočil potencialno ponovno uporabo prej degradiranih območij za kmetijsko pridelavo ali ekološko obnovo.

Študija primera 23: Uporaba PGPR za izboljšanje odpornosti na sušo

Strategija: V kmetijskih sistemih, izpostavljenih suši, so bile na semena in v tla aplicirane rizobakterije, ki spodbujajo rast rastlin (Plant growth-promoting rhizobacteria, PGPR). Izbrane so bile zaradi svoje sposobnosti spodbujanja razvoja korenin, izboljšanja dostopnosti hranil ter uravnavanja odzivov rastlin na stres s pomočjo tvorbe fitohormonov in delovanja encimov.

Rezultati: pri rastlinah, obravnavanih s PGPR, so bili ugotovljeni: bolj razviti koreninski sistem, učinkovitejša raba vode in večja biomasa v sušnih razmerah v primerjavi z rastlinami kjer semena oz. tla niso bila tretirana. Izboljšala se je tudi kakovost tal zaradi povečane mikrobne aktivnosti in učinkovitejšega kroženja hranil.

Pomen raziskave: uporaba koristnih mikroorganizmov je prispevala k večji odpornosti kmetijske pridelave na podnebne spremembe, saj je zmanjšala izgube pridelka zaradi sušnega stresa. Hkrati je podprla trajnostnejše kmetijske prakse z zmanjšanjem odvisnosti od kemičnih sredstev ter izboljšanjem dolgoročne rodovitnosti in zdravja tal.

Študija primera 24: Predsetvena obdelava semen (seed priming) za uspešnejšo rast rastlin v zasoljenih tleh

Strategija: semena so bila pred setvijo v zasoljena tla podvržena osmoprimingu z uporabo osmotskih raztopin. Takšna obdelava je sprožila zgodnje presnovne procese, ne da bi prišlo do dokončanja kalitve, in semena pripravila na hitrejše ter bolj enakomerno vznikanje v stresnih razmerah.

Rezultati: predhodno obdelana semena so izkazala hitrejšo kalitev, večjo vitalnost sejancev in boljšo odpornost na slanost v tleh. Rastline so se uspešneje formirale in v zgodnjih razvojnih fazah dosegle boljšo rast v primerjavi z neobdelanimi kontrolnimi rastlinami.

Pomen raziskave: predsetvena obdelava semen se je izkazala kot preprosta in stroškovno učinkovita metoda za izboljšanje vzpostavljanja posevkov v manj ugodnih okoljskih razmerah. Prispeva k prilagajanju na vse večje zasoljevanje tal zaradi podnebnih sprememb ter podpira stabilno kmetijsko pridelavo na ranljivih območjih.

Študija primera 25: Mikropropagacija za obnovo degradiranih gozdnih ekosistemov

Strategija: avtohtone in ekološko pomembne drevesne vrste so bile razmnožene s tehnikami kultur *in vitro*, da bi pridobili veliko število enotnih in zdravih rastlin. Rastline so bile nato postopoma prilagojene zunanjim razmeram (aklimatizirane) in presajene na degradirana gozdna območja, potrebna obnove.

Rezultati: na terenu so bile ugotovljene visoke stopnje preživetja in enakomerna rast rastlin, zlasti v zgodnjih fazah njihove rasti in razvoja. Razpoložljivost velikih količin sadilnega materiala je omogočila učinkovito izvajanje obsežnejših programov pogozdovanja.

Pomen raziskave: razmnoževanje *in vitro* je podprlo obnovo degradiranih ekosistemov s pospeševanjem obnove vegetacije in izboljšanjem ohranjanja biotske raznovrstnosti. Hkrati je prispevalo k blaženju podnebnih sprememb s povečanjem proizvodnje biomase, izboljšanjem vezave ogljika ter dolgoročno stabilizacijo ekosistemov.

Spodaj zapišite razmislek o predstavljenih študijah primerov:

5.4. Zaključek

Biotehnologija ponuja zmogljiv in vse pomembnejši nabor orodij za soočanje z degradacijo ekosistemov in vse hitrejšimi posledicami podnebne krize. Pristopi, predstavljeni v tem poglavju – od fitoremediacije in uporabe koristnih talnih mikroorganizmov do predsetvene obdelave semen ter rastlinskih kultur *in vitro* – prikazujejo, kako lahko biološke sisteme uporabimo za obnovo ekološkega ravnovesja in krepitev odpornosti tako naravnih kot tudi upravljanih ekosistemov.

Skupna značilnost opisanih metod je, da temeljijo na sodelovanju z naravnimi procesi in ne na njihovem preoblikovanju ali nadomeščanju. Fitoremediacija predstavlja trajnosten način odstranjevanja ali stabilizacije okoljskih onesnaževal, medtem ko koristni talni mikroorganizmi podpirajo zdravje rastlin, rodovitnost tal in kroženje ogljika. Tehnike predsetvene obdelave semen izboljšujejo uspešnost kalitve in odpornost rastlin na stres ter tako ponujajo praktične rešitve za kmetijsko pridelavo v spreminjajočih se podnebnih razmerah. Rastlinske kulture *in vitro* pa omogočajo hitro razmnoževanje rastlin, ohranjanje genskih virov ter razvoj sort, odpornih na različne okoljske strese.

Čeprav je vsak od predstavljenih pristopov učinkovit sam po sebi, predstavlja njihova kombinirana uporaba posebej obetavno strategijo za obsežno obnovo ekosistemov in blaženje podnebnih sprememb. Nadaljnji razvoj biotehnologije bo skupaj z interdisciplinarnim sodelovanjem ključnega pomena za optimizacijo teh orodij in zagotavljanje njihove odgovorne uporabe.

Biotehnologija navsezadnje ne nadomešča prizadevanj za obnovo ekosistemov, temveč jih krepi z zagotavljanjem inovativnih, prilagodljivih in razširljivih rešitev za bolj odporno in trajnostno prihodnost.

Poglavje 6: Inovacije, podjetništvo in karierne poti v biotehnologiji, usmerjeni v blaženje podnebnih sprememb

6.1. Podnebne inovacije in biotehnološko podjetništvo

Podnebne spremembe niso več oddaljen ali abstrakten problem. Predstavljajo izziv, s katerim se bodo današnji študenti biotehnologije neposredno srečevali v svojem poklicnem življenju. Biotehnologija ponuja zmogljiva orodja za reševanje problemov, povezanih s podnebnimi spremembami, od zmanjševanja industrijskih emisij do razvoja trajnostnih materialov in učinkovitejše rabe virov. Podnebne inovacije pomenijo razumevanje, kako lahko znanstveno znanje pretvorimo v praktične rešitve, ki odgovarjajo na dejanske potrebe okolja. Pri tem ne gre zgolj za odkrivanje novih tehnologij, temveč tudi za razumevanje, kje in kako lahko te tehnologije prispevajo k pomembnim in dolgoročnim pozitivnim spremembam.

6.1.1. Kako se kmetijska biotehnologija obravnava v Grčiji, na Hrvaškem, v Sloveniji in Turčiji

V Grčiji se kmetijsko podjetništvo, vključno z nastajajočimi področji, kot je kmetijska biotehnologija, običajno dojema skozi dvojno prizmo tradicije in inovacij. Po eni strani je kmetijstvo močno povezano s kulturno dediščino, lokalno pridelavo hrane in skrbjo za okolje, zaradi česar so kmetje in drugi deležniki pogosto previdni do izrazito tehnoloških inovacij, kot je biotehnologija. Po drugi strani pa vse večja izpostavljenost strategijam bioekonomije Evropske unije in izzivom trajnostnega razvoja krepi prepričanje, da sta inovativnost in podjetniško razmišljanje nujna za prihodnji razvoj sektorja. Raziskave med grškimi kmetijskimi podjetniki kažejo, da dejavniki, kot so izobrazba, inovativnost in notranja motivacija, pomembno vplivajo na dojemanje podjetniškega uspeha v kmetijstvu, kar nakazuje postopni premik k bolj inovacijsko usmerjenemu razmišljanju v sektorju (Petropoulos in sod., 2026).

Hkrati raziskave med kmetijskimi strokovnjaki v Grčiji kažejo na vse večje zavedanje pomena podjetniških in digitalnih kompetenc za trajnostni razvoj kmetijstva, čeprav je formalno izobraževanje na področjih, povezanih z bioekonomijo, še vedno omejeno. Na splošno je podjetništvo na področju kmetijske biotehnologije v Grčiji razumljeno kot obetavno, vendar še vedno razvijajoče se področje, ki zahteva usklajevanje tehnoloških inovacij z močno zakoreninjenimi kulturnimi in okoljskimi vrednotami (Pliakoura in sod., 2021).

Na Hrvaškem se podjetništvo na področju kmetijske biotehnologije na splošno dojema kot nastajajoče, vendar še vedno strukturno omejeno področje, ki ga zaznamuje izrazita napetost med ambicijami po inovacijah in tradicionalnimi kmetijskimi praksami. Čeprav nacionalne strategije vse bolj poudarjajo inovacije in vključevanje v Evropsko unijo na agroživilskem področju, ostaja sistem kmetijskih inovacij razdrobljen, z nizko ravnjo vlaganj v raziskave in razvoj ter omejenim sodelovanjem med deležniki, kar upočasnjuje podjetniški razvoj na visokotehnoloških področjih kmetijstva. Kot ugotavlja OECD, se uspešnost hrvaškega sistema kmetijskih inovacij sicer postopoma izboljšuje, vendar ga še vedno zaznamujejo nizka javna in zasebna vlaganja v kmetijske raziskave in razvoj ter vrzeli v znanju med kmeti (OECD, 2025).

Raziskave med deležniki v kmetijstvu obenem kažejo, da sta inovativnost in podjetništvo prepoznana kot nujna odziva na strukturne izzive sektorja, pri čemer podjetniška usmerjenost vključuje inovacije, odzivnost na trg, učinkovito upravljanje virov ter diverzifikacijo proizvodnje in virov dohodka (VVEU Conference Proceedings, 2026). Skupaj te ugotovitve kažejo, da se podjetništvo na področju kmetijske biotehnologije na Hrvaškem vse bolj obravnava kot strateška priložnost za povečanje trajnostnosti in konkurenčnosti, vendar njegovo širše uveljavljanje omejujejo institucionalna razdrobljenost, pomanjkanje ustreznih kompetenc in prevlada

tradicionalnih kmetijskih struktur.

V Sloveniji se podjetništvo na področju kmetijske biotehnologije na splošno dojema kot nastajajoče, vendar še vedno razdrobljeno področje na stičišču tradicionalnih kmetijskih praks in vse bolj inovacijsko usmerjene bioekonomije. Čeprav ima država pomemben naravni in znanstveni potencial, prehod v celovito integrirano bioekonomijo še vedno poteka in ga omejujejo strukturni izzivi, povezani z usklajevanjem, obsegom dejavnosti in komercializacijo inovacij. Raziskave poudarjajo, da Slovenija razpolaga z obsežnimi viri za razvoj bioekonomije, vendar ta ostaja premalo izkoriščena zaradi izzivov v primarnih bioekonomskih sektorjih, njihovega povezovanja v vrednostne verige, prenosa industrijskih inovacij in institucionalnega usklajevanja (Juvančič in sod., 2023).

Hkrati se podjetniška razsežnost kmetijstva vse bolj prepoznava, pri čemer raziskave kažejo, da je proaktivnost najpomembnejši element podjetniške usmerjenosti za uspešnost kmetijskih gospodarstev, kar nakazuje, da je inovacijsko usmerjeno delovanje že povezano z boljšimi rezultati v kmetijstvu (Verhees in sod., 2011). Na splošno je podjetništvo na področju kmetijske biotehnologije v Sloveniji razumljeno kot obetavno, vendar še vedno razvijajoče se področje, kjer obstajata tako znanstvena usposobljenost kot podjetniški potencial, vendar so za učinkovito pretvorbo inovacij v tržno usmerjene biološko osnovane rešitve potrebni močnejša institucionalna podpora, mehanizmi za širitev dejavnosti in učinkovitejši prenos znanja.

V Turčiji se podjetništvo na področju kmetijske biotehnologije na splošno dojema kot obetavno, a hkrati kompleksno in še vedno razvijajoče se področje, ki se nahaja na stičišču znanstvenih inovacij, modernizacije kmetijstva in strukturnih institucionalnih omejitev. Čeprav je biotehnologija vse bolj prepoznana kot pomemben dejavnik trajnostnega razvoja, zdravja in prehranske varnosti, njeno podjetniško uveljavljanje pogosto omejujejo sistemske ovire, kot so omejene raziskovalno-razvojne zmogljivosti, nezadostna institucionalna usklajenost in vrzeli v znanju znotraj kmetijskega sektorja. Kot poudarja strokovna literatura, podjetništvo na področju biotehnologije zajema vse aktivnosti skupine posameznikov, ki skupaj ustvarjajo in tržijo inovativne proizvode s povezovanjem znanstvenih in poslovnih disciplin (Seyhan, 2022).

Raziskave s področja krepitve zmogljivosti obenem poudarjajo, da na razvoj kmetijske biotehnologije v Turčiji pomembno vplivata njen geografski položaj in strukturne značilnosti, saj država hkrati izkorišča prednosti regionalne povezanosti in znanstvenega potenciala, vendar še vedno potrebuje močnejše inovacijske sisteme in ustreznejšo politično podporo (Dobos in Karaali, 2003). Na splošno se podjetništvo na področju kmetijske biotehnologije v Turčiji dojema kot nastajajoče področje z velikim strateškim pomenom, vendar njegovo praktično uresničevanje omejujejo institucionalne pomanjkljivosti, neenakomerna inovacijska zmogljivost ter potreba po tesnejšem sodelovanju med akademsko sfero, gospodarstvom in oblikovalci politik.

Podjetništvo na področju biotehnologije vam omogoča, da pri teh procesih prevzamete aktivno vlogo. Biti podjetnik ne pomeni nujno takoj ustanoviti podjetja, temveč pomeni ustvarjalno razmišljati, prepoznavati probleme iz resničnega okolja in razumeti, kako je mogoče biotehnološke rešitve uporabiti tudi zunaj laboratorija. Z razvijanjem inovativnosti, sodelovalnih veščin in sposobnosti reševanja problemov lahko prispevate k premoščanju vrzeli med raziskavami in njihovim dejanskim vplivom v praksi.

6.2. Razvoj biotehnoloških zagonskih podjetij za reševanje podnebnih in okoljskih izzivov

Ena najpomembnejših resnic, ki bi jih morali diplomanti biotehnologije vedno imeti v mislih, je, da uspešno spopadanje s podnebnimi spremembami ni odvisno zgolj od razvoja tehnično ustreznih rešitev, temveč tudi od tega, da so te rešitve praktične, primerne za širšo uporabo in ekonomsko vzdržne. Določen koncept lahko v

laboratorijskih razmerah deluje izjemno uspešno, vendar se lahko izkaže za neuspešnega pri prenosu v industrijsko okolje.

Vprašanja, kot so razpoložljivost surovin, izvedljivost proizvodnje v velikem obsegu, upravljanje odpadkov in stranskih proizvodov ter dolgoročni stroški energije, je treba upoštevati že v najzgodnejših fazah razvoja. Biotehnološke ideje, ki jih ni mogoče učinkovito prenesti v večji obseg proizvodnje, so praviloma manj privlačne in za vlagatelje pogosto predstavljajo večje tveganje.

6.2.1. Izvedljivost

Prvi odziv podjetniško usmerjenega biotehnologa je prvo instinktivno vprašanje: »Ali je to tehnično izvedljivo?« To vprašanje predstavlja ključno izhodišče in ga nikoli ne smemo zanemariti. Vendar uspešni podjetniki razmišljajo širše od same tehnične izvedljivosti in upoštevajo tudi več drugih pomembnih vidikov:

- Ali je mogoče idejo razviti v razumnem časovnem okviru z uporabo obstoječega znanstvenega znanja?
- Ali je mogoče proces prenesti iz laboratorijskega merila na pilotno in industrijsko raven?
- Ali je mogoče proces zanesljivo ponavljati in dosledno nadzorovati?

Ideje, ki so znanstveno zelo impresivne, vendar zahtevajo deset ali več let intenzivnih raziskav in razvoja, pogosto ostanejo na ravni akademskih projektov in se ne razvijejo v uspešne poslovne podvige. Zato je treba poslovne ideje oblikovati ob upoštevanju teh praktičnih omejitev.

Na trgu se pojavlja veliko idej, ki delujejo inovativno, vendar ne odgovarjajo na resnične potrebe uporabnikov. Nasprotno pa so biotehnološki proizvodi in orodja za naslavljanje podnebnih sprememb cenjeni predvsem takrat, ko na realističen in učinkovit način rešujejo konkretne probleme. Zato mora dobra biotehnološka poslovna ideja izhajati iz dejanskega problema.

Podjetniško usmerjen biotehnolog bi si moral vedno zastaviti naslednja vprašanja:

- Komu ta problem otežuje vsakdanje življenje?
- Kateri vidik oziroma posledica podnebnih sprememb ga povzroča?
- Kako se problem trenutno rešuje in zakaj obstoječa rešitev ni zadostna?
- Ali obstaja kdo, ki je za boljšo rešitev dejansko pripravljen plačati?

Takšna vprašanja posameznika naravno usmerjajo k inovacijam in podjetništvu. Zadnje vprašanje je še posebej pomembno na področju podnebnih in okoljskih izzivov, saj številni deležniki problem sicer prepoznavajo, le redki pa so pripravljeni finančno podpreti njegovo reševanje.

Poskusimo skupaj

Preden nadaljujete, lahko odigrate kratki igri »Hitri izziv: vplivi podnebnih sprememb« in »Mini igra sistemskega mapiranja« (ti dve in ostale igre so v angleščini).

Zaženite igri



Slika 45. Razmislek o podnebnih problemih

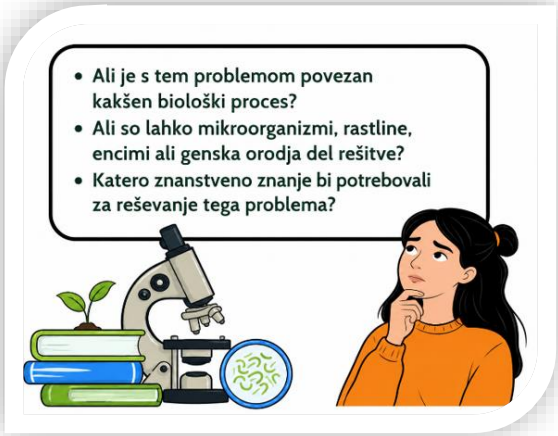
1.

2.

3.

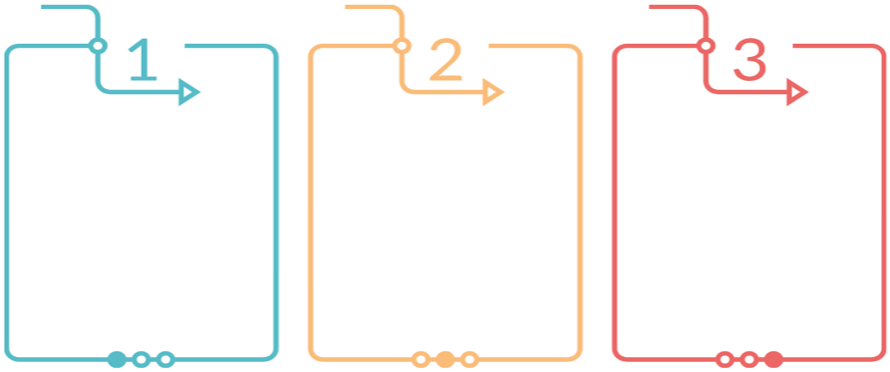
Preberite miselni oblaček in razmislite. Pred tem lahko odigrate igro »Izziv biotehnoloških rešitev«.

Zaženite igro



Slika 46. Razmislek o biotehnoloških rešitvah

Zapišite tri možne rešitve, ki jih lahko ponudite



1.

2.

3.

Preberite vprašanje na sliki in razmislite. Pred tem lahko odigrate igro »Primerjalni laboratorij izvedljivosti« (igra »Comparative Feasibility Lab« je v angleščini).

Zaženite igro



Slika 47. Razmislek o realističnih in učinkovitih rešitvah

Tehnična zahtevnost:
Strošek:
Čas izvedbe:
Okoljsko tveganje:
Družbena sprejemljivost:
Možnost povečanja obsega proizvodnje:

6.2.2. Konkurenčnost

Naslednje ključno vprašanje pri vsaki biotehnološki poslovni ideji je, ali je predlagana rešitev dejansko boljša od obstoječih. Trditve, kot sta »naša rešitev je okolju prijaznejša« ali »varujemo okolje«, same po sebi običajno niso dovolj prepričljive za pridobivanje investicij, razvoj izdelka ali uspešen prodor na trg. Pri presoji, ali bo rešitev sprejeta, imajo odločilno vlogo predvsem naslednji dejavniki:

- Ali je stroškovno učinkovitejša?
- Ali je hitrejša oziroma učinkovitejša?
- Ali zahteva manj energije, vode ali surovin?
- Ali omogoča lažje izpolnjevanje zakonskih in regulativnih zahtev?

Pomembno je poudariti, da je biotehnologija tesno povezana z zakonodajnimi in regulativnimi okviri. Zato bi morali podjetniki že v fazi oblikovanja ideje razmisliti, ali njihov proizvod sodi na področje živilstva, varstva okolja, zdravstva ali industrije, ali zahteva dolgotrajne postopke odobritve oziroma klinična testiranja ter ali veljavna zakonodaja predlagano tehnologijo podpira ali omejuje.

V številnih primerih lahko tehnično preprostejša in na prvi pogled manj »privlačna« ideja, ki se sooča z manj regulativnimi ovirami, doseže praktičen učinek bistveno hitreje kot tehnološko zahtevnejše rešitve.

Nadaljujmo z vašo idejo



Slika 48. Razmislek o inovativnosti biotehnoloških rešitev

Zapišite svoje odgovore

6.2.3. Razvoj produkta in interdisciplinarni pristop

Ni nujno, da vsak biotehnolog razvije končni izdelek za potrošnika. Med tržno zanimive rezultate lahko sodijo tudi surovine, stranski proizvodi, procesne tehnologije, analitska ali merilna orodja ter sistemi za optimizacijo procesov. Jasna opredelitev položaja izdelka znotraj vrednostne verige pomaga preprečiti, da bi se ideja izgubila na trgu, in povečuje možnosti za uspeh.

Biotehnološki projekti pogosto zahtevajo sodelovanje strokovnjakov z različnih področij. Zato morajo biti podjetniki pripravljeni oblikovati močne projektne skupine ali vzpostaviti strateška partnerstva. Najobetavnejše

poslovne ideje so praviloma tiste, ki omogočajo učinkovito timsko delo.

Pri tem je smiselno razmisliti o naslednjih vprašanjih:

- Katere stroke so potrebne za uresničitev te ideje – inženirstvo, razvoj programske opreme, poslovni razvoj, pravo ali trženje?
- Katere interdisciplinarne oziroma multidisciplinarne oblike sodelovanja so ključne za uspešno izvedbo projekta?

Poglejmo, kako idejo spremeniti v izdelek



Slika 49. Razmislek o pretvorbi ideje v produkt

Zapišite odgovore:

6.2.4. Zakaj ravno sedaj?

Dobra ideja ni zgolj dobra ideja. Je ideja, katere čas je prišel. Podjetniki morajo pozorno spremljati nastajajočo zakonodajo, trende stroškov, tehnološke preboje ter družbene in industrijske spremembe. Razumevanje, zakaj

je določena ideja pomembna prav v tem trenutku, je pogosto tisto, kar jo spremeni iz zanimivega koncepta v uspešno inovacijo.

Zaposljivost in prenosljive kompetence za zeleno in trajnostno bioekonomijo

Strokovno znanje je na področju biotehnologije ključnega pomena in bo vedno predstavljalo temeljno zahtevo. Vendar je v zeleni in trajnostni bioekonomiji zaposljivost odvisna ne le od strokovnega znanja, temveč tudi od vsestranskih, prilagodljivih in na ljudi usmerjenih kompetenc.

Mnogi podjetniki pridobivajo izkušnje z delom v različnih okoljih, preden svoje ideje pretvorijo v konkretne rešitve. Karierne poti v zeleni in trajnostni bioekonomiji so le redko linearne. Diplomant lahko svojo poklicno pot začne v zasebnem sektorju, nato sodeluje v javnih projektih, preide iz akademskega okolja v podjetništvo ali pa se iz raziskovalno-razvojnega dela usmeri v upravljanje trajnostnosti oziroma na področje oblikovanja politik.

V sodobnem delovnem okolju delodajalci vse bolj cenijo prenosljive kompetence, kot so učinkovita komunikacija, vodenje skupin, prilagodljivost, sposobnost predvidevanja morebitnih težav ter učinkovito reševanje problemov. Organizacije, ki delujejo na področju zelene in trajnostne bioekonomije, iščejo strokovnjake, ki niso le tehnično usposobljeni, temveč se dobro znajdejo tudi v negotovih razmerah, znajo komunicirati med različnimi strokovnimi področji ter razumejo načela trajnostnega razvoja.

S tega vidika zaposljivosti ne oblikuje zgolj to, kaj posameznik zna, temveč tudi način njegovega dela. Znanje s področja biotehnologije lahko odpre vrata na delovno mesto, vendar so prav prenosljive kompetence tiste, ki posamezniku omogočajo, da v delovnem okolju ostane, napreduje in se razvija. Tako kot vse druge veščine je tudi prenosljive kompetence mogoče razvijati in krepiti z zavestnim prizadevanjem ter aktivno prakso.

6.2.5. Prenosljive kompetence

Prenosljive kompetence niso »dodatne« sposobnosti, temveč temeljne kompetence. Še posebej pri razvijanju idej in inovacijskih procesih v zeleni bioekonomiji postanejo naslednje prenosljive kompetence izjemno pomembne:

- **Kritično razmišljanje**
  Pomemben vidik kritičnega mišljenja je presoja, ali določena biotehnološka rešitev dejansko prinaša okoljske koristi ali pa zgolj ustvarja vtis »zelenosti«. Dejstvo, da je proizvod biološkega izvora, še ne pomeni samodejno, da je trajnosten. Če ne upoštevamo dejavnikov, kot so izvor surovin, poraba energije, nastajanje stranskih proizvodov in dolgoročni vplivi na okolje, lahko rešitve ostanejo zgolj navidezno trajnostne. Kritično razmišljanje pomaga razlikovati med resnično trajnostnimi inovacijami in tistimi, ki so le videti okolju prijazne.

- **Reševanje problema**
  Izzivi v zeleni bioekonomiji so pogosto zapleteni in večplastni. Biotehnološka valorizacija kmetijskih odpadkov na primer ne vključuje zgolj tehničnih postopkov, temveč tudi logistiko, stroške, zakonodajne zahteve in lokalne pogoje izvajanja. Dobre sposobnosti reševanja problemov posamezniku omogočajo, da takšno kompleksnost razčleni na obvladljive elemente ter razvije realistične in izvedljive rešitve.

- **Komunikacijske spretnosti**
  Za študenta biotehnologije ni dovolj, da zna svojo idejo predstaviti zgolj v akademskem jeziku. Isto idejo je pogosto treba predstaviti na različne načine vlagateljem, predstavnikom industrije ali javnim institucijam. Pri predstavitvi biotehnološke rešitve za zmanjševanje emisij ogljika lahko na primer poudarjanje gospodarskih

in okoljskih koristi namesto tehničnih podrobnosti bistveno poveča možnosti za njeno uveljavitev.

- **Timsko delo in interdisciplinarno sodelovanje**
  Projekti v zeleni bioekonomiji le redko ostajajo znotraj ene same discipline. Biotehnološka rešitev za ravnanje z odpadki lahko na primer zahteva sodelovanje inženirjev, okoljskih strokovnjakov, ekonomistov in pravnih strokovnjakov.
  Spretnosti timskega dela omogočajo povezovanje različnih pogledov in znanj, kar vodi do kakovostnejših in bolj uporabnih rešitev.

- **Prilagodljivost in odprtost za učenje**
  Podnebne politike, okoljska zakonodaja in tehnologije se hitro spreminjajo. Standard trajnostnosti, ki velja danes, je lahko že čez nekaj let spremenjen. Zato so odprtost za novo znanje, hitro prilagajanje spreminjajočim se razmeram in pripravljenost na vseživljenjsko učenje ključne prenosljive kompetence.

- **Zavedanje o trajnosti in etična odgovornost**
  Rešitve, razvite v okviru zelene bioekonomije, imajo poleg okoljskih tudi pomembne družbene učinke. Pri razvoju biotehnoloških proizvodov ne smemo spregledati njihovega vpliva na lokalne proizvajalce ali vprašanj, povezanih s pravičnim dostopom do naravnih virov. Etična odgovornost podpira razvoj rešitev, ki bodo dolgoročno sprejete v družbi in bodo uživale zaupanje različnih deležnikov.

Ocenite svoje v podjetništvo usmerjene prenosljive kompetence

Ocenite svojo raven razvitosti posamezne kompetence na lestvici od 1 (zelo nizko) do 5 (zelo visoko).

Prenosljive kompetence	Likertova lestvica: 1: zelo nizko; 2: Nizko; 3: Neutralno; 4: Visoko; 5: Zelo visoko				
Ustvarjalnost	1	2	3	4	5
Reševanje problema	1	2	3	4	5
Timsko delo	1	2	3	4	5
Vodenje	1	2	3	4	5
Komunikacija	1	2	3	4	5
Pripravljenost na prevzemanje tveganj	1	2	3	4	5

6.2.6. Človeška in sistemska perspektiva

Trajnosti ni mogoče doseči zgolj s tehnologijo; oblikuje se skozi preplet človekovega vedenja, gospodarskih struktur in političnih okvirov. Zato delodajalci od strokovnjakov pričakujejo sposobnost presojanja okoljskih vplivov, razumevanja družbenih in ekonomskih posledic ter delovanja z visoko stopnjo odgovornosti in etične zavesti. Enake lastnosti bodo iskali tudi tisti, ki nameravajo v prihodnosti ustanoviti lastna podjetja, pri ljudeh, s katerimi bodo sodelovali.

Razvoj širokega nabora kompetenc, potrebnih na tem področju, presega okvire študijskih predmetov in

dobljenih ocen. Projektno delo, strokovne prakse, prostovoljske dejavnosti ter sodelovanje v mednarodnih in medkulturnih skupinah bi se morali začeti že v času dodiplomskega študija, saj pomembno prispevajo k večji zaposljivosti. To poudarja pomen aktivnega vključevanja namesto pasivnega čakanja – gradnje strokovnih mrež, povezovanja s strokovnjaki, ki ustvarjajo resnično dodano vrednost na tem področju, ter vzdrževanja stalne komunikacije in sodelovanja. Zelena in trajnostna bioekonomija ne potrebuje le usposobljenih znanstvenikov, temveč tudi strokovnjake, ki znajo kritično razmišljati, učinkovito komunicirati, prevzemati odgovornost in se prilagajati spremembam. Prenosljive kompetence so ključ, ki odpira vrata v takšno prihodnost.

6.2.7. Primeri uspešnih kmetijsko-biotehnoloških podjetniških pobud

V tem poglavju sta predstavljena dva primera dobre prakse s področja podjetništva v kmetijski biotehnologiji.

Študija primera 26: Twist Bioscience

https://www.twistbioscience.com/

Ime podjetja: Twist Bioscience
Področje delovanja: Sintezna biologija, genomika in sinteza DNK



Figure 50. Twist Bioscience Website

Twist Bioscience je biotehnološko podjetje, ki ga je ustanovila Emily Leproust. Podjetje deluje predvsem na področju sintezne biologije in naprednih tehnologij sinteze DNK. Njegova visokozmogljiva platforma za sintezo DNK raziskovalcem omogoča hitro in natančno načrtovanje ter proizvodnjo sintetičnih genov.

Po navedbah podjetja njihove tehnologije neposredno podpirajo področja, kot so medicina, industrijska kemija, shranjevanje podatkov v DNK in kmetijska biologija.

Med proizvode podjetja sodijo sintetični fragmenti DNK, genske knjižnice, oligonukleotidi in orodja za gensko oziroma genomsko inženirstvo. Na področju kmetijske biotehnologije lahko ti proizvodi podpirajo razvoj poljščin, odpornih proti suši, rastlinskih sort z večjo odpornostjo proti boleznim ter izboljšanih prehranskih lastnosti kmetijskih pridelkov.

Sorodna področja, na katerih bi lahko delovalo to podjetje

Navedite nekaj primerov področij, s katerimi se to podjetje ukvarja oziroma bi se lahko ukvarjalo, na primer z urejanjem rastlinskega genoma s tehnologijo CRISPR ali trajnostnim izboljševanjem poljščin.

Če bi vi ustanovili podobno podjetje, bi se osredotočili na:

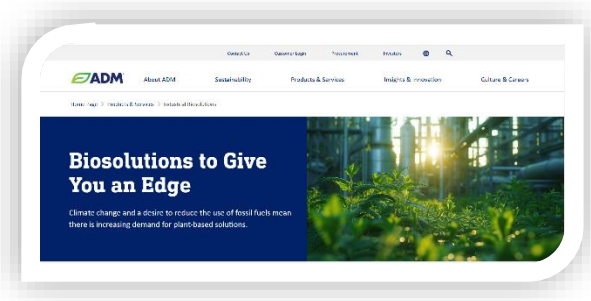
Vaja za razvoj podjetniškega razmišljanja v biotehnologiji:

1. Kako je mogoče tehnologije sinteze DNK komercializirati za potrebe trajnostnega kmetijstva?
2. Katere kmetijske probleme je mogoče reševati s platformami za sintezo genov?
3. Kako bi takšno biotehnološko zagonsko podjetje pozicionirali na globalnem trgu rešitev za prehransko varnost?

Razmislite o svojih odgovorih:

Študija primera 27: ADM Industrial Biosolutions

Ime podjetja: ADM (Archer Daniels Midland) – Industrial Biosolutions
Področje delovanja: Kmetijska biotehnologija, industrijsko bioprocesiranje, biomateriali rastlinskega izvora in fermentacijske tehnologije



Slika 51. Spletna stran ADM Industrial Biosolutions

ADM Industrial Biosolutions je industrijsko podjetje, ki temelji na biotehnologiji in se osredotoča na razvoj trajnostnih rešitev rastlinskega izvora. Deluje na stičišču kmetijske biotehnologije, industrijske fermentacije, obnovljivih biomaterialov in trajnostnih kmetijskih sistemov.

Paleta proizvodov podjetja zajema širok spekter biotehnoloških aplikacij, vključno s hranili za fermentacijske procese, biološko osnovanimi gnojili, biodizlom, škrobi, industrijskimi olji, puferskimi raztopinami za uravnavanje pH, rastlinskimi viri ogljika in dušika ter različnimi podpornimi rešitvami za kmetijstvo. Med fermentacijskimi proizvodi so zlasti pomembni glukozni sirupi, škrobi, sojine in grahove beljakovine, glicerin ter druge surovine rastlinskega izvora, ki se uporabljajo v procesih bioproizvodnje, tako v predelavnih (*upstream*) kot tudi v nadaljnjih (*downstream*) fazah proizvodnje.

Na katera inovativna raziskovalna področja bi se usmerili, če bi ustanovili podobno podjetje?

Navedite nekaj primerov raziskovalnih področij, s katerimi bi se vaše podjetje ukvarjalo, na primer z biološkimi pripravki za induciranje stresnega spomina pri rastlinah (stress memory bio-primers) ipd.

Vaja za razvoj podjetniškega razmišljanja v biotehnologiji:

1. Kako lahko industrijska biotehnologija, ki temelji na rastlinskih surovinah, prispeva k trajnostnemu kmetijstvu?

2. Katere kmetijske stranske proizvode je mogoče pretvoriti v biotehnološke proizvode z dodano vrednostjo?

3. Kako bi zasnovali zagonsko podjetje, ki bi povezovalo fermentacijsko biotehnologijo in rešitve za izboljšanje zdravja rastlin?

Razmislite o svojih odgovorih:

6.3. Zaključek

Kmetijska biotehnologija se nahaja na zanimivem stičišču znanosti, trajnostnega razvoja in človekovih potreb. Gre za področje, ki ga ne oblikujeta zgolj tehnološki napredek in znanstvena odkritja, temveč tudi potrpežljivost, odgovornost ter sposobnost sodelovanja med različnimi strokovnimi področji.

Za študente, ki jih zanima biotehnološko podjetništvo, je radovednost lahko prav tako pomembna kot strokovno znanje. Številne pomembne inovacije se začnejo s preprostimi opažanji, vztrajnimi vprašanji in pripravljenostjo na nenehno učenje. Uspeh na tem področju redko temelji zgolj na znanosti; pogosto je rezultat sodelovanja, prilagodljivosti in razumevanja problemov iz resničnega okolja. Zato je za bodoče podjetnike pomembno, da znajo prisluhniti, opazovati ter prepoznati potrebe, interese in trende na trgu.

Izzivi, povezani s prehranskimi sistemi, podnebnimi spremembami in kmetijstvom, so kompleksni in nobena posamezna rešitev jih ne more v celoti odpraviti. Kljub temu lahko premišljene, skrbno razvite in etično zasnovane ideje sčasoma pomembno prispevajo k pozitivnim spremembam. Prav to daje temu področju posebno vrednost – ponuja možnost razvoja inovacij, ki niso pomembne le z gospodarskega vidika, temveč imajo tudi širši družbeni in okoljski pomen.

Onkraj laboratorijske mize

Zadnji poziv k ukrepanju za biotehnologa prihodnosti v času podnebnih sprememb

Prišli ste do zadnjih strani tega priročnika. Toda v mnogih pogledih to ni konec, temveč začetek. Znanje, ki ste ga pridobili skozi posamezna poglavja – od nevidnih mikrobnih združb, ki usmerjajo rodovitnost tal, prek encimske dovršenosti fotosinteznega zajemanja ogljika, do podjetniških pristopov, ki lahko laboratorijsko zamisel spremenijo v resnično podnebno rešitev – predstavlja trdne temelje. Veliko pomembnejše vprašanje pa je, kaj boste s temi temelji naredili.

Podnebna kriza ni problem, ki bi ga bilo mogoče umestiti v eno samo znanstveno disciplino. Nastaja na presečišču bioloških sistemov, človeških odločitev, gospodarskih struktur in političnih okvirov, zato zahteva rešitve, oblikovane prav na tem presečišču. Kot študent kmetijske biotehnologije ste v edinstvenem položaju. Razumete žive sisteme. Veste, kako mikroorganizmi komunicirajo s koreninami rastlin, kako se izražanje genov odziva na okoljski stres in kako lahko fermentacija odpadke pretvori v vir. To niso zgolj akademske zanimivosti, temveč gradniki naslednje kmetijske revolucije.

Največjega izziva našega časa ne bo rešilo eno samo prelomno odkritje v enem laboratoriju. Reševala ga bo generacija znanstvenikov, ki zna razmišljati prek meja – med disciplinami, sektorji ter med omejitvami današnjega dne in možnostmi prihodnosti.

Kaj je ta priročnik želel doseči?

Vsako poglavje tega priročnika ni bilo zasnovano zgolj za posredovanje informacij, temveč za spodbujanje širšega razmišljanja. Povabljeni ste bili k razmisleku o tem, kako lahko inovacije, ki temeljijo na mikrobiomih, preoblikujejo prehranske sisteme v spreminjajočem se podnebju. Spoznali ste, kako lahko načela krožne bioekonomije iz kmetijskih in industrijskih procesov odstranijo sam koncept odpadka. Raziskovali ste, kako tla pod našimi nogami niso inertna podlaga, temveč živ sistem, katerega delovanje je odvisno od mikrobne raznovrstnosti, prostorskega konteksta ter odločitev kmetov in oblikovalcev politik.

Spoznali ste tudi znanost o ogljiku – kako ga biološki sistemi zajemajo, vežejo in potencialno skladiščijo – ter izjemne možnosti biotehnološko podprte obnove ekosistemov. V zadnjem poglavju pa ste stopili iz vloge študenta v vlogo inovatorja: osebe, ki zna prepoznati resničen problem, oceniti izvedljivost biološke rešitve, razumeti konkurenčno in regulativno okolje ter svojo idejo predstaviti ljudem zunaj laboratorija.

Pismenost na področju nuikrobioma

Razumevanje talnih in rastlinsko povezanih mikrobnih združb kot nosilcev podnebno pametnega kmetijstva

Krožno razmišljanje

Načrtovanje biološko osnovanih sistemov, v katerih odpadek postane surovina, vsak vir pa je smiselno izkoriščen

Razumevanje kroženja ogljika

Uporaba fotosintetskih in mikrobnih sistemov kot orodij za učinkovito in dolgoročno zajemanje ogljika

Podjetniško usmerjena znanost

Pretvarjanje strokovnega znanja v pobude in podjetja, ki ustvarjajo okoljsko in gospodarsko vrednost.

Prenosljive kompetence

Kritično mišljenje, sodelovanje, komunikacija in etična odgovornost kot temeljne strokovne kompetence

Sistemska perspektiva

Povezovanje bioloških mehanizmov s političnimi okviri, tržnimi zakonitostmi in potrebami družbe

Kmetijski biotehnolog kot soustvarjalec podnebnih rešitev

Kmetijska biotehnologija ima posebno pomembno vlogo pri blaženju podnebnih sprememb in prilagajanju nanje. Kmetijstvo je hkrati eden največjih virov emisij toplogrednih plinov in eden najbolj ranljivih sektorjev za posledice segrevanja planeta. Obenem pa je eno redkih področij, kjer lahko biologija, podprta z biotehnologijo, ponudi rešitve v obsegu in hitrosti, ki ju trenutne razmere zahtevajo.

Biognojila, ki zmanjšujejo odvisnost od sintetičnega dušika. Sorte rastlin, izboljšane s tehnologijo CRISPR, z večjo

odpornostjo proti suši. Fermentacijske platforme, ki kmetijske ostanke pretvarjajo v biogoriva, bioplastiko in nutracevtike. Mikorizna omrežja, ki skladiščijo ogljik in izboljšujejo strukturo tal. Sistemi proizvodnje gojenih beljakovin, ki zmanjšujejo pritisk na zemljišča. To niso oddaljene možnosti, temveč aktivna raziskovalna področja, s katerimi ste se srečali tudi v tem priročniku.

Skupno jim je to, da potrebujejo prav takšne strokovnjake, kakršni postajate: ljudi, ki dovolj poglobljeno razumejo biološke mehanizme, da jih lahko odgovorno uporabljajo in razvijajo, hkrati pa dovolj široko razumejo njihovo vrednost, da jo znajo predstaviti kmetom, vlagateljem, regulatorjem in lokalnim skupnostim. Tehnično znanje je nujno. Samo po sebi pa ni dovolj.

Biotehnološka rešitev, ki je ni mogoče pojasniti kmetu, financirati s strani vlagatelja, odobriti s strani regulatorja ali ji ne zaupa lokalna skupnost, še ni rešitev. Je zgolj prototip. Razdalja med prototipom in dejanskim učinkom je prostor, kjer pridejo do izraza prenosljive kompetence, podjetniško razmišljanje in sistemska perspektiva.

Nekaj besed o negotovosti – in zakaj je pomembna

Ena najbolj iskrenih lekcij tega priročnika je spoznanje, da prihodnost podnebno usmerjene biotehnologije še ni dokončno zapisana. Scenariji, predstavljeni v posameznih poglavjih, so bili ponekod namenoma nekoliko špekulativni, saj razvijajo veščino, ki je noben učbenik ne more naučiti v eni sami lekciji: sposobnost premišljenega odločanja v razmerah negotovosti.

Podnebne projekcije podajajo razpone možnih scenarijev, ne gotovih napovedi. Regulativni okviri se bodo spreminjali. Pojavljale se bodo nove tehnologije, ki bodo postavljale pod vprašaj današnja prepričanja. Mikroorganizem, ki ga proučujete danes, lahko postane osnova za izdelek, ki še ne obstaja. Politike bioekonomije v vaši državi bodo do zaključka vašega študija verjetno že precej drugačne. To ni razlog za zaskrbljenost, temveč povabilo k vseživljenjskemu učenju.

Najuspešnejši biotehnologi na področju podnebnih izzivov niso tisti, ki imajo vse odgovore, temveč tisti, ki znajo postavljati boljša vprašanja, graditi interdisciplinarne mreže, spremljati regulativne in tržne spremembe ter se hitro prilagajati, ko se izkaže, da začetne predpostavke niso bile pravilne. Prav tak način razmišljanja je ta priročnik želel spodbujati.

Vaša vloga v evropskem zelenem prehodu

Ta priročnik je nastal v okviru projekta BIOSHIELD Erasmus+, ki povezuje univerze in izobraževalne ustanove iz Grčije, Turčije, Slovenije, Hrvaške in drugih držav. To geografsko sodelovanje ni naključno. Izzivi biotehnologije za blaženje podnebnih sprememb so po svoji naravi mednarodni, zeleni prehod v Evropi pa bo zahteval strokovnjake, ki znajo delovati prek kulturnih, institucionalnih in disciplinarnih meja.

Strategija bioekonomije Evropske unije, strategija »Od vil do vilic« in Evropski zeleni dogovor ustvarjajo okolje, ki aktivno potrebuje znanje in inovacije, kakršne lahko ponudi kmetijska biotehnologija. Kot diplomant ne vstopate v sektor v zatonu, temveč v področje hitrih, kompleksnih in pomembnih sprememb. Povpraševanje po strokovnjakih, ki povezujejo biologijo, trajnostnost in podjetništvo, narašča. Vprašanje je le, ali ste pripravljeni prevzeti to vlogo.

Ideje iz tega priročnika prenesite v svoje naslednje predavanje, naslednji eksperiment in naslednji pogovor z mentorjem ali kolegom. Vprašajte se, katere biološke sisteme, ki jih proučujete, bi bilo mogoče preoblikovati za večjo podnebno odpornost. Razmislite, s katerimi težavami se soočajo lokalni kmetje, pridelovalci hrane ali

občine in kako bi jim lahko pomagala biotehnologija. Razmislite, ali bi raziskava, ki nastaja na vaši ustanovi, lahko postala zametek zagonskega podjetja, priporočila za oblikovanje politik ali pobude za lokalno skupnost.

Podnebje ne čaka na popolne razmere za ukrepanje. Tudi vi ne bi smeli. Imate znanje, metodološke okvire in – če ste se temu priročniku posvetili resno – tudi zametke miselnosti, ki jo zahteva biotehnologija za soočanje s podnebnimi izzivi.

Laboratorijska miza je kraj, kjer se znanost začne. Svet pa je kraj, kjer postane pomembna. Stopite onkraj laboratorijske mize!

Viri

Aasfar, A., Bargaz, A., Yaakoubi, K., Hilali, A., Bennis, I., Zeroual, Y., & Meftah Kadmiri, I. (2021). Nitrogen fixing Azotobacter species as potential soil biological enhancers for crop nutrition and yield stability. Frontiers in Microbiology, 12, 628379. https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.628379

Ahmed, A., & Makkawi, Y. (2025). The biorefinery paradigm: Technologies, feedstocks, and retrofitting for future sustainable energy. Energies, 18, 5919. https://doi.org/10.3390/en18225919

Alam, A. M. M. N., et al. (2024). Sustainable scaffolding techniques for cultured meat development. Food Research International, 187, 114253. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2024.114253

Allen, R. E., Dodson, M. V., Luiten, L. S., & Boxhorn, L. K. (1985). A serum-free medium that supports the growth of cultured skeletal muscle satellite cells. In Vitro Cellular & Developmental Biology, 21, 636–640. https://doi.org/10.1007/BF02623296

Allouzi, M. M. A., Allouzi, S. M. A., Keng, Z. X., Supramaniam, C. V., Singh, A., & Chong, S. (2022). Liquid biofertilizers as a sustainable solution for agriculture. Heliyon, 8(12), e12609. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e12609

Ambaru, B., Manvitha, R., & Madas, R. (2025). Synergistic integration of remote sensing and soil metagenomics data: Advancing precision agriculture through interdisciplinary approaches. Frontiers in Sustainable Food Systems, 8, 1499973.

Baca-González, V., Asensio-Calavia, P., González-Acosta, S., Pérez de la Lastra, A., & Morales de la Nuez, A. (2020). Are vaccines the solution for methane emissions from ruminants? A systematic review. Vaccines, 8(3), 460. https://doi.org/10.3390/vaccines8030460

Backer, R., Rokem, J. S., Ilangumaran, G., Lamont, J., Praslickova, D., Ricci, E., Subramanian, S., & Smith, D. L. (2018). Plant growth-promoting rhizobacteria: Context, mechanisms of action, and roadmap to commercialization of biostimulants for sustainable agriculture. Frontiers in Plant Science, 9, 1473. https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01473

Bardgett, R. D., & Caruso, T. (2020). Soil microbial community responses to climate extremes: Resistance, resilience and transitions to alternative states. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 375(1794).

Bardgett, R. D., & Van Der Putten, W. H. (2014). Belowground biodiversity and ecosystem functioning. Nature, 515(7528), 505–511.

Barney, B. M., & Plunkett, M. H. (2022). Rnf1 is the primary electron source to nitrogenase in a high-ammonium-accumulating strain of Azotobacter vinelandii. Applied Microbiology and Biotechnology, 106, 5051–5061. https://doi.org/10.1007/s00253-022-12059-x

Belkozhayev, A. M., Abaildayev, A., Kossalbayev, B. D., Tastambek, K. T., Kadirshe, D. K., & Toleutay, G. (2025). Microbial valorization of agricultural and agro-industrial waste into bacterial cellulose: Innovations for circular bioeconomy integration. Microorganisms, 13(12), 2686. https://doi.org/10.3390/microorganisms13122686

Bello, S. K., Shobayo, A. B., Ibrahim, M. M., Alasinrin, S. Y., Aliyu, I. A., & Yusuf, A. A. (2021). Biological nitrogen fixation contributes to soil productivity in tropical agroecologies. Nigerian Journal of Soil Science, 31(1), 1–14. https://doi.org/10.36265/njss.2020.310101

Ben-Arye, T., & Levenberg, S. (2019). Tissue engineering for clean meat production. Frontiers in Sustainable Food Systems, 3, 46. https://doi.org/10.3389/fsufs.2019.00046

Ben-Arye, T., Shandalov, Y., Ben-Shaul, S., Landau, S., Zagury, Y., Ianovici, I., Lavon, N., & Levenberg, S. (2020). Textured soy protein scaffolds enable the generation of three-dimensional bovine skeletal muscle tissue for cell-based meat. Nature Food, 1(4), 210–220. https://doi.org/10.1038/s43016-020-0046-5

Bender, S. F., Wagg, C., & van der Heijden, M. G. A. (2016). An underground revolution: Biodiversity and soil ecological engineering for agricultural sustainability. Trends in Ecology & Evolution, 31(6), 440–452. https://doi.org/10.1016/j.tree.2016.02.016

Berg, G., Rybakova, D., Grube, M., & Köberl, M. (2015). The plant microbiome explored: Implications for experimental botany. Journal of Experimental Botany, 67(4), 995–1002. https://doi.org/10.1093/jxb/erv466

Berruti, A., Lumini, E., Balestrini, R., & Bianciotto, V. (2016). Arbuscular mycorrhizal fungi as natural biofertilizers:

Let's benefit from past successes. Frontiers in Microbiology, 6, 1559. https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.01559

Bhat, Z. F., Morton, J. D., Mason, S. L., & Bekhit, A. E. D. A. (2019). Technological, regulatory, and ethical aspects of cultured meat: A future slaughter-free harvest. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 18(4), 1192–1208. https://doi.org/10.1111/1541-4337.12473

Bhatia, S. K., Jagtap, S. S., Bedekar, A. A., Bhatia, R. K., Rajendran, K., Pugazhendhi, A., Rao, C. V., Atabani, A. E., Kumar, G., & Yang, Y. H. (2021). Renewable biohydrogen production from lignocellulosic biomass using fermentation and integration of systems with other energy generation technologies. Science of the Total Environment, 765, 144429. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144429

Blackstone, N. T., El-Abbadi, N., McClements, D. J., & Walsh, C. S. (2025). Guidelines for environmental life cycle assessment of cultivated meat. The International Journal of Life Cycle Assessment. https://doi.org/10.1007/s11367-025-02562-4

Bolla, P. K., Panozzo, A., Minozzi, E., Valente, F., Potestio, S., Visioli, G., Martinez-Sañudo, I., & Vamerali, T. (2025). Effects of foliar-sprayed bio-fertilizer with N-fixing Methylobacterium symbioticum on morpho-physiological traits of maize under varying N fertilization rates. Frontiers in Plant Science, 16, 1661290.

Bomkamp, S., Skaalure, S. C., Fernando, G. F., Ben-Arye, T., Swartz, E. W. E., & Specht, A. (2022). Scaffolding biomaterials for 3D cultivated meat: Prospects and challenges. Advanced Science, 9, 2102908. https://doi.org/10.1002/advs.202102908

Brownlie, W. J., Sutton, M. A., Cordell, D., Reay, D. S., Heal, K. V., Withers, P. J. A., Vanderbeck, I., & Spears, B. M. (2023). Phosphorus price spikes: A wake-up call for phosphorus resilience. Frontiers in Sustainable Food Systems, 7, 1088776. https://doi.org/10.3389/fsufs.2023.1088776

Brummer, E. C., Barber, W. T., Collier, S. M., Cox, T. S., Johnson, R., Murray, S. C., Olsen, R. T., Pratt, R. C., & Thro, A. M. (2011). Plant breeding for harmony between agriculture and the environment. Frontiers in Ecology and the Environment, 9, 561–568.

Bryant, C. (2020). Consumer acceptance of cultured meat: An updated review (2018–2020). Applied Sciences, 10(15), 5201. https://doi.org/10.3390/app10155201

Brzozowski, L., & Mazourek, M. (2018). A sustainable agricultural future relies on the transition to organic agroecological pest management. Sustainability, 10(6), 2023. https://doi.org/10.3390/su10062023

Burrough, P. A., McDonnell, R. A., & Lloyd, C. D. (2015). Principles of geographical information systems. Oxford University Press.

Cahyadi, E. R., Hidayati, N., Zahra, N., & Arif, C. (2024). Integrating circular economy principles into agri-food supply chain management: A systematic literature review. Sustainability, 16(16), 7165. https://doi.org/10.3390/su16167165

Campisi, J., & d'Adda di Fagagna, F. (2007). Cellular senescence: When bad things happen to good cells. Nature Reviews Molecular Cell Biology, 8, 729–740. https://doi.org/10.1038/nrm2233

Ceballos-Aguirre, N., Cuellar, J. A., Restrepo, G. M., & Sánchez, Ó. J. (2023). Effect of the application of Gluconacetobacter diazotrophicus and its interaction with nitrogen and phosphorus fertilization on carrot yield in the field. International Journal of Agronomy, 2023, 6899532.

Chakraborty, P., Kumar, R., Chakrabortty, S., Saha, S., Chattaraj, S., Roy, S., Banerjee, A., Tripathy, S. K., Ghosh, A. K., & Jeon, B. H. (2024). Technological advancements in the pretreatment of lignocellulosic biomass for effective valorization: A review of challenges and prospects. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 137, 29–60. https://doi.org/10.1016/j.jiec.2024.03.025

Chaudhary, A., Poudyal, S., & Kaundal, A. (2025). Role of arbuscular mycorrhizal fungi in maintaining sustainable agroecosystems. Applied Microbiology, 5(1), 6.

Chen, Q., Song, Y., An, Y., Lu, Y., & Zhong, G. (2024). Soil microorganisms: Their role in enhancing crop nutrition and health. Diversity, 16, 734.

Chriki, S., & Hocquette, J. F. (2020). The myth of cultured meat: A review. Frontiers in Nutrition, 7, 7. https://doi.org/10.3389/fnut.2020.00007

Compant, S., Cassan, F., Kostić, T., Johnson, L., Brader, G., Trognitz, F., & Sessitsch, A. (2025). Harnessing the plant microbiome for sustainable crop production. Nature Reviews Microbiology, 23(1), 9–23. https://doi.org/10.1038/s41579-024-01079-1

Cordell, D., Drangert, J.-O., & White, S. (2009). The story of phosphorus: Global food security and food for thought. Global Environmental Change, 19(2), 292–305.

https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2008.10.009
Curtis, P. G., Slay, C. M., Harris, N. L., Tyukavina, A., & Hansen, M. C. (2018). Classifying drivers of global forest loss. Science, 361(6407), 1108–1111. https://doi.org/10.1126/science.aau3445
de Abreu, V. H. S., Santos, A. S., & Monteiro, T. G. M. (2022). Climate change impacts on the road transport infrastructure: A systematic review on adaptation measures. Sustainability, 14(14), 8864. https://doi.org/10.3390/su14148864
de Jesus Santos, A. F., & Da Cas Bundt, A. (2025). Foliar inoculation with Methylobacterium symbioticum SB23 enhances biological nitrogen fixation and maize yield under contrasting edaphoclimatic conditions. Brazilian Journal of Agricultural Sciences/Revista Brasileira de Ciências Agrárias, 20(2).
DeJong, J. T., Fritzges, M. B., & Nüsslein, K. (2006). Microbially induced cementation to control sand response to undrained shear. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, *132*(11), 1381-1392.
Delgado-Baquerizo, M., Singh, B. K., Liu, Y. R., Sáez-Sandino, T., Coleine, C., Muñoz-Rojas, M., Bastida, F., & Trivedi, P. (2025). Integrating ecological and evolutionary frameworks for SynCom success. New Phytologist, 246(5), 1922–1933.
Devi, D. (2022). Soil microorganisms and their function to maintain soil fertility. In N. Kumar (Ed.), Chief Editor Dr Neeraj Kumar (pp. 61–75).
Dobos, E., & Karaali, A. (2003). Capacity building in agricultural biotechnology in Turkey. *Food Reviews International, 19*(4), 437–445. https://doi.org/10.1081/FRI-120025484
Duan, S., Feng, G., Limpens, E., Bonfante, P., Xie, X., & Zhang, L. (2024). Cross-kingdom nutrient exchange in the plant-arbuscular mycorrhizal fungus-bacterium continuum. Nature Reviews Microbiology, 22(12), 773–790. https://doi.org/10.1038/s41579-024-01073-7
Edelenbosch, O. Y., Hof, A. F., Van Den Berg, M., De Boer, H. S., Chen, H.-H., Daioglou, V., Dekker, M. M., Doelman, J. C., Den Elzen, M. G. J., Harmsen, M., Mikropoulos, S., Van Sluisveld, M. A. E., Stehfest, E., Tagomori, I. S., Van Zeist, W.-J., & Van Vuuren, D. P. (2024). Reducing sectoral hard-to-abate emissions to limit reliance on carbon dioxide removal. Nature Climate Change, 14(7), 715–722. https://doi.org/10.1038/s41558-024-02025-y
Eelager, M. P., Dalbanjan, N. P., Madihalli, S., Madar, M., Agadi, N. P., Korganokar, K., & Kiran, B. K. (2025). Pathways to a sustainable future: Exploring the synergy between sustainability and circular economy. Sustainable Futures, 10, 101208. https://doi.org/10.1016/j.sftr.2025.101208
Ezeagu, G., Omotosho, A., & Suleiman, K. (2023). Effective microorganisms, their products and uses—A review. Nile Journal of Engineering and Applied Science, 147954.
Fierer, N., & Jackson, R. B. (2006). The diversity and biogeography of soil bacterial communities. Proceedings of the National Academy of Sciences, 103(3), 626–631.
Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2013). Tackling climate change through livestock: A global assessment of emissions and mitigation opportunities. FAO.
Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2020). State of knowledge of soil biodiversity: Status, challenges and potentialities – Summary for policy makers. https://doi.org/10.4060/cb1929en
Food and Drug Administration. (2022). FDA completes first pre-market consultation for human food made using animal cell culture technology. https://www.fda.gov
Gabric, A. J. (2023). The climate change crisis: A review of its causes and possible responses. Atmosphere, 14, 1081.
Garbin, V. P., Ferreira, G. A., Olegário, J. D. C., Poniewas, L., & de Macedo, R. E. F. (2025). Animal-derived components in cultivated meat research and their alternatives. NPJ Science of Food, 10(1), 7. https://doi.org/10.1038/s41538-025-00656-9
Garcez de Oliveira Padilha, L., Malek, L., & Umberger, W. J. (2022). Consumers' attitudes towards lab-grown meat, conventionally raised meat and plant-based protein alternatives. Food Quality and Preference, 99, 104573. https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2022.104573
Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M. P., & Hultink, E. J. (2017). The circular economy – A new sustainability paradigm? Journal of Cleaner Production, 143, 757–768. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048
Gervasi, T., & Mandalari, G. (2024). Valorization of agro-industrial orange peel by-products through fermentation strategies. Fermentation, 10(5), 224. https://doi.org/10.3390/fermentation10050224
Gharechahi, J., Vahidi, M. F., Sharifi, G., Ariaeenejad, S., Ding, X.-Z., Han, J.-L., & Salekdeh, G. H. (2023). Lignocellulose degradation by rumen bacterial communities: New insights from metagenome analyses.

Environmental Research, 229, 115925. https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.115925
Godfray, H. C. J., Aveyard, P., Garnett, T., Hall, J. W., Key, T. J., Lorimer, J., Pierrehumbert, R. T., Scarborough, P., Springmann, M., & Jebb, S. A. (2018). Meat consumption, health, and the environment. Science, 361(6399). https://doi.org/10.1126/science.aam5324
González-Pérez, B. K., Rivas-Castillo, A. M., Valdez-Calderón, A., & Gayosso-Morales, M. A. (2022). Microalgae as biostimulants: A new approach in agriculture. World Journal of Microbiology and Biotechnology, 38(1), 4.
González-Recio, O., López-Paredes, J., Ouatahar, L., Charfeddine, N., Ugarte, E., Alenda, R., & Jiménez-Montero, J. A. (2020). Mitigation of greenhouse gases in dairy cattle via genetic selection: 2. Incorporating methane emissions into the breeding goal. Journal of Dairy Science, 103(8), 7210–7221. https://doi.org/10.3168/jds.2019-17598
Good Food Institute. (2025). The science of cultivated meat. https://gfi.org/science/the-science-of-cultivated-meat/
Goodchild, M. F. (2018). A GIScience perspective on the uncertainty of context. Annals of the American Association of Geographers, 108(6), 1476–1481.
Griffiths, H. M., Ashton, L. A., Parr, C. L., & Eggleton, P. (2021). The impact of invertebrate decomposers on plants and soil. New Phytologist, 231(6), 2142–2149. https://doi.org/10.1111/nph.17553
Gstraunthaler, G. (2003). Alternatives to the use of fetal bovine serum: Serum-free cell culture. ALTEX, 20(4), 275–281. https://doi.org/10.14573/altex.2003.4.257
Haque, M. N. (2018). Dietary manipulation: A sustainable way to mitigate methane emissions from ruminants. Journal of Animal Science and Technology, 60, 15. https://doi.org/10.1186/s40781-018-0175-7
Harding, K. J., Turk-Kubo, K. A., Mak, E. W. K., Weber, P. K., Mayali, X., & Zehr, J. P. (2022). Cell-specific measurements show nitrogen fixation by particle-attached putative non-cyanobacterial diazotrophs in the North Pacific Subtropical Gyre. Nature Communications, 13(1), 6979. https://doi.org/10.1038/s41467-022-34585-y
Harmsen, M. J. H. M., Van Vuuren, D. P., Bodirsky, B. L., Château, J., Durand-Lasserve, O., Drouet, L., & Fricko, O. (2019). The role of methane in future climate strategies: Mitigation potentials and climate impacts. Climatic Change, 163, 1409–1425.
Hasanin, M. S., Abdelraof, M., Hashem, A. H., & El Saied, H. (2023). Sustainable bacterial cellulose production by Achromobacter using mango peel waste. Microbial Cell Factories, 22(1), 24. https://doi.org/10.1186/s12934-023-02031-3
Hawkesford, M. J., Cakmak, I., Coskun, D., Kok, D., Lambers, L. J., Schjoerring, H., & White, J. K. (2023). Marschner's mineral nutrition of plants (Z. Rengel, I. Cakmak, & P. J. White, Eds.). Academic Press.
Hengl, T., Mendes de Jesus, J., Heuvelink, G. B., Ruiperez Gonzalez, M., Kilibarda, M., Blagotić, A., Shangguan, W., Wright, M. N., Geng, X., & Bauer-Marschallinger, B. (2017). SoilGrids250m: Global gridded soil information based on machine learning. PLoS ONE, 12(2), e0169748.
Herrero, M., Henderson, B., Havlik, P., Thornton, P., Conant, R., Smith, P., Wirsenius, S., Hristov, A., Gerber, P., Gill, M., Butterbach-Bahl, K., Valin, H., Garnett, T., & Stehfest, E. (2016). Greenhouse gas mitigation potentials in the livestock sector. Nature Climate Change, 6(5), 452–461. https://doi.org/10.1038/nclimate2925
Horn, S. (2025). Climate change in the 21st century: Scientific evidence, risks, and adaptation pathways (pp. 1–6).
Humbird, D. (2021). Scale-up economics for cultured meat. Biotechnology and Bioengineering, 118(8), 3239–3250. https://doi.org/10.1002/bit.27848
Intergovernmental Panel on Climate Change. (2006). 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories, Volume 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use (AFOLU). IPCC.
Intergovernmental Panel on Climate Change. (2021). Climate change 2021: The physical science basis. Cambridge University Press. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/
Intergovernmental Panel on Climate Change. (2022). Climate change 2022: Mitigation of climate change (AR6 WGIII). Cambridge University Press.
Intergovernmental Panel on Climate Change. (2023). Climate change 2022 – Impacts, adaptation and vulnerability: Working Group II contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781009325844
Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. (2019). Global assessment

report on biodiversity and ecosystem services. IPBES.
Itelima, J. U., Bang, W. J., Onyimba, I. A., Sila, M. D., & Egbere, O. J. (2018). Bio-fertilizers as key player in enhancing soil fertility and crop productivity: A review. Direct Research Journal of Agriculture and Food Science, 6(3), 73–83.
Jangir, C. K., Kumar, S., & Meena, R. S. (2019). Significance of soil organic matter to soil quality and evaluation of sustainability. In R. S. Meena (Ed.), Sustainable agriculture (pp. 357–381). Scientific Publisher.
Jatana, B. S., Grover, S., Ram, H., & Baath, G. S. (2024). Seed priming: Molecular and physiological mechanisms underlying biotic and abiotic stress tolerance. Agronomy, 14, 2901.
Javed, Z., Tripathi, G. D., Mishra, M., & Dashora, K. (2021). Actinomycetes—The microbial machinery for the organic-cycling, plant growth, and sustainable soil health. Biocatalysis and Agricultural Biotechnology, 31, 101893.
Jiao, N., Herndl, G. J., Hansell, D. A., Benner, R., Kattner, G., Wilhelm, S. W., ... & Azam, F. (2010). Microbial production of recalcitrant dissolved organic matter: long-term carbon storage in the global ocean. *Nature Reviews Microbiology*, *8*(8), 593-599.
Juvančič, L., Berne, S., Oven, P., & Osojnik Črnivec, I. G. (2023). Strategic concept paper for bioeconomy in Slovenia: From a patchwork of good practices to an integrated, sustainable and robust bioeconomy system. *Open Research Europe, 3*, 167. https://doi.org/10.12688/openreseurope.16181.1
Karalija, E., Dahija, S., Prijić, S., & Šamec, D. (2026). Enhancing chickpea (Cicer arietinum L.) resilience to salinity through proline and NaCl seed priming. Phyton, 95, 1–10.
Karalija, E., Lošić, A., Demir, A., & Šamec, D. (2024). Effects of seed priming on mitigating the negative effects of increased salinity in two varieties of sweet pepper (Capsicum annuum L.). Soil Systems, 8, 35.
Karalija, E., Selović, A., Bešta-Gajević, R., & Šamec, D. (2022). Thinking for the future: Phytoextraction of cadmium using primed plants for sustainable soil clean-up. Physiologia Plantarum, 174(5), e13783.
Karande, T. S., Ong, J. L., & Agrawal, C. M. (2004). Diffusion in musculoskeletal tissue engineering scaffolds: Design issues related to porosity, permeability, architecture, and nutrient mixing. Annals of Biomedical Engineering, 32(12), 1728–1743.
Karavolias, N. G., Horner, W., Abugu, M. N., & Evanega, S. N. (2021). Application of gene editing for climate change in agriculture. Frontiers in Sustainable Food Systems, 5, 685801.
Kavitha, S., Gondi, R., Kannah, R. Y., Kumar, G., & Banu, J. R. (2023). A review on current advances in the energy and cost effective pretreatments of algal biomass: Enhancement in liquefaction and biofuel recovery. Bioresource Technology, 369, 128383. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.128383
Ke, J., Wang, B., & Yoshikuni, Y. (2021). Microbiome engineering: Synthetic biology of plant-associated microbiomes in sustainable agriculture. Trends in Biotechnology, 39(3), 244–261. https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2020.07.008
Khan, I., Sun, J., Liang, W., Li, R., Cheong, K.-L., Qiu, Z., & Xia, Q. (2025). Innovations, challenges, and regulatory pathways in cultured meat for a sustainable future. Foods, 14, 3183. https://doi.org/10.3390/foods14183183
Knychala, M. M., Boing, L. A., Ienczak, J. L., Trichez, D., & Stambuk, B. U. (2024). Precision fermentation as an alternative to animal protein, a review. Fermentation, 10(6), 315. https://doi.org/10.3390/fermentation10060315
Kolkmann, A. M., Van Essen, A., Post, M. J., & Moutsatsou, P. (2022). Development of a chemically defined medium for in vitro expansion of primary bovine satellite cells. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, 10, 895289. https://doi.org/10.3389/fbioe.2022.895289
Kolur, S. M., Burud, A., Ramasamy, M., Sampath, V., Chellem, S. R., Satapathy, S. N., & Rout, A. (2024). A review on biotech innovations in seed technology for robust crop production. Journal of Advances in Biology & Biotechnology, 27(5), 535–550. https://doi.org/10.9734/jabb/2024/v27i5816
Kour, D., Rana, K. L., Yadav, A. N., Yadav, N., Kumar, M., Kumar, V., Vyas, P., Dhaliwal, H. S., & Saxena, A. K. (2020). Microbial biofertilizers: Bioresources and eco-friendly technologies for agricultural and environmental sustainability. Biocatalysis and Agricultural Biotechnology, 23, 101487. https://doi.org/10.1016/j.bcab.2019.101487
Kumar, S., Choudhary, M., K, J. R., Vishwakarma, V. K., Kashyap, V. K., Sahoo, S., & Mukhopadhyay, S. (2024). A review on the impact of climate change on plant pathogen interactions. Journal of Advances in Microbiology, 24(8), 11–27. https://doi.org/10.9734/jamb/2024/v24i8843

Lee, Y. S., Yuan, M., Cai, R., Lim, K., & Minteer, S. D. (2020). Nitrogenase bioelectrocatalysis: ATP-independent ammonia production using a redox polymer/MoFe protein system. ACS Catalysis, 10(12), 6854–6861.

Leiva, A., Larrea-Sebal, A., Acha, A., & Montes, L. R. (2025). Impact of biotechnology on sustainable development: An opinion analysis. Sustainability, 17(22), 10023. https://doi.org/10.3390/su172210023

Lyu, D., Zajonc, J., Pagé, A., Tanney, C. A., Shah, A., Monjezi, N., Msimbira, L. A., Antar, M., Nazari, M., & Backer, R. (2021). Plant holobiont theory: The phytomicrobiome plays a central role in evolution and success. Microorganisms, 9(4), 675.

Mącik, M., Gryta, A., & Frąc, M. (2020). Biofertilizers in agriculture: An overview on concepts, strategies and effects on soil microorganisms. In Advances in Agronomy (pp. 31–87). Elsevier.

Maitan-Alfenas, G. P., Visser, E. M., & Guimarães, V. M. (2015). Enzymatic hydrolysis of lignocellulosic biomass: Converting food waste in valuable products. Current Opinion in Food Science, 1, 44–49. https://doi.org/10.1016/j.cofs.2014.10.001

Malczewski, J., & Rinner, C. (2015). Multicriteria decision analysis in geographic information science (Vol. 1). Springer.

Mariano, E., Jr., Lee, D. Y., Lee, J., Choi, Y., Park, J., Han, D., Kim, J. S., Park, J. W., Namkung, S., & Hur, S. J. (2024). A review on the characterization of edible scaffolds for cultured meat: Physical, chemical, biocompatibility, and food safety evaluation methods. Food Chemistry, 469, 142493. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.142493

Martins, B., Bister, A., Dohmen, R. G. J., Gouveia, M. A., Hueber, R., Melzener, L., Messmer, T., Papadopoulos, J., Pimenta, J., Raina, D., Schaeken, L., Shirley, S., Bouchet, B. P., & Flack, J. E. (2024). Advances and challenges in cell biology for cultured meat. Annual Review of Animal Biosciences, 12, 345–368. https://doi.org/10.1146/annurev-animal-021022-055132

Masson-Delmotte, V. et al. 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, in the Context of Strengthening the Global Response to the Threat of Climate Change, Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Poverty https://www.ipcc.ch/sr15 (IPCC, 2018).

Mattick, C. S., Landis, A. E., Allenby, B. R., & Genovese, N. J. (2015). Anticipatory life cycle analysis of in vitro biomass cultivation for cultured meat production in the United States. Environmental Science & Technology, 49(19), 11941–11949. https://doi.org/10.1021/acs.est.5b01614

Messmer, T., Klevernic, I., Furquim, C., et al. (2022). A serum-free media formulation for cultured meat production supports bovine satellite cell differentiation. Nature Food, 3, 74–85. https://doi.org/10.1038/s43016-021-00419-1

Miranda, A. M., Hernandez-Tenorio, F., Villalta, F., Vargas, G. J., & Sáez, A. A. (2024). Advances in the development of biofertilizers and biostimulants from microalgae. Biology, 13(3), 199.

Mukherjee, R., & Sen, S. (2021). Role of biological nitrogen fixation (BNF) in sustainable agriculture: A review. International Journal of Advancement in Life Sciences Research, 4(3). https://doi.org/10.31632/ijalsr.2021.v04i03.001

OECD. (2025). *Policies for the future of farming and food in Croatia*. OECD Publishing. https://doi.org/10.1787/011c6272-en

Ogura, T., Goeschl, C., Filiault, D., Mirea, M., Slovak, R., Wolhrab, B., ... & Busch, W. (2019). Root system depth in Arabidopsis is shaped by EXOCYST70A3 via the dynamic modulation of auxin transport. *Cell*, *178*(2), 400-412.

Pallucchini, M., Franchini, M., El-Ballat, E. M., Narraidoo, N., Pointer-Gleadhill, B., Palframan, M. J., Hayes, C. J., Dent, D., Cocking, E. C., Perazzolli, M., Fray, R. G., & Hill, P. J. (2024). Gluconacetobacter diazotrophicus AZ0019 requires functional nifD gene for optimal plant growth promotion in tomato plants. Frontiers in Plant Science, 15, 1469676. https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1469676

Pallvi, & Gupta, H. (2025). Renewable composites for sustainable and eco-friendly solutions. Composite Materials, 9(2), 53–64. https://doi.org/10.11648/j.cm.20250902.11

Pendrill, F., Persson, U. M., Godar, J., & Kastner, T. (2019). Agricultural and forestry trade drives large share of tropical deforestation emissions. Global Environmental Change, 56, 1–10. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2019.03.002

Petrić, I., Šamec, D., Karalija, E., & Salopek-Sondi, B. (2022). Beneficial microbes and molecules for mitigation of soil salinity in Brassica species: A review. Soil Systems, 6, 18.

Petropoulos, D., Deirmentzoglou, G. A., Apostolopoulos, N., Paris, B., Michas, D., Balafoutis, A. T., Athanasopoulou, E., Nibbi, L., Li, H., Carvalho, L., Moreira da Silva, M. H., & Moreira da Silva, J. F. (2025). Digital and entrepreneurial competencies for the bioeconomy: Perceptions and training needs of agricultural professionals in Greece, Italy, Portugal, and Sweden. *Agriculture, 15*(10), 1106. https://doi.org/10.3390/agriculture15101106

Pettorelli, N., Ryan, S., Mueller, T., Bunnefeld, N., Jędrzejewska, B., Lima, M., & Kausrud, K. (2011). The Normalized Difference Vegetation Index (NDVI): Unforeseen successes in animal ecology. Climate Research, 46(1), 15–27.

Pliakoura, A., Beligiannis, G. N., Kontogeorgos, A., & Chatzitheodoridis, F. (2021). Farmers' perception of entrepreneurial success: Evidence from the Greek reality. *Agriculture, 11*(12), 1192. https://doi.org/10.3390/agriculture11121192

Poore, J., & Nemecek, T. (2018). Reducing food's environmental impacts through producers and consumers. Science, 360(6392), 987–992. https://doi.org/10.1126/science.aaq0216

Post, M. J. (2012). Cultured meat from stem cells: Challenges and prospects. Meat Science, 92(3), 297–301. https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2012.04.008

Post, M. J., Levenberg, S., Kaplan, D. L., Genovese, N., Fu, J., Bryant, C., Negowetti, N., & Moutsatsou, P. (2020). Scientific, sustainability and regulatory challenges of cultured meat. Nature Food, 1(7), 403–415. https://doi.org/10.1038/s43016-020-0112-z

Prisa, D., Fresco, R., & Spagnuolo, D. (2023). Microbial biofertilisers in plant production and resistance: A review. Agriculture, 13(9), 1666.

Qi, Z., & Feng, R. (2025). Global natural and anthropogenic methane emissions with approaches, potentials, economic costs, and social benefits of reductions: Review and outlook. Journal of Environmental Management, 373, 123568. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.123568

Quemada, M., Alonso-Ayuso, M., Esteban, R., & González, E. (2026). Maize (Zea mays L.) response to the biostimulant Methylobacterium symbioticum under various nitrogen fertilizer rates. European Journal of Agronomy, 172, 127887.

Rahmati, S., Doherty, W., Dubal, D., Atanda, L., Moghaddam, L., Sonar, P., Hessel, V., & Ostrikov, K. K. (2020). Pretreatment and fermentation of lignocellulosic biomass: Reaction mechanisms and process engineering. Reaction Chemistry & Engineering, 5(11), 2017–2047. https://doi.org/10.1039/d0re00241k

Rana, R. L., Bux, C., & Tommaso, V. (2026). The sustainability nexus of cultured meat: Integrating environmental, social, and technological-economic insights. Food Research International, 227, 118245. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2025.118245

Raza, S., Orooji, Y., Ghasali, E., Hayat, A., Karimi-Maleh, H., & Lin, H. (2023). Engineering approaches for CO2 converting to biomass coupled with nanobiomaterials as biomediated towards circular bioeconomy. Journal of CO2 Utilization, 67, 102295.

Rezaee Danesh, Y. (2025). Harnessing beneficial microbes and sensor technologies for sustainable smart agriculture. Sensors, 25(21), 6631.

Risner, D., Kim, D. I., Choudhury, D., & Kaplan, D. L. (2024). Environmental impacts of cultured meat: A cradle-to-gate life cycle assessment. ACS Food Science & Technology. https://doi.org/10.1021/acsfoodscitech.4c00281

Roque, B. M., Venegas, M., Kinley, R. D., de Nys, R., Duarte, T. L., Yang, X., & Kebreab, E. (2021). Red seaweed (Asparagopsis taxiformis) supplementation reduces enteric methane by over 80 percent in beef steers. PLoS ONE, 16(3), e0247820. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0247820

Rubio, N. R., Xiang, N., & Kaplan, D. L. (2019). Plant-based and cell-based approaches to meat production. Nature Communications, 10, 2046. https://doi.org/10.1038/s41467-019-09255-2

Sadvakasova, A. K., Kossalbayev, B. D., Bauenova, M. O., Balouch, H., Leong, Y. K., Zayadan, B. K., & Allakhverdiev, S. I. (2023). Microalgae as a key tool in achieving carbon neutrality for bioproduct production. Algal Research, 72, 103096.

Santander, C., González, F., Pérez, U., Ruiz, A., Aroca, R., Santos, C., Cornejo, P., & Vidal, G. (2024). Enhancing water status and nutrient uptake in drought-stressed lettuce plants (Lactuca sativa L.) via inoculation with different Bacillus spp. isolated from the Atacama Desert. Plants, 13(2), 158. https://doi.org/10.3390/plants13020158

Satlewal, A., Agrawal, R., Bhagia, S., Sangoro, J., & Ragauskas, A. J. (2018). Natural deep eutectic solvents for

lignocellulosic biomass pretreatment: Recent developments, challenges and novel opportunities. Biotechnology Advances, 36(8), 2032–2050. https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2018.08.009

Schwander, T., Schada von Borzyskowski, L., Burgener, S., Cortina, N. S., & Erb, T. J. (2016). A synthetic pathway for the fixation of carbon dioxide in vitro. *Science*, *354*(6314), 900-904.

Seah, J. S. H., Singh, S., Tan, L. P., & Choudhury, D. (2022). Scaffolds for the manufacture of cultured meat. Critical Reviews in Biotechnology, 42(2), 311–323. https://doi.org/10.1080/07388551.2021.1953456

Seibert, G. A., Feddern, V., Bastos, A. P. A., Kumar, A., & Verruck, S. (2025). Trends in non-animal scaffolds for cultured meat structuration. NPJ Science of Food, 9(1), 208. https://doi.org/10.1038/s41538-025-00429-4

Senko, H., Kajić, S., Huđ, A., Palijan, G., Petek, M., Rajnović, I., Šamec, D., Udiković-Kolić, N., Mešić, A., Brkljačić, L., & Petrić, I. (2024). Will the beneficial properties of plant-growth promoting bacteria be affected by waterlogging predicted in the wake of climate change: A model study. Applied Soil Ecology, 198, 105379.

Seyhan, N. (2022). Weightening the barriers to biotechnology entrepreneurship in Turkey by SWARA method. *European Journal of Science and Technology, 43*, 136–141. https://doi.org/10.31590/ejosat.1218377

Sganzerla, W. G., Tena-Villares, M., Buller, L. S., Mussatto, S. I., & Forster-Carneiro, T. (2022). Dry anaerobic digestion of food industry by-products and bioenergy recovery: A perspective to promote the circular economy transition. Waste and Biomass Valorization, 13(5), 2575–2589. https://doi.org/10.1007/s12649-022-01682-4

Sharma, A., Negi, N. P., Narwal, P., Kumari, P., & Kumar, D. (2022). Arbuscular mycorrhizal fungi: A next-generation biofertilizer for sustainable agriculture. In R. Prasad & S.-H. Zhang (Eds.), Beneficial microorganisms in agriculture (pp. 161–176). Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-19-0733-3_6

Sharma, M., Bains, A., Goksen, G., Dhull, S. B., Ali, N., Rashid, S., Elossaily, G. M., & Chawla, P. (2024). Valorization of agricultural waste for the synthesis of cellulose membranes. International Journal of Biological Macromolecules, 277, 134170.

Singh, A., et al. (2022). Recent advances in bioengineered scaffold for in vitro meat production. Biomaterials Science, 10, 4088–4105. https://doi.org/10.1039/D2BM00333A

Singh, D., Thapa, S., Geat, N., Mehriya, M. L., & Rajawat, M. V. S. (2021). Biofertilizers: Mechanisms and application. In Biofertilizers (pp. 151–166). Elsevier.

Soice, E., & Johnston, J. (2021). Immortalizing cells for human consumption. International Journal of Molecular Sciences, 22, 11660. https://doi.org/10.3390/ijms222111660

Sota, V., Nacheva, L., Bošnjak, D., Abraham, E., Jevremović, S., Cvjetković, B., Galović, V., Jevremović, D., Marković, Z., Kongjika, E., Bogunović, S., Zeljković, S., Andonovski, V., Daničić, V., & Vujović, T. (2025). Unveiling the Balkans' advances: In vitro biotechnology of woody plants in the early 21st century. Frontiers in Plant Science, 16, 1550318.

Specht, L., Welch, D., Rees Clayton, E., & Lagally, C. (2018). Opportunities for applying biomedical production and manufacturing methods to the development of the clean meat industry. Biochemical Engineering Journal, 132, 161–168. https://doi.org/10.1016/j.bej.2018.01.015

Stephens, N., Di Silvio, L., Dunsford, I., Ellis, M., Glencross, A., & Sexton, A. (2018). Bringing cultured meat to market: Technical, socio-political, and regulatory challenges. Trends in Food Science & Technology, 78, 155–166. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.04.010

Stout, A. J., Kaplan, D. L., & Flack, J. E. (2023). Cultured meat: Creative solutions for a cell biological problem. Trends in Cell Biology, 33(1), 1–4. https://doi.org/10.1016/j.tcb.2022.10.002

Subašić, M., Šamec, D., Selović, A., & Karalija, E. (2022). Phytoremediation of cadmium polluted soils: Current status and approaches for enhancing. Soil Systems, 6, 3.

Telles, T. S., Nogueira, M. A., & Hungria, M. (2023). Economic value of biological nitrogen fixation in soybean crops in Brazil. Environmental Technology & Innovation, 31, 103158. https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.103158

Tenorio Berrío, R., Nelissen, H., Inzé, D., & Dubois, M. (2022). Increasing yield on dry fields: Molecular pathways with growing potential. The Plant Journal, 109(2), 323–341. https://doi.org/10.1111/tpj.15550

Tilman, D., Cassman, K. G., Matson, P. A., Naylor, R., & Polasky, S. (2002). Agricultural sustainability and intensive production practices. Nature, 418(6898), 671–677. https://doi.org/10.1038/nature01014

Timsina, J. (2018). Can organic sources of nutrients increase crop yields to meet global food demand? Agronomy,

8(10), 214. https://doi.org/10.3390/agronomy8100214
Trenberth, K. E. (2010). Changes in precipitation with climate change. Climate Research, 47, 123–138. https://doi.org/10.3354/cr00953
Trivedi, P., Batista, B. D., Bazany, K. E., & Singh, B. K. (2022). Plant–microbiome interactions under a changing world: Responses, consequences and perspectives. New Phytologist, 234(6), 1951–1959. https://doi.org/10.1111/nph.18016
Tuomisto, H. L., & Teixeira de Mattos, M. J. (2011). Environmental impacts of cultured meat production. Environmental Science & Technology, 45(14), 6117–6123. https://doi.org/10.1021/es200130u
Turganova, R., Tuleyeva, R., Belkozhayev, A., Gizatullina, N., Yelemessova, G., Taubatyrova, A., Mussalimova, M., Shynykul, Z., & Toleutay, G. (2025). Bacterial cellulose for sustainable food packaging: Production pathways, structural design, and functional modification strategies. Polymers, 17(23), 3165. https://doi.org/10.3390/polym17233165
United Nations. (n.d.). Sustainable Development Goals. https://sdgs.un.org/goals
van der Weele, C., & Tramper, J. (2014). Cultured meat: Every village its own factory? Trends in Biotechnology, 32(6), 294–296. https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2014.04.009
Vandenkoornhuyse, P., Quaiser, A., Duhamel, M., Le Van, A., & Dufresne, A. (2015). The importance of the microbiome of the plant holobiont. New Phytologist, 206(4), 1196–1206.
Verbeke, W., Marcu, A., Rutsaert, P., Gaspar, R., Seibt, B., Fletcher, D., & Barnett, J. (2014). 'Would you eat cultured meat?' Consumers' reactions and attitude formation in Belgium, Portugal & the United Kingdom. Meat Science, 102, 49–58. https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2014.11.013
Verbeke, W., Sans, P., & Van Loo, E. J. (2015). Challenges and prospects for consumer acceptance of cultured meat. Journal of Integrative Agriculture, 14(2), 285–294. https://doi.org/10.1016/S2095-3119(14)60884-4
Verhees, F. J. H. M., Kuipers, A., & Klopcic, M. (2011). Entrepreneurial proclivity and farm performance: The cases of Dutch and Slovenian farmers. *International Journal of Entrepreneurship and Innovation, 12*(3), 169–177. https://doi.org/10.5367/ijei.2011.0039
Wahab, A., Muhammad, M., Munir, A., Abdi, G., Zaman, W., Ayaz, A., Khizar, C., & Reddy, S. P. P. (2023). Role of arbuscular mycorrhizal fungi in regulating growth, enhancing productivity, and potentially influencing ecosystems under abiotic and biotic stresses. Plants, 12(17), 3102.
Wang, B., Li, Y., Wu, N., & Lan, C. Q. (2018). CO_2 bio-mitigation using microalgae. Applied Microbiology and Biotechnology, 102(2), 877–891. https://doi.org/10.1007/s00253-017-8661-0
Wang, P., Yang, Y., Xue, D., Ren, L., Tang, J., Leung, L. R., & Liao, H. (2023). Aerosols overtake greenhouse gases causing a warmer climate and more weather extremes toward carbon neutrality. Nature Communications, 14(1), 5445. https://doi.org/10.1038/s41467-023-42891-2
Wangsa Putrie, R. F., Aryantha, I. N. P., Iriawati, I., & Antonius, S. (2020). Diversity of endophytic and rhizosphere bacteria from pineapple (Ananas comosus) plant in semi-arid ecosystem. Biodiversitas: Journal of Biological Diversity, 21(7), 3084–3093. https://doi.org/10.13057/biodiv/d210728
Willett, W., Rockström, J., Loken, B., Springmann, M., Lang, T., Vermeulen, S., Garnett, T., Tilman, D., DeClerck, F., Wood, A., Jonell, M., Clark, M., Gordon, L. J., Fanzo, J., Hawkes, C., Zurayk, R., Rivera, J. A., De Vries, W., Majele Sibanda, L., & Murray, C. J. L. (2019). Food in the Anthropocene: The EAT-Lancet Commission on healthy diets from sustainable food systems. The Lancet, 393(10170), 447–492. https://doi.org/10.1016/S0140-6736(18)31788-4
Williams, A., Aguilar, M. R., Pattiya Arachchillage, K. G. G., Chandra, S., Rangan, S., Ghosal Gupta, S., & Artes Vivancos, J. M. (2024). Biosensors for public health and environmental monitoring: The case for sustainable biosensing. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 12(28), 10296–10312. https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.3c06112
World Health Organization. (2025). The state of food security and nutrition in the world 2025 – Addressing high food price inflation for food security and nutrition (Vol. 2025). Food & Agriculture Org. https://doi.org/10.4060/cd6008en
Wu, B., Luo, S., Luo, H., Huang, H., Xu, F., Feng, S., & Xu, H. (2022). Improved phytoremediation of heavy metal contaminated soils by Miscanthus floridulus under a varied rhizosphere ecological characteristic. Science of the Total Environment, 808, 151995.
VVEU Conference Proceedings. (2026). *The role of entrepreneurial strategies in strengthening competitiveness and*

sustainability of agricultural enterprises in Croatia. Book of Abstracts.

Xiang, N., Yao, Y., Yuen, J. S. K., Stout, A. J., Fennelly, C., Sylvia, R., Schnitzler, A., Wong, S., & Kaplan, D. L. (2022). Edible films for cultivated meat production. Biomaterials, 287, 121659. https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2022.121659

You, L., Ros, G. H., Chen, Y., Shao, Q., Young, M. D., Zhang, F., & de Vries, W. (2023). Global mean nitrogen recovery efficiency in croplands can be enhanced by optimal nutrient, crop and soil management practices. Nature Communications, 14(1), 5747. https://doi.org/10.1038/s41467-023-41504-2

Zhang, G., Zhao, X., Li, X., Du, G., Zhou, J., & Chen, J. (2020). Challenges and possibilities for bio-manufacturing cultured meat. Trends in Food Science & Technology, 97, 443–450. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.01.026

Zhang, M., Tian, R., Tang, S., Wu, K., Wang, B., Liu, Y., Zhu, Y., Lu, H., & Liang, B. (2023). The structure and properties of lignin isolated from various lignocellulosic biomass by different treatment processes. International Journal of Biological Macromolecules, 243, 125219. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.125219

Zirman, A., Abed El-Nabi, M., Samuel, E., Anavy, L., Yakhini, Z., Nachman, I., & Rak, R. (2025). Pooled CRISPR screens identifies key regulators of bovine stem cell expansion for cultured meat. Communications Biology. https://doi.org/10.1038/s42003-025-08760-y

Co-funded by the European Union

BIOSHIELD

Inovativne biotehnološke rešitve za blažitev podnebnih sprememb

(Novel Biotechnological Solutions in Climate Change Mitigation)

2024-1-EL01-KA220-HED-000251373

Podpora Evropske komisije pri pripravi te publikacije ne pomeni odobritve njene vsebine, ki odraža izključno stališča avtorjev. Evropska komisija ne prevzema odgovornosti za kakršno koli uporabo informacij, ki jih publikacija vsebuje. To učno gradivo je objavljeno pod licenco











